

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK

Kiemelt közlemények

Csató Péter, Óvári Gyula:
A hidrogén felhasználásának jelene és jövője a repülésben

Páll Márton, Wantuch Ferenc:
Szupercellák objektív felismertetése villámadatok segítségével

Csurgai József:
Drónra szerelhető radiológiai modul fejlesztési koncepció, hardveres felépítés és nukleáris méréstechnikai alapok

34. évf. (2022)
3. szám

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

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. Bottyán Zsolt (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Dunai Pál (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Kavas László (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Prof. Dr. Makkay Imre (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Palik Mátyás (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Prof. Dr. Pokorádi László (Óbudai Egyetem)
Dr.h.c. doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD., MBA, LL.M. (Kassai Műszaki Egyetem, Szlovákia)
Prof. Dr. Szabolcsi Róbert (Óbudai Egyetem)
Dr. Szilvássy László (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Vas Tímea (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)

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

Szerkesztőség címe: 5008 Szolnok, Kilián út 1.
Levelezési címe: 5008 Szolnok, Pf. 1.
e-mail: RepTudKozl@uni-nke.hu

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

Borítókép: a képet Kővári László † (jetplanes.blog.hu) készítette.

Tartalom

Táborszky József: A katonai repülőtereket érintő biztonsági kihívások változása a történelem során – 2. rész 5

Sally Ichou, Árpád Veress: Technology Roadmap for Aircraft Maintenance, Repair and Overhaul 19

Sándor Zsolt: Az áruszállító drónok megjelenése okozta kihívások a légi közlekedési rendszerben 31

Sándor Zsolt, Pusztai Máté: Pilóta nélküli légi járművek a mezőgazdaság szolgálatában – a hazai hatósági szabályozási keretrendszer 47

Csató Péter, Óvári Gyula: A hidrogén felhasználásának jelene és jövője a repülésben . . 59

Békési Bertold, Csóré Attila, Gajdács László: A légi járművek adatfeldolgozó és adattovábbító rendszere – az Air Data Computer 77

András Vajda, István Szalkai: New Complex Military and Civil UAV/RPA Classification System for Registration, Administrative Purposes, and Special Operation Preparation. 91

Páll Márton, Wantuch Ferenc: Szupercellák objektív felismertetése villámadatok segítségével 109

Ádám Fehér, Imre Kállai, Árpád Veress: Parameter Sensitivity Analysis and Structural Development of an Airliner Lavatory Unit by Means of Finite Element Method 125

Vas Tímea, Halászné Tóth Alexandra, Bali Tamás, Dudás Zoltán, Bottyán Zsolt, Gajdos Máté, Fekete Csaba: A pilóta nélküli légi jármű-rendszerek integrálása a repülőtér forgalmába 145

László Szilvássy: Why Does the Attack Helicopter Have More Survival Ability than the Armed Utility Helicopter? 167

Csurgai József: Drónra szerelhető radiológiai modul fejlesztési koncepció, hardveres felépítés és nukleáris méréstechnikai alapok 181

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
34. évfolyam (2022) 3. szám 5–17. • DOI: 10.32560/rk.2022.3.1

Táborszky József

A katonai repülőtereket érintő biztonsági kihívások változása a történelem során – 2. rész

A repülőterek, repülőbázisok kialakulása szinte egybeesik a repülés kezdeteivel, még ha eleinte csak rögtönzött felszállópályák álltak is rendelkezésre. A repülőgépek kiterjesztik a hadviselést a harmadik dimenzióra a légtér uralásával, azonban nélkülözhetetlenül függnek a földi szentélyek működésétől. A légi bázisok biztonsága így megkérdőjelezhetetlen, ugyanakkor fontos kérdés, hogy jelentőségük hogyan változott az idők folyamán, és hogy a technika, a képességek és az elvek fejlődésével hogy változott ezen létesítmények biztonsága.

Kulcsszavak: *repüléstörténet, repülőbázis, légi bázis, fenyegetések, védelem, biztonság*

1. A repülőbázisok mint stratégiai objektumok

A katonai repülés a hőlégballonok első katonai alkalmazása óta hatalmas változásokon ment keresztül. Ez idő alatt megváltozott a repülés szerepe a hadviselésben, eljutottunk a felderítő funkciótól a speciális szakfeladatokra tervezett repülőgépeken keresztül napjainkig, amikor a felderítő és támogató légi műveletek mellett az egyik legjelentősebb feladatot a többcélú, földi és légi célok megsemmisítésére képes vadászrepülőgépek látják el. Lenyűgöző az a technikai fejlődés, amelyet megfigyelhetünk, és amely egyúttal maga után vonta a légierő és a honvédelem szervezetének, illetve az alkalmazott eljárásoknak a változását. Részben ezek a változások, részben a hadviselés módjának fejlődése idézte elő a repülőgépek felértékelődését, ami saját oldalról a védelem és biztonság, az ellenség oldaláról pedig a velük szembeni támadások módszereinek fejlesztését vonta maga után. Ebben a változásban nagy szerep hárult a repülőbázisokra, amelyek a repülőgépek befogadására alkalmas szentélyekként gondoskodtak a repülőgépek feladatba vetéséről és kivonásáról, illetve a feladatok közti kiszolgálások biztosításáról [1], [2], [3].

A *Hadtudományi Lexikon* megfogalmazásában a katonai „repülőtér a repülőgépek, helikopterek és más légi járművek elhelyezésére, kiszolgálására, fel- és leszállására alkalmas és az ehhez szükséges építményekkel, berendezésekkel ellátott terület" [4, p. 947]. Ennek megfelelően a katonai repülőtér rendeltetése: biztosítani a különböző típusú, fajtájú és kategóriájú katonai légi járművek fogadásának, indításának, karbantartásának, tárolásának, javításának és ismételt feladatra való felkészítésének feltételeit. Rendelkeznie kell a különböző repülési feladatok ellátásához a légi járművek földi kiszolgálásához, javításához szükséges anyagokkal, technikai eszközökkel, erőforrásokkal, rakéta-, lőszer- és robbanóanyagokkal,

valamint ezek elhelyezési, működési és tárolási feltételeivel. Biztosítania kell a kiszolgáló és üzemeltető állomány kiképzési, felkészülési, pihenési, valamint élet- és munkakörülményeit. Továbbá rendelkeznie kell a fenti feladatok ellátásához, a biztonságos működéshez szükséges létesítményekkel, leszálló-, jelző- és irányítóberendezésekkel, a repülőtér rendjét, külső és belső védelmét szolgáló technikai rendszerekkel [5].

1.1. A ballontechnológia földibázis-igénye

A hőlégballon és a hidrogéngáz-töltésű ballonok alkalmazása kezdetben még helyhez kötött volt. Kis terület elegendő volt a fel- és leszállás végrehajtásához, főleg, mivel kötéllel rögzítették a talajhoz, nehogy elsodródjon. Ebben az időben a gyors manőverek nem voltak jellemzők a szárazföldi erőkre, így egy pontról jól megfigyelhető volt az ütközetek alakulása, a tüzérség számára pedig hasznos támogatást nyújtottak ezek a felderítési információk. Az 1870–71-es francia–német háborúban ugyancsak alkalmazták a ballonokat, ekkor már a technológia fejlődése miatt a rögzített megfigyelőballonok mellett megjelentek a mozgó ballonok is, hogy a híreket és a lakosságot kimenekítsék a körülzárt Párizsból. Az első valódi légi kikötők a Zeppelin léghajókhoz köthetők, amelyek merev szerkezettel, nagy szállítási kapacitással rendelkeztek és irányíthatók voltak. Fel- és leszállásuk emberi munkaerőt igényelt, ennek megfelelően tárolásuk, összeszerelésük és javításuk is nagy méretű hangárokban valósult meg [6], [7].

1.2. Repülőterek az első világháborúban

Az első világháborúban megjelenő levegőnél nehezebb légi járművek a vonóerő és felhajtóerő kombinációjával érték el a gravitáció legyőzését, amihez jelentős vízszintes irányú gyorsulásra van szükség, és ami egyben meghatározza a repülőgépek fel-, illetve leszállásához szükséges terület nagyságát. Ez adott esetben lehetett egy mező vagy mezőgazdasági terület, amely kellően akadálymentes volt, illetve lehetett előkészített terület, mindenesetre leszögezhetjük, hogy korántsem hasonlítottak a mai felszállópályákra. A repülőgépeknek kis hatótávolságuk miatt a frontvonal közelében kellett elhelyezkedniük, ami nem jelentett problémát a háború kezdetén annak viszonylagos statikussága miatt, így a repülőgépek a harcárokrendszer mögötti biztonságos területről tudtak felszállni. A háború előrehaladtával, ahogy felismerték a repülésben rejlő lehetőségeket, úgy változott a repülőgépek felhasználási módja, anyaghasználata, eszközkészlete és a szállított hasznos teher mennyisége is. Ezek a változások maguk után vonták a felszállópálya méreteinek és teherbírásának változását is. A repülőgépek is felértékelődtek, és a jelentőségükhöz mérten szükségessé vált a szélsőséges időjárási körülmények között működni képes repülőterek, illetve a fedett, rejtett, védett objektumok kialakítása. Az első világháború végére már megjelentek a betonozott felszállópályák, a fedett hangárok és kiszolgáló épületek, és kezdetét vette a biztonsági létesítmények kialakítása. Ugyan, már a háború első hónapjaiban történtek légi bázisok elleni támadások, azok eredményessége erőteljesen megkérdőjelezhető. Azonban ebből is látható, hogy már korán felismerték, hogy a repülőgépekkel szembeni küzdelem talán leghatékonyabb módja azok felszíni bázisainak pusztítása, ahogy ezt Giulio Douhet is megfogalmazta [2], [3], [8, pp. 3–43].

1.3. Légi bázisok a második világháborúban

A nagy háború végére már nagy számban alkalmaztak repülőgépeket, amelyekre alapozva a repülés és a hozzá kapcsolódó szolgáltatások jelentős fejlődésen mentek keresztül a polgári felhasználás területén is. Sokszor a háborúban használt repülőgépek modifikációjával biztosították a polgári igények kielégítését, azaz a katonai és polgári légi közlekedés kölcsönösen hatottak egymás fejlődésére. A második világháború kezdetére már számos polgári és katonai repülőtér létezett, ahol megfelelő körülményeket tudtak biztosítani a repülőgépek üzemeltetéséhez. Bár Giulio Douhet már az 1920-as években felhívta a figyelmet a repülőbázisok lényegi mivoltára, a második világháború kezdetén a szövetséges erőket mégis meglepetésként érte a tengelyhatalmak újszerű villámháborús taktikája, amely az ellenséges államok repülőtereinek bombázásával, majd gyors elfoglalásával biztosította a légi fölény elérését, illetve a szárazföldi erők előrenyomulásának támogatását. A háború előrehaladtával egyre nagyobb jelentősége lett a hadmérnöki tevékenységnek, amely egyrészt a rombolt repülőterek helyreállításával, másrészt új műveleti repülőbázisok létesítésével biztosította a légi műveletek sikerét. A biztonság fokozása érdekében ekkor jelentek meg azok a passzív és aktív biztonsági elemek és eljárások, amelyekre már a háború elején nagy szükség lett volna. A kor egyik legjelentősebb találmánya a radar, amelynek segítségével a hatékony légvédelem megvalósulhatott. A repülőgépek sebessége a sugárhajtómű-technológia megjelenésével egyre növekedett, ami a futópályák hosszának ismételt növekedéséhez vezetett [2], [3].

1.4. A mai kor modern repülőbázisai

A légi bázisok védelme bár folyamatosan javult, új eszközök és eljárások jelentek meg a légvédelem, a földi védelem, a repülőtér-helyreállítás és a passzív védelem területein is, sajnálatos módon a 20. századi háborúk kezdetére rendszerint a gazdasági megfontolások miatt jellemzően leromlott, elégtelenné vált. A földi védelem kérdése a második világháborúban vált kritikussá, de sajnos ezt követően újra hanyatlásnak indult. Az azóta eltelt időszakban a koreai háborúban nem jelent meg jelentős földi fenyegetés az amerikai erőkkel szemben, viszont a vietnámi háborúban ismételten fel kellett ismerni a repülőbázisok, illetve azok biztonságának kritikusságát, és ez vezetett el a repülőbázisok napjainkra jellemző kialakításához és védelméhez. A mai repülőbázisok kerítéssel és sok helyen biztonsági zónával körbevett területek, ahol a személyi, fizikai, adminisztratív és elektronikus információbiztonság eszközrendszerével valósul meg a külső fenyegetésekkel szembeni védelem [2], [3].

Napjainkra a repülőbázisok olyan komplex létesítményekké fejlődtek, amelyek minden oldalról igyekeznek hatékonyan támogatni a repülőgépekkel végrehajtott műveleti tevékenységeket. Rendeltetését tekintve a mai modern repülőbázis az alábbi létesítményekből épül fel:

- a repülőgépek fel- és leszállását, illetve földi mozgását biztosító építmények;
- a légi járművek felkészítésének és műszaki kiszolgálásának műtárgyai, berendezései;
- a repülőgépek védett elhelyezését és üzemképességük biztosítását, a repülések műszaki támogatását biztosító létesítmények;
- a repülések és a légi járművek földi mozgásának irányítását szolgáló létesítmények, híradó és informatikai rendszerek, berendezések;

- a biztonságos fel- és leszállást, gurulást biztosító létesítmények, híradó, fénytechnikai és leszállító rendszerek, berendezések;
- a repülőterek működtetéséhez szükséges közműhálózatok, energiaellátó rendszerek, bázisok, létesítmények, építmények;
- a kiképzési és harcfeladatokhoz szükséges lőszer, fegyverzet tárolását, védelmét és karbantartását szolgáló létesítmények;
- a katonai és harcfeladatok ellátásához, végrehajtásához szükséges irányító objektumok;
- laktanyai elhelyezésben működő, vezetési és szakmai épületek, minősített kiképző és sportbázisok;
- a laktanyai elhelyezéshez tartozó létesítmények, épületek és szolgáltató bázisok [5].

A ballontechnológiával épített légi járművek még nem igényeltek hagyományos repülőtereket, főleg a kezdeti időkben, amikor még statikusan, talajhoz rögzített módon látták el feladatukat. A kormányozható ballonok, elsősorban a Zeppelinek megjelenése tette először szükségessé egy olyan infrastruktúra kialakítását, amely biztosította a fel- és leszálláshoz szükséges terület, a karbantartó hangárok és az emberi munkaerő együttállását a szervezett repülések érdekében. A levegőnél nehezebb légi járművek megjelenését követően rövid időn belül kitört az első világháború, ahol már szervezetten, összehangoltan kellett alkalmazni azokat, ugyanakkor ezzel együtt új igények is megjelentek. Míg a háború kezdetén réteket, mezőgazdasági területeket használtak felszállópályaként, addig a háború végére megjelentek az előkészített területek, amelyeket kiegészítettek hangárokkal, raktárakkal, a repülőgépek kiszolgálása érdekében. A második világháborúban már megjelentek az épített kifutópályák, és a repülőgépek leszállása, kiszolgálása mellett egyre nagyobb jelentősége lett a repülőbázisok védelmének. Ahogy azt Phillip S. Meilinger[1] az Egyesült Államok Légierejének ezredese is megfogalmazta: „aki a levegőt ellenőrzi, az általában a felszínt is uralja" [9]. Az ő gondolatai is arra világítanak rá, hogy a győzelemhez vezető út a légi fölény kialakításán keresztül vezet, aminek pedig előfeltétele a biztonságos, védett, hatékonyan működő légi bázisok működése.

2. A repülőbázisokkal szembeni fenyegetések

A légi támaszpontok létesítésének szükségessége csak az első világháborúban merült fel, ám ahogy a repülőgépek a technológiai fejlődéssel egyre kifinomultabbak és érzékenyebbek lettek, hamarosan nélkülözhetetlenné vált a minden napszakban és időjárási körülmények között használható felszállópályák létesítése. A futópályákhoz később hangárok, műhelyek, legénységi barakkok, valamint műszaki és logisztikai létesítmények csatlakoztak a repülőgépek minél teljesebb körű kiszolgálása érdekében. A felszállópálya és a hozzá tartozó kiszolgáló létesítmények azonban nemcsak hasznosságukkal tűntek ki, hanem könnyen felderíthető célokká is váltak, ami szükségessé tette a biztonsági létesítmények és berendezések fejlesztését, a védelmi szakemberek fenntartását és a védelem elveinek kidolgozását. A támadóeszközök is korszerűsödtek, egyre specifikusabbá és pontosabbá váltak, és a megfelelő személyzettel és bevetési elvek alkalmazásával igen komoly károkat okozhattak az ellenfél légierejében.

[1] Phillip S. Meilinger az USAF ezredese, bölcsészdoktor, PhD-fokozatát a University of Michiganen szerezte.

2.1. Az első repülőbázisokat ért támadások az első világháborúban

Az első földi bázis elleni támadásra 1914. augusztus 24-én került sor, amelyben a Brit Királyi Légierő egysége támadta a földön tartózkodó német repülőgépeket egy bomba segítségével, bár ekkor még sikertelenül. Az első sikeres légi támaszpont elleni támadásra 1914. október 8-án került sor, ekkor a Brit Királyi Légierő a düsseldorfi Zeppelin-hangárokat támadta, amelyben megsemmisítettek egy Zeppelint, egy Zeppelin-csarnokot és egy gépműhelyt. Ironikus módon, ezt a támadást azonnal követte az egyik első szárazföldi repülőterek elleni támadás, amelyben a német tüzérség az antwerpeni repülőteret találta el, ahonnan a Zeppelin-támadást végrehajtó repülőgépeket is indították. A háború korai szakaszában a frontvonalak közelében elhelyezkedő rögtönzött repülőtereket kézigránátokkal, Molotov-koktélokkal támadták, viszont nagyobb mennyiségű bomba szállítására ekkor még csak a Zeppelinek voltak képesek, amelyek kis sebességük és nagy felületük miatt könnyű célt jelentettek a földi erők számára [11, pp. 5–52].

Winston Churchill az Admiralitás első lordjaként több támadást is ösztönzött a repülőgépek és Zeppelinek földi bázisai ellen, mert ő már ekkor meglátta a repülőgépekben rejlő lehetőséget és azt, hogy ezek az eszközök a földön a legsebezhetőbbek. Ennek hatására több támadás is indult a Zeppelinek bázisai ellen, ami 200 km körüli út megtételét jelentette nehéz navigációs körülmények között. A nagy háború második felére már rendszeressé váltak a repülőterek elleni, repülőgépekkel elkövetett támadások, amelyekhez már bombázó repülőket, illetve a bombázók védelmére vadászrepülőgépeket használtak. A bombázásokhoz igyekeztek az éjszaka leplét kihasználni, amikor az erőteljes fejlődésnek indult légvédelem nem veszélyeztethette tevékenységüket [11, pp. 5–52].

2.2. A repülőbázisokkal szembeni fenyegetések a második világháborúban

Az első világháborút követően a fejlesztések lelassultak, bár nem álltak le. A támadóeszközök mellett a védelem módszerei is fejlődtek, megjelentek a korai előjelző rendszerek, a rádiólokáció, az aktív és passzív védelmet szolgáló eszközök, amelyek egyúttal hatást gyakoroltak a támadó eszközök fejlődésére is. A második világháborúra a repülőgépek sebessége mintegy négyszeresére nőtt az első világháborúhoz képest, jelentős technikai fejlődés ment végbe, és a légierő-doktrínák, különösen a Luftwaffe által alkalmazott módszerek jelentős veszélyt jelentettek az ellenséges légi bázisokra. 1939-ben a háború elején a német taktika és stratégia olyan hatásosnak bizonyult, hogy szinte ellenállás nélkül vették birtokba a lengyel, holland és belga légi bázisokat és légteret, és folytatták tevékenységüket Franciaországban. Az afrikai hadszíntéren a légi támadások mellett jelentős földi fenyegetéssel kellett számolni, ugyanis a tengelyhatalmak[2] észak-afrikai légi bázisai rendszeres zaklatásnak voltak kitéve a Szövetségesek különleges erői által. Az SAS[3] brit különleges erők legalább 367 repülőgépet semmisítettek meg bevetéseik során. A repülőtér-támadások céljaiban is változások következtek be, már nem kizárólag a repülőtechnika, illetve a felszállópálya rongálása, elpusztítása volt

[2] Tengelyhatalmak: A második világháborúban a németek által vezetett szövetségi rendszerhez és a hozzá tartozó tagállamok elnevezése.

[3] SAS: A Special Air Service szavakból alkotott mozaikszó, a brit haderő legnagyobb különleges alakulata.

a cél, rájöttek arra, hogy a javítóeszközök, tartalékalkatrészek, üzemanyag, lőszer pusztítása is olyan képességcsökkenést okoz, ami az ellenséges műveleteket veszélyeztetheti [11, pp. 53–264], [12, pp. 3–67].

2.3. A második világháborút követő időszak fenyegetései

A második világháború lezárását követően a kétpólusú világrend erősödésével megkezdődött a két szemben álló világnézet egymásnak feszülése a délkelet-ázsiai területeken, ahol az ötvenes években a koreai válságon, a hatvanas években pedig a vietnámi háborún keresztül igyekeztek hirdetni dominanciájukat. A fegyverkezésben is elsősorban a két szuperhatalom, az USA és a Szovjetunió segítette őket, ami lehetővé tette a fejlett technika tesztelését. Ebben az időben már hatékonyan alkalmazták a sugárhajtású repülőgépeket, amelyek irányíthatósága is egyre javult, és megjelentek a fedélzeti radarok, illetve a radarirányítású légiharc-rakéták, amelyek egyre nagyobb távolságban biztosították a légi harc feltételeit. A technikai fejlődés és a sebesség folyamatos növekedése pedig tovább fokozta a repülőgépek repülőbázisokkal szembeni veszélyességét. Miután a Szovjetunió 1960-ban lelőtt egy amerikai kémrepülőgépet, jelentős forrásokat fordítottak a dróntechnológia fejlesztésére. A hatvanas évek végére az amerikai kormány már jószerével egész Vietnám területén használt dróntechnológiát felderítési céllal. Vietnámban több földi támadást regisztráltak légi bázisok ellen, mint bármely más konfliktusban. A Vietkong[4] és az Észak Vietnámi Hadsereg 1964 és 1973 között 4753 alkalommal támadott meg dél-vietnámi légi bázisokat. Ezek a támadások több, mint 1000 repülőgépet rongáltak vagy semmisítettek meg [11, pp. 265–299], [13], [14].

2.4. Légi bázisokkal szembeni támadások az 1991-es öbölháborúban

A hadviselés újabb fordulóponthoz érkezett az 1991-es öbölháború idején. Az infokommunikációs technológiák exponenciális fejlődése és az információs hálózatok hadviselésben betöltött szerepe ekkorra érte el azt a szintet, amelynek korlátozása biztosíthatta az információs fölényt és ez által a háború kedvező kimenetelét. A gondosan megtervezett műveletek első fázisában légi csapásokat intéztek a kritikus jelentőségű célok, köztük a repülőbázisok ellen. A vasbeton fedezékekben elhelyezett repülőgépeket a kifejezetten ehhez a művelethez tervezett bombákkal semmisítették meg. A háborúban jelentős szerep jutott a robotrepülőgépeknek is, amelyek nagy távolságból indítva, a globális helymeghatározó rendszereknek köszönhetően nagy pontosságú fegyverként látták el feladatukat [15].

2.5. Napjaink repülőbázisokat érintő fenyegetései

Az 1991-es öbölháború óta eltelt 30 évben számtalan konfliktus történt a világban, amelyekben a repülőbázisok továbbra is a kiemelt célok között szerepelnek. Ilyen volt például

[4] Vietkong: Nemzeti Front Dél-Vietnám Felszabadításáért. A vietnámi háborúban a legfontosabb ellenálló szervezet, amely az Egyesült Államok által támogatott Vietnámi Köztársaság ellen harcolt.

1999-ben az Észak-atlanti Szerződés Szervezete (NATO) Szerbia elleni művelete, ahol első alkalommal használtak nagy mennyiségben GPS-irányítású rakétákat. Szintén ide sorolhatjuk a jelenleg is zajló orosz–ukrán háborút, illetve az azt megelőző krími háborút, ami ugyancsak igazolja a repülőbázisok jelentőségét. Ahogy az Simon Shuster cikkében is olvasható a belbeki légi támaszpont stratégiai fontosságához mérten az egyik első célja volt a Krím félszigetet elfoglaló orosz erőknek, és ez megismétlődött 2022. február 24-én, amikor a háború első napján az oroszok működésképtelenné tettek 11 ukrán repülőbázist [16, pp. 52–61, 95–125], [17], [18].

A korábban alkalmazott repülőgépekkel elkövetett légibázis-támadások mellett ma már hatékonyan alkalmazhatók a GPS-irányítású rakéták, a ballisztikus rakéták, robotrepülőgépek és a hiperszonikus rakéták is, amelyek mind különböző pályakarakterisztikával és speciális megoldásokkal igyekeznek elkerülni a védő oldalon megjelenő elhárítási módszereket. Ezek a fegyverek sok esetben olyan hatótávolsággal rendelkeznek, amellyel a világ legtávolabbi pontja is elérhető, így az agresszortól való távolság már önmagában nem jelenthet védelmet. A forradalmi technológiák ugyancsak jelentős hatást gyakorolnak a repülőbázisok biztonságára. A drónok már a közelmúltban is előidéztek veszélyes helyzeteket, amikor 2018-ban a Gatwick, vagy 2019-ben a Liszt Ferenc repülőtéren okoztak fennakadást. Ez könnyen megtörténhet egy repülőbázissal is, ahogy 2018-ban meg is történt egy szíriai orosz légi bázison, amelyet drónokkal támadtak. Az oroszok akkor 7 UAV-t a légvédelmi rendszerükkel semmisítettek meg, míg a fennmaradó 6 eszközt az elektronikai hadviselés módszereivel kényszerítették leszállásra. Ezt tovább gondolva könnyen beláthatjuk, hogy a megjelenő autonóm eszközök, robotok és a mesterséges intelligenciával támogatott eszközök is könnyen felhasználhatók lesznek a stratégiai jelentőségű objektumok támadására, akár mint támadó, akár mint támogató eszközök. Ahogy megfigyelhettük, a történelem folyamán több konfliktus során megjelentek a repülőbázisokkal szembeni földi fenyegetések, amelyeket elsősorban a különleges erők követtek el, és ami leginkább a második világháborús afrikai hadszíntérre és a vietnámi háborúra volt jellemző. Ezek a fenyegetések ugyanakkor nem korlátozódnak a különleges erőkre, a károkozás szempontjából releváns lehet a terrorista, bűnözői vagy lázadó csoportok megjelenése, de akár a kém- vagy insider[5] tevékenység is. A földi támadások olyan fontos alternatívát jelentenek a légi támadások mellett, amelyek az aszimmetrikus és a hibrid hadviselés során is kiegészíthetik vagy megelőzhetik a hagyományos műveleteket, és a precízebb célkiválasztás lehetőségével akár tartósabb eredmény elérésére is képesek [16, pp. 225–270], [19, pp. 27–37].

A repülőbázisokkal szembeni első támadások az első világháború első napjaira vezethetők vissza. Ebben az időben még meglehetősen kezdetleges módszerekkel, kézigránátokkal és Molotov-koktélokkal igyekeztek eltalálni a célokat, inkább kevesebb, mint több sikerrel. A fejlődés eredményeként a háború végére már eredményes bombázásokat is képesek voltak végrehajtani. A légierő-teoretikusok munkájának eredményeként egyre inkább kiemelt szerepet kaptak a repülőbázisok. Felismerték, hogy a repülőgépek elpusztítása és a légi fölény kivívása legkedvezőbben a repülőgépek földi bázisainak pusztításán keresztül valósítható meg. A második világháborúban ezzel összhangban alkalmazott német stratégia és taktika kezdetben olyan sikeres volt, hogy a szövetségesek csak hosszú idő elteltével tudtak alkalmazkodni hozzá. Az afrikai hadszíntéren már ekkor megjelentek a repülőbázisok elleni földi támadások, amelyek

[5] Insider: a szó jelentése beavatott. Belső alkalmazott vagy bizonyos jogosultságokkal rendelkező személy.

igazán a vietnámi háború során csúcsosodtak ki. A technikai újítások mind a támadó, mind a védő oldalon ösztönzőleg hatottak egymás fejlődésére, és olyan eszközöket és eljárásokat alakítottak ki, amelyek a támadások egyre szofisztikáltabb kivitelezésében öltenek testet.

3. Repülőbázisok védelme

Az első légvédelmi lövés története korábbra nyúlik vissza, mint maguknak a repülőbázisoknak a története. „1794. június 2-án a Maubeuge erődből felemelkedett az Entreprenant, rajta a léggömbszázad parancsnokával, Jean Marie Joseph Coutelle-el[6] és Dubois tábornok segédtisztjével." Az erőd alatt állomásozó osztrák csapatokat báró Schröder osztrák tábornagy vezette, aki egyből felismerte a szerkezet célját. Az Aerostatiers léggömbszázad június 21-én már a 13. bevetését teljesítette, „amikor az osztrákok ágyúval célzott lövést adtak le a ballonra. Ez volt valószínűleg a történelem első légelhárító lövése" [6].

3.1. A védelem kialakulása az első világháborúban

A repülőterek védelmére irányuló erőfeszítések az első világháború első hónapjaira nyúlnak vissza, amikor a szemben álló felek felismerve a légi bázisokat fenyegető veszélyeket aktív és passzív védelmi módszereket vezettek be a repülőterek védelme érdekében. Az aktív védelem terén a géppuskákat és ágyúkat használták fel, míg a passzív védelmi módszerek közül az álcázás, elrejtés, szétszóródás, illetve a megtévesztés rendszabályait alkalmazták. Természetesen már ekkor is szükség lehetett a felszállópálya támadás utáni helyreállítására, ez azonban ebben az időben a terep kézi eszközökkel való kisimítását jelentette. Az első dokumentált, repülőgéppel elkövetett támadásra 1914. október 8-án került sor, amikor egy brit repülőgép megtámadta a düsseldorfi Zeppelin-bázist. A repülőgép sikeresen teljesítette feladatát, bár a német védők géppuskatüze eltalálta, aminek következtében a német vonalak mögött kellett kényszerleszállást végrehajtania [20, pp. 5].

3.2. Repülőbázis-védelem a második világháborúban

A repülőbázisok földi védelme egészen a második világháborúig megmaradt a maga kezdetleges állapotában, amikor Németország új villámháborús startégiája addig nem látott nehézségek elé állította a szövetségeseket. A tüzérség, a légierő és a deszantos erők összehangolt alkalmazásával a repülőterek elfoglalásával és a légi fölény biztosításával gyors eredményeket produkálva árasztották el Lengyelországot, Franciaországot, Norvégiát, Dániát, Belgiumot és Hollandiát. Az egyetlen ország, amely mérsékeltebb veszteségeket szenvedett el a földön tartózkodó repülőgépekben, az Lengyelország volt, mert ők ekkor már alkalmazták a korábbi védelmi eljárásokat, és szétszórták repülőgépeiket. Churchill, látva az eseményeket utasítást adott a légi bázisok védelmének megszervezésére. A légvédelem részeként ebben az időben indult meg a korai előjelző rendszerek fejlesztése. Bár a rádiólokátorokkal kapcsolatos

[6] Jean Marie Joseph Coutelle (1748–1835) francia mérnök, tudós és a légballonok alkalmazásának úttörője.

kutatások már az 1930-as években megkezdődtek, a technológia kiforratlansága a háború kezdetén sok nehézséget okozott a hatékony üzemeltetésben, ugyanakkor nagy jelentősége volt az érzékelés gépesítésében. Fejlődött a légvédelmi tüzérség eszközkészlete és eljárásai, és megtörtént a légvédelmi hálózatok kialakítása, amelybe keresőlámpás egységeket, radaregységeket és elfogó repülőgépeket integráltak a zárt, teljes körű, folytonos védelem kialakítása céljából. A váratlan támadások hatékonyságának csökkentése érdekében külön légvédelmi alegységek biztosították a repülőbázisok védelmét. A vadászrepülőgépek pedig a levegőben biztosították a járőrözést, és adott esetben a repülőbázis védelmét. Churchill utasítására megemelték a repülőbázisok létszámát, és a teljes állományt kiképezték, hogy képes legyen a légi bázis külső és belső védelmének ellátására, illetve megalakították a földi védelemre szakosodott földi védelmi zászlóaljakat is. A passzív védelmi módszerek közül fontos szerep hárult a három oldalról védett repülőgép-beállókra, az álcázás különböző módszereire, a megtévesztésre és a szétszóródásra. Amikor a szövetségesek megkezdték az elvesztett területek visszaszerzését, sok esetben rombolt repülőtereket foglaltak vissza, ami a műszaki katonák repülőtér-helyreállítási munkáját igényelte, és jelentős harcászati előrelépést eredményezett ezen a területen [2], [20, pp. 1–26], [21, pp. 39–64].

3.3. A védelem változása a második világháború után

A hidegháború időszakában kialakuló konfliktusokban eltérő prioritási szinten kezelték a repülőbázisok biztonságát. A koreai háborúban az Egyesült Nemzetek Szervezete (ENSz-) erők földi védelme igen alacsony szinten állt, és meglepő ugyan, de ezt a szemben álló fél nem használta ki a háború három éve alatt. Ezzel szemben a vietnámi háborúban a légi bázisok komoly földi támadásoknak voltak kitéve. 1961 és 1973 között legalább 475 alkalommal támadtak meg szövetséges légi bázisokat, amit nagymértékben tovább rontottak a passzív és aktív védelmi intézkedések jelentős hiányosságai. A repülőbázisok védelmét 1965-ig a helyi erőkre bízták, ezt követően, a támadások száma és eredményessége növekedésének hatására a feladatot az amerikai erők vették át. William Westmoreland tábornok[7] utasítására megkezdődött a földi védelem rendszerének kialakítása. Az USA által kialakított földi védelmi doktrína a századszintű támadástól fölfelé megosztott területvédelmet írt elő, ahol a légierő felelt a repülőbázis belső, míg a szárazföldi erők a külső védelméért. A földi védelmi erőket a gyors manőverezőképesség érdekében járművekkel jól felszerelték, és nagyszámú fejlett technikai eszközzel látták el annak érdekében, hogy egy nagyobb számú, a meglepetés előnyével felvértezett ellenséggel szemben fel tudják venni a harcot. A feladat speciális jellege miatt a nyolcvanas években külön képzést vezettek be a légi bázisok földi védelmi személyzete részére, ami segített a légibázis-specifikus védelmi eljárások elsajátításában és továbbfejlesztésében [2].

[7] William Childs Westmoreland amerikai tábornok, a vietnámi háború első felében a Vietnámban állomásozó amerikai csapatok főparancsnoka.

3.4. A hidegháború és a modern kor repülőbázis-védelme

A hidegháború éveiben a két szemben álló érdekszféra egyaránt légvédelmet telepített a légi bázisok köré a védelem és határaik mentén a területvédelem megvalósítására. A folyamatos vélt fenyegetés a védelem megtartására és fejlesztésére ösztönözték. Ennek jegyében mindkét oldalon átgondolt, komplex védelem alakulhatott ki a korábbi háborúk tapasztalataira alapozva. Aktív földi védelmet és légvédelmet tartottak fent, és folyamatos légi járőrök biztosították a határok védelmét. A technika fejlődésének köszönhetően megjelentek és egyre modernebbekké váltak a fedélzeti radarok, megjelentek a levegő-levegő rakéták, a radarirányítású rakéták, amelyek jelentős képességnövekedéshez vezettek. A földi védelem megvalósítására nagy létszámú védő erőt tartottak fenn, és felkészültek a potenciális rombolt repülőterek helyreállítására. A passzív védelem esetében a különböző bombák és rakéták pontosságának javulásával a védelem módszereit is fejleszteni kellett, amire megoldásként mutatkozott a megerősített vasbeton lefedések építése, továbbra is alkalmazták a megtévesztő és tartalék repülőtereket, a szétszórás módszerét, az álcázást és a műszaki megerősítést. Bár a védelmi technológiák jelentősen fejlődtek, az alapvető légibázis-védelmi koncepciók nagyrészt változatlanok maradtak [20, pp. 71–96].

Természetesen a repülőbázisok védelme egy sokkal összetettebb rendszer, ami a katonai repülés kezdetei óta fejlődik, és amelybe folyamatosan beépülnek a leghatékonyabb eszközök és eljárások. A mai fejlett repülőbázis-védelem több védelmi alrendszerből épül fel, amelyek együttesen, egymást kiegészítve látják el feladatukat, és komplex rendszerként értelmezve képesek elérni a legkedvezőbb működési körülményeket.

A repülőbázis védelem fő területei:

- passzív védelem:
  - műszaki és telepítési biztonság;
  - mechanikai védelem;
  - elektronikai védelem;
- aktív védelem:
  - légvédelem;
  - földi védelem;
  - repülőtér-helyreállítás [2], [22, pp. 35–47].

Az első légvédelmi lövés 1794-ben történt, bár ez még nem egy repülőbázis védelmében. Az első világháborúban már megjelentek a repülőbázisok elleni támadások, amelyekkel szemben ki kellett alakítani a védelmi eljárásokat. Ebben az időben fektették le a repülőbázisok aktív és passzív védelmének alapjait. A második világháború technikai fejlesztései és elsősorban a radar megalkotása nagyban hozzájárult a védelmi képességek javításához, és ugyancsak nagy jelentősége volt a légvédelmi tüzérség felállításának és a repülőterek védelmében való alkalmazásának. A passzív védelem elvei is fejlődtek, különösen a rombolt repülőterek helyreállítása, valamint a repülőgépek szétszóródása, ami nagy szerepet játszott a lengyel repülőgépek megóvásában. A második világháború afrikai hadszínterén, illetve a vietnámi háborúban olyan hangsúlyosan jelentek meg a repülőbázisokkal szembeni földi támadások, hogy ezek rávilágítottak a földi védelem nélkülözhetetlenségére. Napjainkban a védelmi rendszerek igyekeznek teljes körű, zárt, folytonos védelmet kialakítani, amelyben egyre nagyobb szerep jut a szenzoros érzékelésnek, a döntést támogató rendszereknek és a beavatkozó oldal gépesítésének.

4. Összegzés

A kétpólusú világrend felbomlásával azt gondoltuk, hogy minden veszély elmúlt, aminek hatására a védelempolitika súlypontjai megváltoztak. A honvédelem kérdése háttérbe szorult, és elmaradtak a fejlesztések mind a technikai, a szervezeti, mind a módszerek tekintetében, ami a képességek súlyos avulásához vezetett. A 2000-es évek, és főleg annak második évtizedének romló biztonsági világképe jelentette a fordulópontot, amely az igényt generálta a nemzetek és szövetségek védelmi rendszereinek fejlesztésére, aminek keretében a Magyar Honvédség is fejlett technikai eszközök beszerzését irányozta elő. Az új technikai eszközök természetesen maguk után vonják az infrastruktúra, a karbantartás és javítás rendszerének, a szervezet felépítésének és az alkalmazott eljárások, elméletek rendszerének fejlesztését, a képzések rendszerének átalakítását is, amelyek remélhetőleg gazdasági és szakmai szempontból is elvezetnek a racionális működés megvalósításához.

Visszatekintve a katonai repülés és a repülőbázisok történetére láthatjuk, hogy jelentőségük a kezdeti felívelést követően nem változott szignifikánsan, és napjaink konfliktusaiban is az elsődleges célok között szerepelnek. A hibrid hadviselés komplex módon értelmezi a műveleti területet, és módszerei között jelentős szerep jut a „fegyver nélkül vívott háborúnak", a befolyásolásnak. Ennek ellenére a területi igények megjelenésénél nem lehet elvonatkoztatni a légi fölény szükségességétől, amelyhez a légi bázisok és légtér uralásán keresztül vezet az út. Tehát megállapíthatjuk, hogy a repülőbázisok célértéke nem csökkent az idő múlásával.

A történelmi példák megmutatták, hogy a repülőbázisokkal szembeni kezdeti fenyegetések a levegőből érkeztek kezdetleges módszerekkel végrehajtott, repülőgépekkel elkövetett támadások formájában. A légi támadások módszerei, csakúgy, mint a repülőgépek képességei, egyre jobban fejlődtek, ami lehetővé tette a légi támadások egyre precízebb megvalósítását. A légi támadások mellett a különböző konfliktusokban megjelentek a földi fenyegetések is, amelyben a rakéta- és tüzéregységek, a különleges erők, deszantos és gerillaegységek tevékenysége volt a leginkább jellemző. Viszont nem szabad megfeledkeznünk a kémtevékenységről, szabotázsról, az insider jelenségről és a terrorizmusról sem, amikor egy repülőbázis védelmét kívánjuk felépíteni. A forradalmi technológiák, a mesterséges intelligencia, az autonóm eszközök, a döntéstámogató rendszerek, az UAS-ek, a szenzorhálózatok, az IoT[8]- és IoMT[9]-eszközök, az infokommunikációs hálózatok olyan új lehetőségeket teremtenek, amelyekkel szemben a repülőbázisok szinte teljesen védtelenek, és amelyekkel szemben meg kell találnunk a hatékony védelem lehetőségeit.

Megvizsgálva a modern kor technikai képességeit, megállapíthatjuk, hogy exponenciális fejlődés ment végbe. Azonban ez a fejlődés nem egyoldalú. A támadó és védelmi oldal egymással párhuzamosan válik egyre korszerűbbé. Ahogy megjelent a repülőbázissal szembeni légi támadás, ezzel egy időben megszületett a légvédelem is, azért, hogy biztosítsa annak védelmét. A korábbi tapasztalatokra alapozva szükség lesz a NATO-képességekhez igazodva a hazai repülőbázisokkal kapcsolatos védelmi stratégia átgondolására, és az új koncepció fényében a repülőbázisok jelenlegi védelmi képességeinek átvilágítására és a jövőben megvalósítandó képességek meghatározására. Ahogy a nagy háborúkban és a hidegháborúban is összefogtak a szövetségesek, úgy fontos lenne, hogy ez napjainkban is megtörténjen, ugyanis egy-egy

[8] IoT: Internet of Things.
[9] IoMT: Internet of Military Things.

állam a maga korlátozott képességeit akár a védelem, akár a támadás, akár az elrettentés, de még a képzés terén is kevésbé hatékonyan és rendkívül gazdaságtalanul tudja megvalósítani, azzal szemben mintha ezt egy közösségi stratégia keretén belül tenné meg.

Irodalomjegyzék

[1] Krajnc Z., „A légierő képesség alapú közelítése, mint a parancsnokképzés egyik alap kognitív kompetenciája," in *A katonai vezetői-parancsnoki (harcászati vezetői) kompetenciák fejlesztésének lehetséges stratégiája,* Krajnc Z., szerk., Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2014. pp. 163–174.

[2] Bingham, P. T., "The Air Base: The Air Force's Achilles' Heel?" *Air and Space Forces Magazine,* 2020. október 1. Online: www.airforcemag.com/article/the-air-base-the-air-forces-achilles-heel/

[3] Purser, W., *Air Base Ground Defense: An Historical Perspective and Vision for the 1990's.* Alabama, Air War College, Maxwell Air Force Base, 1989.

[4] Krajnc Z. főszerk., *Hadtudományi lexikon.* Budapest, Dialóg Campus, 2019.

[5] Szabó S., Tóth R., „Repülőterek kialakítása, létesítményeinek kritikus elemei, védelmük lehetséges műszaki megoldásai," *Repüléstudományi Közlemények,* 2013. 25. évf. 2. sz. pp. 89–113. Online: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2013_cikkek/2013-2-07-Szabo_Sandor-Toth_Rudolf.pdf

[6] Szelek szárnyán: A katonai léggömbök rövid története. *Blog.hu,* 2013. június 15. Online: https://lemil.blog.hu/2013/06/15/szelek_szarnyan-_a_katonai_leggombok_rovid_tortenete

[7] *Hadirepülés az I. világháborúban.* é. n. Online: www.bibl.u-szeged.hu/bibl/mil/ww1/technika/repules/index.html

[8] Caudill, S. W., *Defending Air Bases in an Age of Insurgency.* Alabama,Maxwell Air Force Base, Air University Press, 2014.

[9] Meilinger, P. S., *10 Propositions Regarding Air Power.* Air Power Studies Centre, 1995.

[10] *A repülés története.* Online: https://docplayer.hu/2769711-1-a-repules-tortenete.html

[11] J. Kreis F., *Air Warfare and Air Base Air Defense 1914–1973.* Washington, D. C., Office of Air Force History, 1988. pp. 5–299.

[12] Vick, A., *Snakes in the Eagle's Nest: A History of Ground Attacks on Air Bases.* Santa Monica, RAND, 1995. Online: https://doi.org/10.7249/MR553

[13] Five Generations of Jets. *Fighterworld,* é. n. Online: www.fighterworld.com.au/az-of-fighter-aircraft/five-generations-of-jets

[14] Hebert, A. J., Fighter Generations. *Air & Space Forces Magazine,* 2008. szeptember 1. Online: www.airforcemag.com/article/0908issbf/

[15] Pál P., „A légierő csapásmérő képessége az 1991-es Öböl-háborúban," *Repüléstudományi Közlemények,* 18. évf. ksz. 2006. Online: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2006_cikkek/pal_peter.pdf

[16] Sidoti, S., *Airbase Operability: A Study in Airbase Survivability and Post-Attack Recovery.* Fairbairn, Australia, Aerospace Centre RAAF Base Fairbairn, 2001. pp. 52–61, 95–125, 225–270.

[17] Gazda A., 74 katonai objektum, ezen belül 11 repülőtér megsemmisítését jelentették be az oroszok. *444.hu,* 2022. február 24. Online: https://444.hu/2022/02/24/74-katonai-objektum-ezen-belul-11-repuloter-megsemmisiteset-jelentettek-be-az-oroszok

[18] Shuster S., "The Standoff at Belbek: Inside the First Clash of the Second Crimean War," *Time,* 2014. március 4 Online: https://time.com/12563/belbek-crimea-ukraine-russia/
[19] Krajnc Z., *A légi hadviselés elméletének alapjai.* Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2013.
[20] Vick, A. J. et al., *Air Base Defense. Rethinking Army and Air Force Roles and Functions.* Santa Monica, RAND Corporation, 2020. pp. 1–26, 71–96. Online: https://doi.org/10.7249/RR4368
[21] Vick, A. J., *Air Base Attacks and Defensive Counters: Historical Lessons and Future Challenges.* Santa Monica, RAND Corporation, 2015.
[22] Táborszky J. P., *Az MI alkalmazásának lehetőségei a repülőbázis (repülőtér) védelmében.* 2021.

Changing of Security Challenges on Airbases during History

The development of airports and air bases coincides with the beginning of aviation, even if at the early days they were just makeshift airstrips. Airplanes extend warfare into the third dimension by dominating the airspace, but they are indispensably dependent on the operation of sanctuaries on the ground. The security of the air bases is thus unquestionable, but it is also important to ask how their importance has changed over time, and how the security of these facilities has evolved with advances in technology, abilities and principles.

Keywords: *aviation history, airbase, air base, threats, defence, security*

Táborszky József
tanársegéd
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
taborszky.jozsef.peter@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-2185-426X

József Táborszky
Assistant Lecturer
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
taborszky.jozsef.peter@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-2185-426X

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
34. évfolyam (2022) 3. szám 19–30. • DOI: 10.32560/rk.2022.3.2

Sally Ichou, Árpád Veress

Technology Roadmap for Aircraft Maintenance, Repair and Overhaul

Nowadays, the demand for aircraft Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) is constantly growing. The market size of the European MRO segment is estimated to be USD 206.13 billion in 2022, growing at a Compound Annual Growth Rate (CAGR) of 2.8% between 2022 and 2030 [1]. This forecast is a good indication of the growth in the number of incoming assignments. As a result, airlines and aircraft operators will increasingly rely on companies with experience in the MRO field to perform maintenance and repair work. Furthermore, as many airlines now choose to outsource maintenance and repair, this will further increase the load on MRO companies. As the number of incoming jobs increases, the companies concerned are constantly looking for and implementing new and better methods and technologies, with another aim of gaining a larger market share. Moreover, as there is still scope for the development and introduction of new technologies and processes in this area, a significant number of research and development projects are underway or in the pipeline. Therefore, the main objective of this study is to use the available information to present a generalised technology roadmap for the companies involved in MRO activities and, on this basis, to collect, present and categorise the state-of-the-art developments in the MRO sector, highlighting what the future will hold for companies that incorporate these revolutionary innovations into their daily work processes.

Keywords: *aircraft maintenance, repair and overhaul, strategy and roadmap, research and development activities, categorisation of MRO innovations*

1. Introduction

The act of maintenance is adopted in all industries to reduce the negative impact of failures and increase systems' availability at a minimum cost [2]. In any industrial facility, there are two main pillars: one is production (or operation) and the other is maintenance [3]. Maintenance is not equally relevant as a production process since maintenance is linked with costing money whereas production brings money to the businesses. But this is not accurate in the case of MRO providers because these companies offer their maintenance, repair, and overhaul services as their product, so to assure the flow of aircraft's operation, reliability and airworthiness, these services are needed by the airlines and they even rely on them.

Air transportation, in general, is defined to be continually growing in a competitive environment, despite the negative effect of Covid-19; the International Air Transportation

Association (IATA) forecasts that by the year 2023, the global passenger numbers are expected to exceed the pre-corona levels (105%) [4]. This expected growth in aviation traffic will increase the number of maintenance work packages and activities, so the MRO companies will have to handle more load since many airliners today choose to outsource their maintenance services. Outsourcing aims to reduce labour, training, tools and equipment costs [5]. Furthermore, establishing an MRO inside an airline demands a high capital of investment, which for some companies may not be available [6], and thus by outsourcing the maintenance services, the operators can focus their attention on operations within the scope of their core competencies while knowing that the best technologies and most efficient capabilities are utilised to maintain their fleet.

In addition to the added workload, there is still a high potential for technological development in the field of MRO and innovative processes, that can set an MRO company apart from others in the same region. The more advanced a company is the more it can handle the growing market and better compete with other major MRO facilities or even the manufacturers. By the end of the day, the goal is to ensure that an aircraft, engine, propeller, or any other component remains safe to fly or is used according to rules and regulations that are set by the Federal Aviation Administration (FAA) or the European Union Aviation Safety Agency (EASA).

By integrating these new systematic methodologies into daily workflow operation, the job can be done more effectively and accurately, while minimising the aircraft ground time and the unneeded costs and capacities. So, the focus of this paper will be on highlighting the new roadmap for the MRO companies' developments that are needed to remain in the competition. Additionally, the scientific categorising of these developments is going to take place also in the present work.

2. Developments of aircraft maintenance and repair in terms of aviation history

The aviation industry has come a long way since the Wright Brothers' first airplane invention back in 1903, in less than 120 years noticeable changes took place to further nourish this industry. Aluminium, fiberglass and composite materials [7] replaced wood and fabric, and thus the industry took a step further into establishing the "safety first" system that all people expect from it.

The materials of the airframe structures were not the only change, jet engines replaced propellers and so higher altitudes were reachable. Today research in different aeronautical science has taken place non-stop, many different areas and topics are still being conducted, which include, electrification [8], [9], hybrid aircraft operation [10], noise reduction [11], engine propulsion system [12], development of other engine's component [13] besides many others.

Like other aeronautical research topics, aircraft maintenance experienced similar developments, of course when the Wright brothers invented their first plane, there was no such thing as maintenance. But since then, the term became more and more familiar with time, and now the term relates to aircraft safety, airworthiness status and reliability. Tools and equipment were developed constantly. MRO companies raced to stay in the competition,

sought to obtain the latest technologies, trying to keep their customers satisfied by providing efficient, high-quality and low-cost services.

With every revolutionary innovation and technological achievement, the rates of accidents decreased, and the source cause of errors shifted from being mechanical-based to human-based [14], as indicated in Figure 1. So, gradually the machine became more reliable than humans.

Based on the above, nowadays humans are accountable for most hazards. In order to minimise the risk of human factors and to decrease the frequency of errors, the efforts are headed in the direction of raising safety and efficiency by adopting new methodologies, which can aid in the daily maintenance operation.

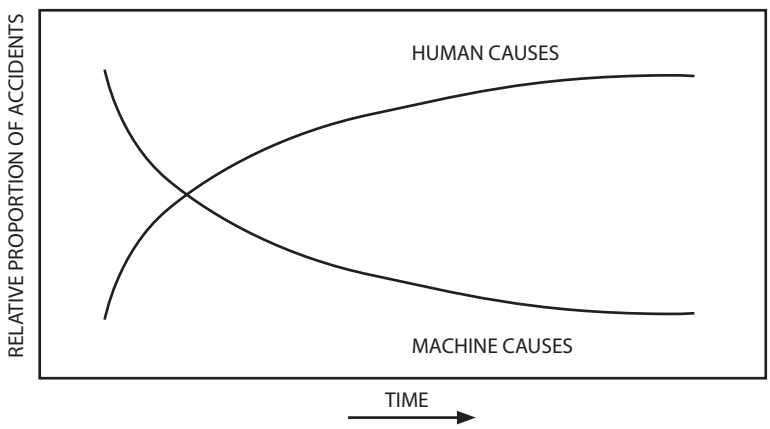


Figure 1.
The cause of aviation accidents/incidents in a function of time [14]

3. Workflow of the MRO service

Every MRO company's job scope is divided into two sections. The first is the technical one and the second is the operational one. Both sections are integrated, and they complete and support each other to a point that one cannot exist without the other.

The flow of work begins when an airline sends a work package to the MRO company to be carried out. Work packages are several maintenance tasks, each task is required to be performed within the pre-set interval or threshold of time by the authorities and manufacturers. These tasks get grouped together by the airline's engineering and planning technical team and then sent off to the selected MRO partner.

After receiving the package, the operational part begins, these tasks get studied thoroughly noting all the requirements needed to accomplish the job at hand, everything is mapped out: the skill required (mechanical, electrical, radio), aircraft zones, the tasks estimated man-hours, preparation time, materials, tools, facilities, qualifications, and when everything is ready and a plan is drawn, people get assigned to the aircraft and this is when the technical part starts while the operational one continues.

Technical means all the required work conducted to execute the tasks and dispatch the aircraft back to its operator. This includes all forms of inspections (structure and/or engines), lubrication of moving parts (with oil or grease), corrosion detection, calibration of equipment, repairing discrepancies (such as dents, scratches, corrosion), operational checks (for computers), functional checks (systems) and so many other jobs to ensure the safety and airworthiness of the aircraft.

Finally, when technical tasks are accomplished including revision, operation processes get involved again. Because every task performed needs to be signed, stamped and archived properly. After that, the completed package is sent off to the operators and the aircraft is certified to be released back into service.

4. Roadmap of MRO activities

As noted, the MRO workflow procedure includes a lot of human interventions on both operational and technical sides, and by looking into the scientific literature that is related to aircraft maintenance, it can be observed that in a similar way to other aviation research topics, the industry is trying to minimise the risk of errors and raise the safety bar even more.

Therefore, developments in both technical and operational sides of MRO are being presented with the integration of technological theories into them such as Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), Internet of Things (IoT), Deep Learning (DL) and many others. Of course, EASA has noticed this shift in interest towards more advancement and in order to govern this swift transition, they regulated it by publishing their first concept on the AI roadmap which is an initial vision of how the future is going to look like for air transport in the next decade [15]. This roadmap includes subjects such as AI trustworthiness, the effect of ML on the aviation industry, the estimated time frame for AI implementation and futuristic challenges.

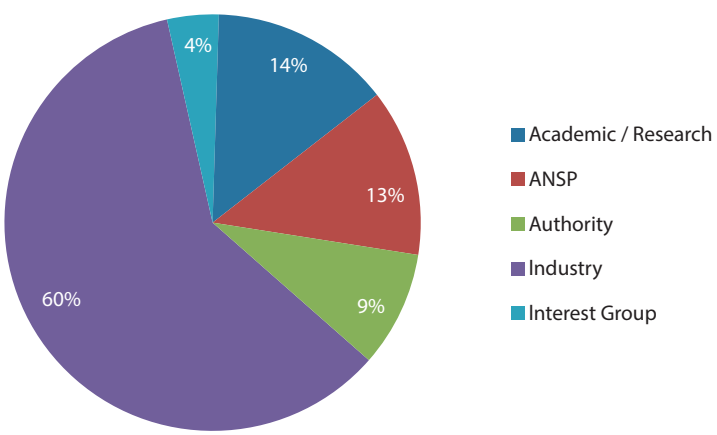


Figure 2.
The result of the EASA consultation phase on the AI roadmap [15]

This approach was offered to be discussed by stakeholders, academic researchers, Air Navigation Service Provider (ANSP) authorities and finally, the industry. The feedback was positive, the industry commented the most on this approach as illustrated in Figure 2, which means people in charge know the importance of these new methodologies [15].

It is known that maintenance goes hand in hand with aircraft technology, thus one cannot draw a good maintenance roadmap without taking into consideration aircraft manufacturing development and new configurations. So, maintenance evolves with aircraft technology.

With the start of aviation, the maintenance culture was very shallow, and some can even say that it was "non-existing", there were few sensors on the aircraft and so there was a low amount of data and information availability. Efforts were concentrated mostly on aircraft development and maintenance was neglected.

With time and digitalisation progress, more sensors were mounted to the aircraft structure and airframe leading to a higher amount of data that can be utilised to build Knowledge-Based Maintenance (KBM) [16]. Descriptive maintenance was first explored, it answers the question of "what happened?" by taking information from previous maintenance activities [16].

At present and with the increased amount of data available from history, diagnostic maintenance is being more used by analysing the data available and so answering the question of "why did something happen?". However, maintenance today is more costly than other services such as fuel for example plus human-based errors still may happen. Technological theories including robotics and the development of ML and AI algorithms are researched more often creating some scattered innovations, but these innovations are still not exactly common with MRO providers.

For the next decade, due to the required greener and more environmentally friendly load on the atmosphere, the developments are turning to low-emission and hybrid-powered aircraft. The maintenance cost will decrease at the integration of conventional and electric-based propulsion systems as the operational time over the certain duration will be less, and so the intervals between checks could be increased. The MRO-related culture is expected to get higher attention; it becomes even more demanding and uniform, meanwhile, the safety levels will be higher. The digitalisation of the processes and automation will spread more, which improves the working conditions (open office, home office), communication, transparency and sustainability as it results in less paper consumption. Furthermore, it reduces the errors by human factors further, workload for handling/transferring work packages, places for storage and can optimise the plan for budget, capacity, facility, inventory, tools and backlog with priority. The predictive maintenance – supported by digital twin applications – will replace previous diagnostic-based maintenance, and so the question "what will happen and when?" will be possible to answer by learning from the previous and predicted data. Furthermore, robots and drones, virtual and augmented maintenance, additive manufacturing, and new repairing technology development will be strongly presented under the supervision of humans, after being researched for so long, which will help also in minimising human-based errors.

As for the medium and long-term future, it is predicted that the industry will make a full transition to fully environmentally friendly and emission-free aircraft. This change is going to be challenging for MRO companies. For fully electric airplanes and with the use of batteries, condition monitoring, and further maintenance concepts are needed to prevent issues such as a thermal runaway. If the hydrogen driven aircraft are invented and spread, then this means

that maintenance activities will be as equally demanding as engines of today. Of course, new staff training and qualification requirements will be needed.

Finally, wider use of technological theories will be invested and more sophisticated algorithms will be available, perspective maintenance will take place allowing us to answer "how can we make something happen" or how to control the appearance of a certain event [16] and so almost eliminating human-based errors. The technical roadmap of MRO activities for the aeronautical sector is shown in Figure 3. Basically, this roadmap identifies the vision or statement in which several steps or milestones can be defined. There might be also various items within each step, then year by year and according to business value items get selected from this roadmap to be considered, and only when the Return of Invest (ROI) is reasonably high enough to be accepted then these items can be analysed and developed. This is shown by the various research conducted in this field. Every year companies and scientists update and take items from the roadmap to realise and develop them. The amount of work and research taking place in the maintenance sector proves that there is still a high potential for more process and technology development in this field.

5. Categorisation of MRO projects

By looking into the numerous research activity from the scientific world and in order to create some sort of guidelines for the countless articles and papers in this field, it was noticed that there were some similar traits between all of the published work in this area. Thus, a categorising of these topics was done, and it was concluded that only three main categories can integrate the majority of activities as follows.

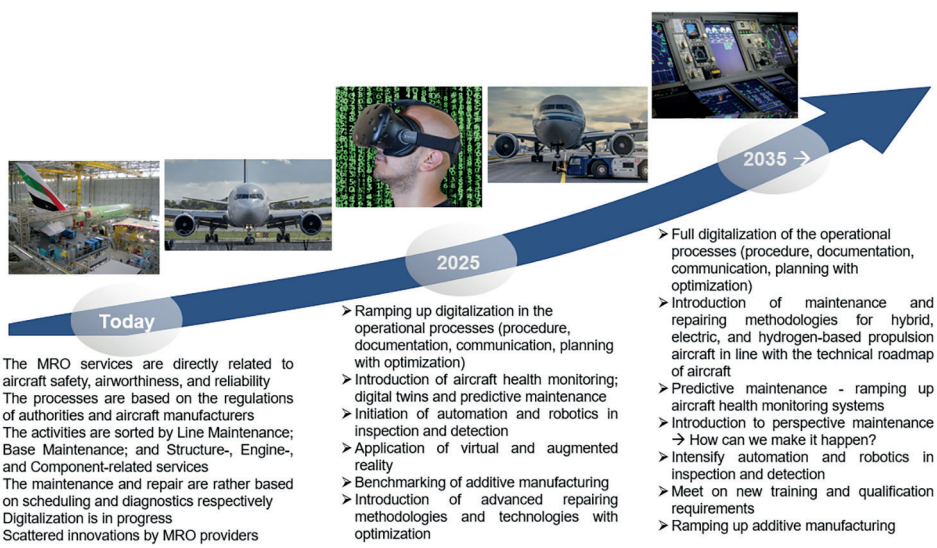


Figure 3.
Technical roadmap of MRO activities in the aeronautical sector (compiled by the authors)

5.1. Category 1: Development of the operational process

This category includes all the topics that relate to developing and optimising the daily operation workflow. For example, maintenance capacity planning and scheduling [17], [18], optimising MRO activities and sustainability through digitalisation [19], [20], innovation of education and aircraft maintenance training by using metaverses and Mixed Reality (MR) [21], [22], applying Lean principles and digital solutions for archiving the maintenance documents [23], and even the introduction of Augmented Reality (AR) technology in the development process of aircraft maintenance manuals [24].

From training to manuals and maintenance planning, these articles cover the submergence of technological theories into the operational side of the MRO processes. At the moment and since AI is still in its initial stages, it will only be used to aid and support companies in making better-calculated decisions under humans' supervision. However, when the AI algorithms reach a sophisticated level, no human interference will be necessary, so people can focus on more important tasks according to the EASA roadmap [15].

5.2. Category 2: Technology development for inspection and detection

Inspection is important for discrepancy detection. Aircraft are examined regularly during maintenance checks, either outside on an airport aircraft yard between flights, or in a hangar for longer-term inspections or heavy maintenance. Some inspections are part of the Maintenance Program Document (MPD) and are defined as routine or scheduled inspections. Others are non-routine inspections and occur after an unscheduled event like Foreign Object Damage (FOD) or corrosion detection.

Usually, the tools used to inspect either the airframe or engines are still highly dependent on humans. Mirrors and torch lights or even borescopes are famous for Visual Inspection (VI), and Detailed Inspection (DI), but the chance of a mistake while using these tools is quite high. Light reflection, eyesight issues, or even the mental state of the inspection mechanic play a great role in the accuracy of these checks. As a result, lots of research were conducted to develop the tools for inspection and detection with the help of technological theories listed above such as AI and ML, so the second category is dedicated to all the activity within the innovation of new inspection equipment.

For example, some researchers proposed utilising robots to aid in walk-around checks and pre-flight inspections [25] or performing airframe inspections as a collaboration between robots and mechanics [26]. Others introduced the Unmanned Aerial Vehicles (UAV) enhanced with image processing to monitor the airframe condition [27], or using AI to better detect fuselage corrosion [28], or even inventing a robot to do fuel tanks inspections [29].

5.3. Category 3: Process development in maintenance, repair and overhaul

The last category integrates the process of repair and maintenance. In this final branch, the researchers benefited from the big data to establish a firm base to transition from proactive to predictive maintenance, thus eliminating any unscheduled and sudden aircraft stops.

Models for predicting tires replacement were introduced by [30] and [31]. Structural health management was proposed by [32], defect prediction by means of digital twins was investigated by [33], troubleshooting was studied by [34], neural networks together with AI and ML were used by [35] and [36] to forecast lumpy demand.

In addition to predictive maintenance, this category also contains the new repairing methodologies and techniques, which include, besides many others integrating sensors in a repair patch to reduce crack growth but at the same time monitor the fatigue status [37].

6. Conclusion

Maintenance contributes significantly to aircraft operating expenses, flight delays and cancellations. Despite longer-lasting planes and more robust power plants, airlines now spend more money and time on maintenance than they do on fuel or staff. A big challenge is the ability to maintain fleets with high accuracy standards while decreasing MRO costs. Thus, there is a need for faster troubleshooting, automated aircraft inspection, improved planning and optimising processes. These needs are priorities for most aviation operators.

Since the aviation industry is a fast-growing business, the MRO providers have to adjust and comply with the requests of their customers to stay relevant and in the competition, this is why they responded by adopting new technologies, techniques and methodologies.

The academic world responded by drowning the market with all the developments needed to aid the MRO companies in handling the added load, and three categories were noticed that combine all the efforts conducted. These categories are shown in Figure 4.

These categories not only include all the scientific research but, in a way, they summarise all the aircraft maintenance work conducted inside this business environment.

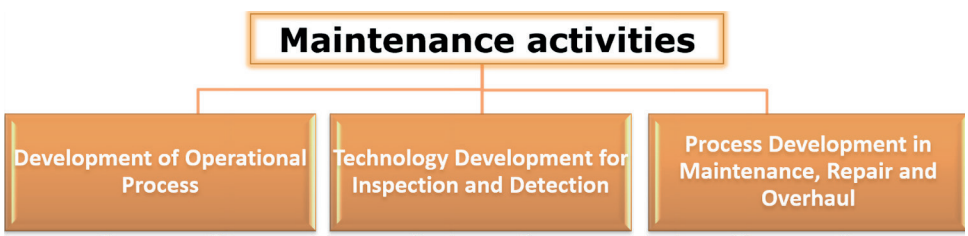


Figure 4.
Aircraft maintenance work categories (compiled by the authors)

Many advantages are expected from such innovations in both operational and technical such as the ability to map out short-term and long-term planning including manpower, facilities and tooling, plus the industry can raise the quality of the work conducted while decreasing the human-based errors.

If the research in the MRO field continued at the same pace as it is now moving, the future can be easily forecasted, we are heading towards more automation, more AI and more machines rather than human reliance in a way that fits with the EASA initial roadmap.

References

[1] Market Analysis Report, *Europe MRO Distribution Market Report, 2022–2030.* Online: www.grandviewresearch.com/industry-analysis/europe-maintenance-repair-overhaul-mro-distribution-market

[2] H. Löfsten, 'Measuring Maintenance Performance – In Search for a Maintenance Productivity Index'. *International Journal of Production Economics,* Vol. 63, no 1. pp. 47–58. 2000. Online: https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00245-X

[3] W. Jacobyansky, *Maintenance vs. Production: How to Mend the Relationship.* Online: www.reliableplant.com/Read/31692/maintenance-production-relationship

[4] B. Pearce, IATA Forecasts Solid Long-term Aviation Recovery; Urges Digitisation of Passenger Processing'. *The Moodie Davitt Report,* 27 May 2021. Online: www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/an-almost-full-recovery-of-air-travel-in-prospect/

[5] C. G. Drury, K. P. Guy and C. A. Wenner, 'Outsourcing Aviation Maintenance: Human Factors Implications, Specifically for Communications'. *The International Journal of Aviation Psychology,* Vol. 20, no 2. pp. 124–143. 2010. Online: https://doi.org/10.1080/10508411003617771

[6] H. Al-kaabi, A. Potter and M. Naim, 'An Outsourcing Decision Model for Airlines' MRO Activities'. *Journal of Quality in Maintenance Engineering,* Vol. 13, no 3. pp. 217–227. 2007. Online: https://doi.org/10.1108/13552510710780258

[7] M. Norkhairunnisa, T. Chai Hua, S. M. Sapuan and R. A. Ilyas, 'Evolution of Aerospace Composite Materials'. In *Advanced Composites in Aerospace Engineering Applications,* M. Norkhairunnisa, S. M. Sapuan and R. A. Ilyas, eds. Cham, Springer. pp. 367–385. 2022. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-030-88192-4

[8] D. Sziroczak, I. Jankovics, I. Gal and D. Rohacs, 'Conceptual Design of Small Aircraft with Hybrid-electric Propulsion Systems', *Energy,* Vol. 204, no 2. 2020. Online: https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117937

[9] J. Rohacs and D. Rohacs, 'Energy Coefficients for Comparison of Aircraft Supported by Different Propulsion Systems'. *Energy,* Vol. 191, no 3. 2020. Online: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116391

[10] J. Rohacs, U. Kale and D. Rohacs, 'Radically New Solutions for Reducing the Energy Use by Future Aircraft and their Operations'. *Energy,* Vol. 239. 2022. Online: https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122420

[11] J. Bera and L. Pokorádi, 'Monte-Carlo Simulation of Helicopter Noise'. *Acta Polytechnica Hungarica,* Vol. 12, no 2. pp. 21–32. 2015. Online: https://doi.org/10.12700/APH.12.2.2015.2.2

[12] K. Beneda, 'Investigation of Novel Thrust Parameters to Variable Geometry Turbojet Engines', in *2021 IEEE 19th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI),* pp. 000339–000342. 2021. Online: https://doi.org/10.1109/SAMI50585.2021.9378633

[13] K. Beneda, 'Development of an Advanced Pressure Signal Acquisition Card for a Modular Turbojet Fadec System'. Online: https://doi.org/10.35116/aa.2021.0007

[14] D. C. Nagel, 'Human Error in Aviation Operations', in *Human Factors in Aviation,* E. L. Wiener and D. C. Nagel, eds. Amsterdam, Academic Press. pp. 263–303. 1988. Online: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057090-7.50015

[15] EASA, 'Artificial Intelligence Roadmap', *EASA,* 2020. Online: www.easa.europa.eu/downloads/109668/en

[16] F. Ansari, R. Glawar and W. Sihn, 'Prescriptive Maintenance of CPPS by Integrating Multimodal Data with Dynamic Bayesian Networks' in *Machine Learning for Cyber Physical Systems. Selected papers from the International Conference ML4CPS 2017,* J. Beyerer, A. Maier and O. Niggemann, eds. Heidelberg, Springer Vieweg Berlin. pp. 1–8. 2020. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-662-59084-3

[17] D. Dinis, A. Barbosa-Póvoa and Â. P. Teixeira, 'A Supporting Framework for Maintenance Capacity Planning and Scheduling: Development and Application in the Aircraft MRO Industry'. *International Journal of Production Economics,* Vol. 218. pp. 1–15. 2019. Online: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.04.029

[18] S. Albakkoush, E. Pagone and K. Salonitis, 'An Approach to Airline MRO Operators Planning and Scheduling during Aircraft Line Maintenance Checks Using Discrete Event Simulation'. *Procedia Manufacturing,* Vol. 54. pp. 160–165. 2021. Online: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.024

[19] M. Esposito, M. Lazoi, A. Margarito and L. Quarta, 'Innovating the Maintenance Repair and Overhaul Phase through Digitalization'. *Aerospace,* Vol. 6, no 5. p. 53. 2019. Online: https://doi.org/10.3390/aerospace6050053

[20] J. Ordieres-Meré, T. Prieto Remon and J. Rubio, 'Digitalization: An Opportunity for Contributing to Sustainability From Knowledge Creation'. *Sustainability,* Vol. 12, no 4. p. 1460. 2020. Online: https://doi.org/10.3390/su12041460

[21] A. Siyaev and G.-S. Jo, 'Towards Aircraft Maintenance Metaverse Using Speech Interactions with Virtual Objects in Mixed Reality'. *Sensors,* Vol. 21, no 6. p. 2066. 2021. Online: https://doi.org/10.3390/s21062066

[22] A. Siyaev and G.-S. Jo, 'Neuro-Symbolic Speech Understanding in Aircraft Maintenance Metaverse'. *IEEE Access,* Vol. 9. pp. 154484–154499. 2021. Online: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3128616

[23] H. M. Shakir and B. Iqbal, 'Application of Lean Principles and Software Solutions for Maintenance Records in Continuing Airworthiness Management Organisations'. *The Aeronautical Journal,* Vol. 122, no 1254. pp. 1263–1274. 2018. Online: https://doi.org/10.1017/aer.2018.65

[24] S. Hongli, W. Qingmiao, Y. Weixuan, L. Yuan, C. Yihui and W. Hongchao, 'Application of AR Technology in Aircraft Maintenance Manual'. *Journal of Physics: Conference Series,* vol. 1738, no 1. 2021. Online: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1738/1/012133

[25] D. Leca, V. Cadenat, T. Sentenac, A. Durand-Petiteville, F. Gouaisbaut and E. Le Flecher, 'Sensor-based Obstacles Avoidance Using Spiral Controllers for an Aircraft Maintenance Inspection Robot', in *2019 18th European Control Conference (ECC),* pp. 2083–2089. 2019. Online: https://doi.org/10.23919/ECC.2019.8795882

[26] F. Donadio, J. Frejaville, S. Larnier and S. Vetault, 'Human-robot Collaboration to Perform Aircraft Inspection in Working Environment', 2016.

[27] M. Hrúz, M. Bugaj, A. Novák, B. Kandera and B. Badánik, ''The Use of UAV with Infrared Camera and RFID for Airframe Condition Monitoring'. *Applied Sciences,* Vol. 11, no 9. 2021. Online: https://doi.org/10.3390/app11093737

[28] B. Brandoli et al., 'Aircraft Fuselage Corrosion Detection Using Artificial Intelligence'. *Sensors,* Vol. 21, no 12. 2021. Online: https://doi.org/10.3390/s21124026 ; DOI: https://doi.org/10.3390/s21124026

[29] F. Heilemann, A. Dadashi and K. Wicke, 'Eeloscope – Towards a Novel Endoscopic System Enabling Digital Aircraft Fuel Tank Maintenance'. *Aerospace,* Vol. 8, no 5. 2021. Online: https://doi.org/10.3390/aerospace8050136
[30] T. Tyncherov and L. Rozkova, 'Predictive Maintenance Model of Refined Aircraft Tires Replacement', in *International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication,* pp. 164–173. 2020. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68476-1_15
[31] L. Rozhkova and T. Tyncherov, 'Remaining Useful Life for Tires on Aircraft's Main Wheels: Prediction Based on Quick Access Recorder Data', in *International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication,* pp. 140–150. 2020. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68476-1_13
[32] C. Boller, 'Ways and Options for Aircraft Structural Health Management'. *Smart Materials and Structures,* Vol. 10, no 3. p. 432. 2001. Online: https://doi.org/10.1088/0964-1726/10/3/302
[33] T. Tyncherov and L. Rozkova, 'Aircraft Lifecycle Digital Twin for Defects Prediction Accuracy Improvement', in *International Conference on Reliability and Statistics in Transportation and Communication,* pp. 54–63. 2019. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-030-44610-9_6
[34] A. Y. Yurin, Y. V. Kotlov and V. M. Popov, 'The Conception of an Intelligent System for Troubleshooting an Aircraft', 2021.
[35] A. Nasiri Pour, B. Rostami-Tabar and A. Rahimzadeh, 'A hybrid Neural Network and Traditional Approach for Forecasting Lumpy Demand'. *Proceedings of the World Academy of Science, Engineering and Technology,* Vol. 2, no 4. 2008.
[36] M. M. Gyazova and I. D. Vlaznev, 'Mathematical Method of Artificial Neural Networks in Aircraft Maintenance, Repair and Overhaul'. *TEM Journal,* Vol. 9, no 4. p. 1372. 2020. Online: https://doi.org/10.18421/TEM94-08
[37] S. Schmid, U. Martens, W. K. Schomburg and K.-U. Schröder, 'Integration of Eddy Current Sensors into Repair Patches for Fatigue Reinforcement at Rivet Holes'. *Strain,* Vol. 57, no 5. 2021. Online: https://doi.org/10.1111/str.12387

Technológiai ütemterv a légi járművek karbantartásával, javításával és nagyjavításával foglalkozó vállalatok részére

Napjainkban a légi járművek karbantartása, javítása és nagyjavítása (Maintenance, Repair and Overhaul [MRO]) iránti kereslet folyamatosan növekszik. Az európai MRO-szegmens piaci méretét 2022-ben 206,13 milliárd USD-ra becsülték, ami 2022 és 2030 között várhatóan 2,8%-os összetett éves növekedési rátával (Compound Annual Growth Rate [CAGR]) fog növekedni [1]. Ez az előrejelzés az iparág fejlődése mellett a beérkező feladatok számának növekedését is jól mutatja. Ennek eredményeképpen a légitársaságok és a repülőgép-üzemeltetők egyre inkább az MRO-területen tapasztalattal rendelkező társaságokra támaszkodnak majd a karbantartási és javítási munkák elvégzésében. Továbbá, mivel ma már sok légitársaság a karbantartás és javítás kiszervezése mellett dönt, ez tovább növeli az MRO-vállalatok terheléseit. A beérkező feladatok számának növekedése miatt az érintett vállalatok folyamatosan keresik az újabb és jobb módszereket és technológiákat, illetve azok bevezetését, aminek másik célja a nagyobb piaci részesedés elérése. Továbbá, mivel ezen a területen még van lehetőség új technológiák és folyamatok kifejlesztésére és bevezetésére, jelentős számú kutatási és fejlesztési projekt van folyamatban, illetve körvonalazódik. Ezért e tanulmány fő célja, hogy a rendelkezésre álló információk felhasználásával

ismertesse az MRO-tevékenységben érintett vállalatok általánosított technológiai ütemtervét, valamint ebből kiindulva összegyűjtse, bemutassa és kategorizálja az MRO-ágazat legmodernebb fejlesztéseit rávilágítva arra, hogy milyen lesz a jövő azon vállalatok részére, amelyek ezeket a forradalmi újításokat a mindennapi munkafolyamataikba beépítik.

Kulcsszavak: *repülőgép-karbantartás, -javítás és -felújítás, stratégia és ütemterv, kutatási és fejlesztési tevékenységek, Az MRO-innovációk kategorizálása*

Ichou, Sally, MSc
doktori hallgató
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Repüléstudományi és Hajózási Tanszék

sichou@edu.bme.hu
orcid.org/0000-0002-4014-7977

Sally Ichou, MSc
PhD student
Budapest University of Technology and Economics
Faculty of Transportation and Vehicle Engineering
Department of Aeronautics and Naval Architecture

sichou@edu.bme.hu
orcid.org/0000-0002-4014-7977

Dr. Veress Árpád
egyetemi docens
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Repüléstudományi és Hajózási Tanszék

veress.arpad@kjk.bme.hu
orcid.org/0000-0002-1983-2494

Árpád Veress, PhD
Associate Professor
Budapest University of Technology and Economics
Faculty of Transportation and Vehicle Engineering
Department of Aeronautics and Naval Architecture

veress.arpad@kjk.bme.hu
orcid.org/0000-0002-1983-2494

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
34. évfolyam (2022) 3. szám 31–45. • DOI: 10.32560/rk.2022.3.3

Sándor Zsolt

Az áruszállító drónok megjelenése okozta kihívások a légi közlekedési rendszerben

A pilóta nélküli légi járműveket egyre több iparág használja. A szolgáltatóiparban újabb, korábban nem létező szolgáltatások jelennek meg. Az alkalmazott eszközök technológiai fejlődése lehetővé teszi, hogy ma már ne csak adatgyűjtésre, hanem szállítási feladatok ellátására is használják ezeket. Lényeges, hogy a potenciális hasznokon kívül, az eszközök megjelenésével és tömeges elterjedésével járó kihívásokról és potenciális negatív hatásokról is beszéljen a szakma. Jelen cikkben feltárom és részletesen bemutatom ezeket a problémákat a lehetséges megoldásokkal együtt.

Kulcsszavak: *áruszállító drón, drón, UAV, UAS, drónjogszabály, drónműveletek*

1. Bevezetés

A pilóta nélküli légi járművekhez kötődő piac folyamatosan növekvő kapitalizációval rendelkező terület, amelynek globális értéke 2021-ben a becslések alapján elérte a 127 milliárd USA dollárt [1]. Az eszközökre szűkített piac globális mérete a 2018 és 2024 közötti 6 évben 14 milliárd USA dollárról várhatóan 43 milliárd dollárra fog növekedni, és ezáltal világszerte várhatóan 100 000-nél is több új munkahely fog létrejönni [2].

Míg a pilóta nélküli légi járművek korábbi fejlesztései a legfőbb felhasználási területeire, az adatgyűjtésre és monitoringra koncentrálódtak, addig a mai fejlesztések igen jelentős része az aktív közreműködésre és beavatkozásokra vonatkozik. Az új megoldások az UAS-ok olyan új felhasználási formájának kialakítását támogatják, amelyek által az eszközök tevőlegesen hozzá tudnak járulni a közúti közlekedés által okozott torlódások és az ezekkel járó egyéb negatív hatások mérsékléséhez [3].

A műszaki és technológiai fejlesztések hatására ezek az eszközök a közeljövőben a közlekedési infrastruktúra szerves részét fogják képezni, és általuk a jelenlegi közúti túlsúlyú szárazföldi szállítási módok drasztikusan megváltozhatnak. Mivel ki tudják használni a tér 3 dimenziójában való mozgást, így a közúti kapacitáskorlátok (szűk keresztmetszetek) – forgalmi torlódások – feloldhatóvá válnak.

A szállítási igények egyre gyorsabb kielégítése csak új megoldások révén valósítható meg. Ennek szerves része a pilóta nélküli légi jármű-rendszerek alkalmazása, amelyeket már napjainkban is használnak speciális szállítási feladatok ellátására (például gyógyszerek, vakcinák, orvosi eszközök célba juttatására) olyan helyszíneken, ahol nem áll rendelkezésre megfelelő minőségben közúti hálózat [4], [5], [6], [10].

A pilóta nélküli légi járművek használatával támogatott logisztikai szektor globális piaca folyamatosan növekszik, és az előrejelzések szerint a 2019-es 5,3 milliárd dolláros értékről 2026-ra várhatóan 11 milliárd dollárra fog nőni [7].

Jelen cikk témáját a kereskedelmi áruszállításban megjelenő drónok adták, ugyanis alkalmazásuk a potenciális előnyökön túl számos kérdést is felvet, amelyeket érdemes légi közlekedési, környezetvédelmi és logisztikai szempontokból is megvizsgálni. Ezek olyan kihívások, amelyeket kezelni kell, különben a használatuk ellehetetlenül, illetve kedvezőtlenül befolyásolják a légi közlekedés egyéb szereplőit, valamint torzíthatják a kereskedelmi szolgáltatásokat is.

Az elmúlt néhány évben sokat lehetett hallani és olvasni arról, hogy a nagy, nemzetközi áruszállítással és csomagkiszállítással foglalkozó cégek intenzív lépéseket tettek annak érdekében, hogy az úgynevezett „utolsó kilométer logisztikájára" *(„last mile logistics")* és az innovatív áruszállítási igényekre megoldást találjanak. Az Amazon, a DHL és a Google is jelentős forrásokat fordított arra, hogy a pilóta nélküli légi járműveket fel tudják használni a jövőben a légi áruszállításban és ezáltal áttörést érjenek el.

A témát mindenképpen fel kell tárni, ugyanis kiemelt jelentősége van az innovációnak a szállítási folyamatok utolsó fázisában, amikor a csomag a raktárból a fogyasztóig eljut. Ez azért ennyire jelentős, mert ez az ellátási lánc legidőigényesebb, legköltségesebb és egyben leginkább környezetszennyező fázisa (egy-egy kiszállítandó csomagra fajlagosan számítva), és a teljes szállítási költségek ~50%-át teszik ki. A pilóta nélküli légi járművekkel megvalósított csomagszállítás piaca igazi forradalom előtt áll. Az előrejelzések szerint a légi járművekkel megvalósított áruszállítási piac globális mérete 2027-re eléri a közel 7,4 milliárd dollárt, átlag 41,8%-os éves növekedési ütemmel [8]. Más elemzések évenkénti 50% feletti bővüléssel számolva, 2028-ra 31 milliárd dolláros globális piaci kapitalizációval számolnak [9].

A fejlesztések mögött elsősorban nemzetközi szállítmányozással foglalkozó közúti dominanciával rendelkező cégek és nagy repülési tapasztalattal rendelkező gyártócégek állnak [8]. A cégek a fejlesztéseiktől azt várják, hogy a légi járművekkel megvalósuló áruszállítással a folyamat gyorsabb és zöldebb/környezetbarátabb lesz, mint a hagyományos közúti szállítás.

A fejlesztések hatására olyan megoldások alkalmazása kerül előtérbe, amely biztosítja, hogy a pilóta nélküli eszközök elektromos vagy a későbbiekben esetleg hidrogénmeghajtásúak legyenek, így elérhetővé válik, hogy használat közben ezek a légi járművek nem bocsátanak ki káros anyagot, a közlekedésük során a tér mind a három dimenzióját ki tudják használni, így a forgalmi torlódások nem akadályozzák haladásukat. Az áruszállító drónok további előnye, hogy rövid idő alatt repülésre kész állapotba hozhatók, azaz gyorsan elhelyezhető rajtuk a rakomány, az akkumulátor cseréje néhány másodperc alatt elvégezhető, és az indítása is könnyen és zökkenőmentesen megvalósítható [30].

2. Kihívások

Az áruszállító drónokkal kapcsolatos fejlesztések, az esetek túlnyomó többségében csak az előnyöket mutatják be. Azt hangsúlyozzák, hogy ezek az alkalmazások pozitívan járulnak hozzá a környezetvédelemhez, ugyanis felhasználásuk zöld és környezetbarát, így lehetővé teszik a gyors és megbízható áruszállítási szolgáltatások kialakítását. Így a széles körű iparági ismeretekkel nem rendelkezők körében téves kép alakul ki erről a szolgáltatásról. A sok

pozitívum mellett ezeknek a megoldásoknak is vannak negatív oldalai. Nem szokott szó esni azokról a műszaki, jogi és szabályozási kihívásokról, amelyek a használatukkal összefüggésben megjelennek. Ezek annál jelentősebbek lesznek, minél inkább elterjednek az ilyen szolgáltatások, ugyanis az alacsony magasságon áruszállítási tevékenységet végző eszközök jelentős mértékben befolyásolják a légi közlekedési szektor működését. Ezen túlmenően a gyártással és üzemeltetéssel kapcsolatosan is megjelennek olyan igények, amelyek kielégítéséhez olyan speciális környezetre van szükség, amelyek a vélt előnyöket akár teljes mértékben felülírják.

Jelen cikkben több tényező vizsgálatával mutat rá a szerző arra, hogy a pilóta nélküli légi járművekkel megvalósított áruszállítási feladatok rentabilitásához és nagyarányú elterjedéséhez, valamint a biztonságos üzemeltetés megvalósításához számos további fejlesztésre vagy éppen szemléletformálásra van szükség. Ezek műszaki, jogi, szabályozási, szociológiai és pszichés tényezők, amelyek kihívásként azonosíthatók.

A szerző a cikkben a kihívásokat az alábbi tényezők szerint vizsgálja:

- infrastrukturális kihívások (légi és földi eszközök, alkatrészek, életciklus);
- energia-szempontú kihívások (elektromos energia forrása, költsége és felhasználása);
- keresleti és kínálati kihívások (társadalmi hozzáállás, fizetőképes kereslet és társadalmi igények egy ilyen szolgáltatásra);
- jogszabályi kihívások (felhasználási lehetőségek);
- fizikai hozzáférhetőség jelentette korlátok;
- légi közlekedési szereplőkre gyakorolt hatások (hagyományos légi közlekedésre gyakorolt korlátozó hatások, vagy éppen fordítva, a hagyományos légi közlekedés által okozott korlátok).

Az egyes tényezők jobb megértése érdekében a szerző számos alkalmazási és számítási példa segítésével szemlélteti a korlátozó tényezők hatását.

2.1. Infrastrukturális kihívások

A drónos infrastruktúra az alábbi részekre bontható:

- *pilóta nélküli légi jármű(vek):* ez maga az áruszállító drón, amely elvégzi a szállítási feladatot a depó/csomagraktár és a rendeltetési helyszín (célpont) között;
- elsődleges infrastruktúra: a repülési művelet közvetlen lebonyolításához szükséges eszközök és szolgáltatások összessége, amelyek biztosítják, hogy a jármű az adott repülési műveletet el tudja végezni. Ez magában foglalja az alábbiakat:
  - földi repülésüzemi infrastruktúra: kiszolgáló helyszínek és az ott használatos berendezések, valamint szolgáltatások (fel- és leszállóhelyek, adott esetben indító és fogadó berendezések, művelet felkészítéséhez szükséges eszközök – akkumulátorok töltését biztosító eszközök stb.);
  - légi oldali alap-infrastruktúra: légi közlekedési rendszer működéséhez szükséges berendezések és szolgáltatások összessége (kommunikációs rendszer, légtér, navigációhoz szükséges eszközök stb.);
  - üzemirányítási alap-infrastruktúra: az áruszállítási szolgáltatás lebonyolításához szükséges irányítási rendszerek és komponenseinek összessége (személyzet + üzemirányító központ).

- *másodlagos infrastruktúra:* a járművek kiszolgálásához, karbantartásához szükséges eszközök és maga a karbantartó bázis, oktatási létesítmények, szimulátorok stb.

2.1.1. Pilóta nélküli légi jármű-rendszerek jelentette kihívások

Lényeges, hogy a pilóta nélküli légi jármű-rendszerekkel foglalkozó iparág jelentős mértékben fejlődött az elmúlt évtizedben. A drónos áruszállítás megvalósítása érdekében korábban leküzdhetetlennek tűnő problémákra kellett műszaki és technológiai megoldásokat találni. Napjaink leginkább kurrens és leginkább kutatott témája az, hogy megoldást találjanak a repülésbiztonság szempontjából kritikus tényezőkre. Ez különösen jelentős a drónnal megvalósított áruszállítási szolgáltatások esetén, ahol a szolgáltatással lefedett terület nagysága és a művelet jellege miatt azokat látótávolságon túli üzemben és teljesen autonóm módon hajtják végre.

Ez igényli a fejlett és magas fokú automatizáltsággal rendelkező fedélzeti elektronikai rendszer rendelkezésre állását, amely a felszállási és a rendeltetési pont között képes emberi beavatkozás nélkül, autonóm módon végrehajtani a repülési műveleteket, azonosítva az összes veszélyforrást és akadályt, így biztosítva a megfelelő biztonsági intézkedések végrehajtását azok felbukkanása esetén.

Üzemeltetési szempontból az egyik legnagyobb kihívást az alkalmazott eszközök kapacitáskorlátjai jelentik. Ezek megnyilvánulnak a szállítható csomag maximális tömegében és méretében, valamint a maximális szállítási hatótávolságban. A szolgáltatást minden esetben jól meghatározott flottával bonyolítják le, amely pontosan meghatározható teljesítményparaméterekkel rendelkezik.

Ezek közül az alábbiak a legfontosabbak a szolgáltatás tervezéséhez (eszközök maximális kihasználtságának tervezése):

- a légi jármű egyetlen feltöltéssel – egy akkumulátorral – mennyi idő alatt, maximum mekkora távolságot tud megtenni;
- mekkora a szállítható csomag maximális tömege és mérete;
- mennyi ideig tart a kézbesítési helyszínen a csomag célba juttatása;
- a jármű visszatérését követően milyen gyorsan lehet újra bevetni (mennyi idő az akkumulátor cseréje vagy feltöltése és az újabb kiszállítandó csomag elhelyezése);
- van-e lehetőség arra, hogy úgynevezett körjáratot teljesítsen az eszköz (kézbesítést követően újabb csomagot vesz fel és kézbesíti is azt, a depóba való visszatérést megelőzően);
- tud-e egyszerre több, különböző címekre kézbesítendő árut szállítani.

A napjainkban alkalmazásra tervezett eszközök csak kiszállítani és visszatérni tudnak, így egy-egy művelet esetén a szállítási kihasználtság időalapra vetítve maximum 50%-os tud lenni (alkalmazási példákat lásd következő fő fejezetben). A kézbesítés és a visszatérést követő újbóli felkészítés is időt vesz igénybe, ez tovább csökkenti a kihasználtságot. Így a legjobb esetben is effektív csomagszállítás maximum az üzemeléssel töltött idő 40–45%-ában teljesül.

A szolgáltatással érintett aktív időszak meghatározása függ a szolgáltató üzletpolitikájától, a nappalok hosszától és az időjárástól. A kiszállítás világosban, a működés szempontjából kedvező időjárási körülmények között kell hogy megvalósuljon, amikor az ügyfél fogadni tudja az érkező árut, ellenkező esetben az átvétel nem tud megvalósulni. Ez tovább csökkenti

a szolgáltatás kihasználtságát, mivel az év minden napján 12–16 órában (például reggel 8 és este 10 között) folyamatosan nem állnak rendelkezésre kedvező üzemeltetési körülmények.

Jelenleg a drónok csak korlátozottan tudnak részt venni az áruszállításban. Az eszközök maximum 1–2 kg-os kis méretű – könyv méretű – csomagot tudnak szállítani. Léteznek nagyobb teher szállítására alkalmas eszközök (5–10 vagy akár 20–30 kg), de azokkal kiskereskedelmi áruszállítást nem lehet megvalósítani a kialakításuk miatt (nem multikopter kialakításúak, hanem merev szárnyúak). Az általuk megtehető távolság függ a maximális horizontális üzemi sebességtől és az akkumulátorok kapacitásától, valamint az emelt teher nagyságától. Átlagosan kijelenthető, hogy egy multikopter kialakítású eszköz 15–20 percet tud a levegőben tartózkodni a megadott maximális teherrel [11], [15].

A drónos áruszállítást a közútival szembe állítva látható, hogy mennyivel nagyobb az időjárási kitettsége, és mennyivel alacsonyabb egy-egy járműre vonatkoztatva a kihasználtsága.

További szempont az eszközök bekerülési és üzemeltetési költségei. Egy drón és egy áruszállító tehergépjármű között nagyságrendnyi különbség is előfordulhat a beszerzési árak tekintetében (különösen elektromos meghajtású jármű esetén, amely akár 5–10–20 drón árával egyenértékű). Ellenben a közúti jármű kapacitása több nagyságrenddel nagyobb, így bevételtermelő és szállítási képessége is magasabb. Az üzemeltetési költségek szempontjából jelentős eltérés mutatkozhat, ugyanis pilóta nélküli légi járművek esetén az alábbiakkal kell számolni: elektromos töltés ára, karbantartási költségek, irányítórendszer kialakításának és folyamatos üzemeltetésének költsége, felügyeleti személyzet költsége, adminisztrációs költségek, biztosítási díjak, repülésbiztonsági rendszer és compliance monitoring (megfelelőség felügyelet) megoldások[1] folyamatos működtetésének költségei, egyéb rendszerhasználati díjak stb. Mivel a légi jármű nagyságrendekkel kevesebb árut képes szállítani, így a magas üzemeltetési költség viszonylag kevés tétel között oszlik szét, ami magas szállítási költséget eredményez.

2.2. Példa a drónokkal megvalósított áruszállítási szolgáltatás produktivitására

Az áruszállítás naponta 8 és 20 óra között valósul meg. Feltételezve, hogy a drón, a működéssel érintett területen óránként átlagosan 1,5 csomag kiszállítását tudja végrehajtani (15–15 perc repülés és 5–5 perc a csomag leeresztése és az újbóli repülésre való felkészülés), így 12 óra alatt 18 csomag szállítása valósul meg egy eszköz által, miközben a repült ideje 8 óra. Ha a sebességet növeljük és az egyéb időszükségleteket csökkentjük, és 12 óra alatt 24 csomag célba juttatását meg lehet valósítani, még az is kevés, mivel egy kisteherautóval ennyi csomagot akár pár óra alatt is kézbesíteni lehet. Továbbá a drón a visszaúton üresen közlekedik, így a kapacitáskihasználtsága maximum 50% a hasznos időalapra vetítve.

Az elemzés szempontjából érdemes további műszaki szempontú tételeket figyelembe venni. Számításba kell venni, hogy a légi jármű előállításának és az alkatrészek életciklusának milyen hatásai vannak a környezetre.

[1] Mindazon tevékenységek összesége, amely különböző eszközök segítségével biztosítja (például képzés, audit, szemlék, ellenőrzések, hatósági támogatás), hogy a műveleteket a mindenkor hatályos jogszabályok és előírások alapján végezzék el. Ez különálló, de kötelező szervezeti funkció, amely összekapcsolja az operációt és a jogi szabályozást, a képzést és a fejlesztést.

A törzs, konténment és hajtóművek viszonylag ellenállók a környezeti tényezőknek (időjárás, mechanikai igénybevétel stb.). A forgószárnyakat meghatározott időnként vagy sérülés észlelése esetén cserélni kell. Ezek jellemzően műanyag, szénszálas kompozit alkatrészek, amelyek könnyen és gyorsan legyárthatók és cserélhetők, műanyag hulladékként való kezelésük megoldható. Környezetvédelmi szempontból a legérzékenyebb alkatrész az akkumulátor. Ezeket minden műveletet követően fel kell tölteni vagy a visszatérő drónba egy teljesen feltöltött darabot kell behelyezni. A töltés jellemzően a dróntól elkülönítetten zajlik. Így az akkumulátor-életciklusok rendkívül gyorsan növekednek, és a gyártói garanciavállalások csupán néhány 100 ciklusra vonatkoznak. Felette az adott akkumulátor használata repülési műveletekhez már nem biztonságos, gondoskodni kell azok hulladékként való elhelyezéséről. Emiatt a drónos szolgáltatások jelentős hulladékmennyiséget képezhetnek, és ezek megfelelő és szakszerű kezeléséről gondoskodni kell, azok kommunális hulladékként nem helyezhetők el.

Példaként használjuk a korábban említett számértékeket, kiegészítve azzal, hogy a gyártó 500 ciklusban állapította meg a használati korlátot. Amennyiben 18 műveletet teljesít a drón egy nap alatt, úgy 28 repülési naponként kell cserélni egy-egy akkumulátort. A valóság ennél összetettebb. Folyamatos üzemelést feltételezve egy eszközhöz több akkumulátor tartozik, attól függően, hogy mennyi idő alatt lehet feltölteni azokat. Jellemzően 1–2 óra alatt hagyományos – nem gyors – töltéssel is el lehet érni a maximális kapacitást. A példában egy drónhoz 4 db akkumulátor áll rendelkezésre. Ennek alapján 2000 műveletenként keletkezik gépenként 4 db hulladék akkumulátor. Ez átlagolva havonta egy darab. A számítások alapja a jelenleg elérhető technológiához kapcsolódik. Figyelembe kell venni azt is, hogy gyorstöltés alkalmazásával az elhasználódás alacsonyabb ciklusszámnál is jelentkezhet, ami gyakoribb cserét igényel.

Amennyiben a szolgáltatás világszerte felfut, és több ezer áruszállító drón jelenik meg, úgy évente több tízezer darabnyi (sok ezer tonnányi) akkumulátor jelenik meg mint hulladék. Ezek biztonságos ártalmatlanításáról vagy újrafelhasználásáról gondoskodni kell.

2.2.1. Elsődleges és másodlagos infrastruktúra jelentette kihívások

A szolgáltatás működtetéséhez szükség van logisztikai központokra, ahonnan az eszközök a repülési műveletet el tudják kezdeni és irányítóközpontra, ahonnan a szolgáltatás irányítása és felügyelete megvalósul. Míg irányítóközpontból elegendő akár egy is, addig logisztikai központból többet kell telepíteni, illeszkedve az alkalmazott drónok hatótávolságához és a szolgáltatással lefedendő terület méretéhez, valamint az alkalmazni kívánt drónok darabszámához.

Ennek értelmében nem elegendő 1–1 nagyobb logisztikai központot telepíteni egy-egy régióban, hanem jóval többre lesz szükség. Ez növeli a beruházási és üzemeltetési költségeket (több épületet kell építeni, több munkavállalóra van szükség, növekszik a fenntartási költség, így a szolgáltatáshoz kapcsolódó fix költségek is emelkednek). Ez jelentős kihatással lesz a fajlagos költségekre is. Figyelembe kell venni, hogy az infrastruktúra kiépítésének költsége több nagyságrenddel magasabb, mint a járművek beszerzési és üzemeltetési költségei. Amennyiben kombinált (közúti és légi) szállítási megoldásokra használják az így kialakított létesítményeket, akkor azzal részben keresztfinanszírozni lehet a légi áruszállítási szolgáltatást, így csökkenthető a fajlagos költség.

Környezetvédelmi szempontból azonosíthatók a negatív hatások, ugyanis a logisztikában korábban alkalmazott kedvező méretgazdaságossági szempontok sérülnek. A több épület több energiát igényel, ami ha nem zöld forrásból áll rendelkezésre, akkor jelentősen növeli a környezeti terhelést.

Továbbá a kisebb központokba, a korlátozott tárolókapacitás miatt gyakrabban kell árut beszállítani, így a több, de kisebb logisztikai raktár a hagyományos közúti áruszállítási igényeket is növeli. Ezek kielégítését jellemzően nagyobb, hagyományos fosszilis tüzelőanyaggal hajtott tehergépjárművekkel végzik, mivel még nem áll rendelkezésre kellő számban elektromos meghajtású változat.

2.3. Energia-szempontú kihívások

A környezetvédelmi szempontok teljesülése érdekében fontos, hogy a pilóta nélküli légi járművek üzemeléséhez szükséges energiát zöld forrásból fedezzék, és ezek ára versenyképes legyen. Elektromos meghajtású eszközök esetén ez megújuló forrásból származó áramot jelent, nem elektromos meghajtás esetén (például hidrogén) olyan forrást kell alkalmazni, amely biztosítja, hogy a meghajtó energia zöld vagy környezetbarát forrásból származzon [29].

Amennyiben a meghajtáshoz szükséges energia nem zöld és megújuló forrásból származik, akkor annak ellenére sem lehet környezetbarát szállítási megoldásnak tekinteni a drónos áruszállítást, hogy a felhasználási helyszínen károsanyag-kibocsátás nem történik. Számos törekvés létezik, hogy az innovatív megoldásokhoz kifejezetten zöld forrásból származó elektromos energiát vagy energiahordozót használjanak, azonban az ezekhez való hozzáférés korlátozott. Megoldást jelenthet, ha a szolgáltatók saját megújuló (például nap- és/vagy szél-) erőműveket telepítenek, amelynek termeléséből fedezni tudják a szolgáltatáshoz szükséges energiaigényüket. A drónos áruszállításokhoz kapcsolódóan energiaigény az alábbi területeken jelentkezik:

- járművek közvetlen energiaigénye (akkumulátorok töltéséhez szükséges energia) – akkumulátorok folyamatos töltésének igen jelentős energiaigénye van;
- elsődleges és másodlagos infrastruktúrák üzemeltetéséhez szükséges energia (logisztikai központok, üzemirányítási központ közvetlen energiaigénye).

Az energiaigényeknél figyelembe kell venni, hogy a szolgáltató milyen áron jut hozzá 1 kWh villamos energiához. Amennyiben a cég érdekelt a zöld és megújuló forrás alkalmazásában, akkor hajlandó akár magasabb összegeket is áldozni az ilyen módon megtermelt áramért. Amennyiben elsődleges célja a költségek csökkentése és a minél olcsóbb üzemeltetés, akkor az energia-előállítás módja számára irreleváns. A magasabb áramár viszont kihat a szolgáltatás árára, így azt végső soron a szolgáltatást igénybe vevőkkel fizettetik meg.

Környezetvédelmi és energetikai szempontból jelentős előrelépést jelenthet a hidrogénmeghajtással rendelkező eszközök jövőbeni megjelenése és elterjedése. Ehhez ki kell alakítani a zöld forrásból származó hidrogén előállítási módját, és olyan technológiai megoldásokat kell találni, amelyek lehetővé teszik a hidrogén fedélzeten történő biztonságos tárolását és felhasználását. A hidrogén energiasűrűsége jóval nagyobb, mint egy hagyományos akkumulátoré, így az ilyen technológia jóval nagyobb rugalmasságot tud majd a jövőben biztosítani a drónos áruszállítási szolgáltatások számára. További megoldásokkal is kísérleteznek, mint

például az automata dokkolós akkumulátorcsere, a lézersugaras repülés közbeni újratöltés és az egyéb hibrid üzemű megoldások kombinációja (üzemanyagcellák, napelemek és szuperkondenzátorok kombinálása) [11].

A jelenleg elérhető és alkalmazott lítiumion-akkumulátorok korlátozzák a szolgáltatások elterjedését, ugyanis a kapacitásuk nem teszi lehetővé a hosszú távú repüléseket. A területen a fejlesztések folyamatosak, és várható, hogy 2025-re a 2020-as évek elején mért akkumulátorkapacitások megduplázódnak. Azonban még így is elmaradnak a belső égésű motorok által nyújtott lehetőségektől, és pontosan emiatt nem tud hatékony és versenyképes alternatívája lenni a drónos áruszállítás a közútinak [12].

2.4. Keresleti és kínálati kihívások

A jelen cikk témájául szolgáló áruszállítási szolgáltatások még kialakulófélben vannak, és csak egy-egy nagyobb csomagszállítással foglalkozó vállalat kezdett el kísérleti jelleggel ilyen megoldásokat kínálni a kiskereskedelmi áruszállításban. Azt lehet mondani, hogy ez a szolgáltatás is a Gartner-hiperciklusgörbe elején helyezkedik el, ahol még a kutatás-fejlesztés és az elsőkörös kereskedelmi megoldások találhatók [13], [16], [17].

A szolgáltatás iránti kereslet több tényezőtől függ. Ilyen az ár, a valós kiszállítási lehetőségek igénybevételének módja (fizikai hozzáférés – lásd következő fejezet), a drónos kiszállítással elérhető árucikkek mennyisége, a szállítás gyorsasága, illetve a társadalom érzékenysége az újdonságokra [31].

Az innováció felfutásának kezdeti szakaszában, amikor az árak magasak – az innovációs költségek fedezésének igénye miatt –, azt csak a kíváncsi, technológia iránt érdeklődők fogják igénybe venni, így a kereslet alacsony lesz. A szolgáltatás életciklusának előrehaladásával és a szolgáltatáshoz való hozzáférés bővülésével az árak konszolidálódnak, viszont a technológia összetettsége, a bekerülési és üzemeltetési költségek magas szintje, valamint az alacsony kapacitáskihasználtság miatt a közúti áruszállítási díjakat nem fogja megközelíteni. A fajlagos költségek a légi áruszállításban jóval magasabbak lesznek, mint a közúti alágazatban, ugyanis a szolgáltatás működtetéséhez komplexebb és drágább költségszintű megoldásokat kell folyamatosan biztosítani (repülésbiztonsági menedzsmentrendszer, compliance monitoring rendszer, karbantartóbázisok, irányítóközpont, részletes adminisztráció, a repülés lebonyolítását biztosító kapcsolódó rendszerek üzemeltetése, speciálisan kiképzett személyzet, tréningek stb.).

A keresleti igényeket növelheti az extra gyors kiszállítás, amelyet kínálati oldalról a lefedettség növelésével lehet javítani. Utóbbi azonban jelentős költségtöbbletet jelent a sűrűbb elhelyezkedést igénylő logisztikai központok miatt.

Az elérhető információk alapján az Amazon például 63 dollárért kínál egy kiszállítást, ami 400 Ft-os árfolyam esetén 25 000 Ft [14]. Ez az összeg a hagyományos közúti szállítás körülbelül hússzorosa. Felmerül a kérdés, hogy a költségtöbblet összemérhető-e a 30–60 perces kiszállítás nyújtotta előnnyel, figyelembe véve, hogy 2,5 kg-nál nehezebb csomagot jelenleg nem tudnak kézbesíteni.

2.5. Fizikai hozzáférhetőség jelentette korlátok

A kiskereskedelmi áruszállításban kísérleti jelleggel alkalmazott pilóta nélküli légi járművek meglehetősen korlátozott területen tudnak szállítási műveleteket végrehajtani. Lényeges, hogy egymáshoz képest megfelelő közelségben helyezkedjen el a depó és a kiszállítási helyszín, továbbá a rendeltetési helyszín legyen alkalmas a légi járművel való kézbesítésre is. A rendeltetési helyszínen a drón a fizikai kézbesítést a csomag leeresztésével vagy ledobásával valósítja meg, így a helyszínnek alkalmasnak kell lennie arra, hogy ott a csomag légi úton elhelyezhető legyen. Sűrű, belvárosi környezetben, többemeletes bérházak környezetében ez nem megvalósítható. Így a szolgáltatással érintett helyszínek elsősorban azokra a külvárosi és kertvárosi helyszínekre korlátozódnak, ahol a „ledobás" biztonságos.

Az áruszállítási műveletekkel érintett területek légi közlekedési szempontból összetett légtérstruktúrájú környezetben is lehetnek. Ez már önmagában is jelentősen gátolja a szolgáltatáshoz való hozzáférést és a szolgáltatás megvalósítását is, mivel akár fél városnyi területek is No Drone Zone-ba vagy ellenőrzött légtérbe eshetnek. Erre megoldás, ha az áruszállító pilóta nélküli légi járművek közlekedését integrálják a hagyományos légi közlekedési rendszerbe, ami az UTM-rendszerek[2] megjelenésével lesz megvalósítható.

2.6. Jogi kihívások

Az áruszállítási műveletek jellegükből adódóan minden esetben autonóm művelet keretében, látótávolságon túli üzemeléssel valósulnak meg, ahol egy irányítóközpontból látják el légi járművek közvetlen irányítását és közlekedésük felügyeletét. Az autonóm működés azt jelenti, hogy a művelet végrehajtása során a pilóta nélküli légi jármű a távpilóta beavatkozási lehetősége nélkül működik. Ez alól kivételt jelent a sürgősségi eljárások alkalmazása [18], [19]. Tekintettel arra, hogy egy áruszállítási szolgáltatás megvalósítása során nincs lehetőség arra, hogy minden egyes eszközt dedikált távpilóták irányítsanak, így csak autonóm megoldással lehet biztosítani a szolgáltatást. Ez azonban további repülésbiztonsági követelmények bevezetését teszi szükségessé, mivel minden esetben biztosítani kell a biztonságos működést, még akkor is, ha előre nem látható akadály, meghibásodás vagy probléma lép fel. Az autonóm rendszerek humán közbeavatkozás nélkül – az önvezető autókhoz hasonlóan – képesek azonosítani és elkerülni a repülési útvonalba eső statikus és mozgó akadályokat – legyenek azok emberek, állatok, egyéb légi járművek, autók stb. Ez a működési forma az európai vonatkozó jogszabályok alapján csak úgynevezett speciális vagy engedélyköteles kategóriájú műveletként hajtható végre, amihez szükséges, hogy az UAS-t üzemben tartó (operátor) a megfelelő, hatóság által kiadott engedélyekkel rendelkezzen. Ennek megszerzéséhez számos műszaki, jogi és üzemeltetési követelményt kell teljesítenie, és a működés során folyamatosan igazolni kell tudnia, hogy a biztonsági követelményeket maximális színvonalon kielégíti. Ez a túlzott szabályozás adott esetben gátolja Európán belül az ilyen szolgáltatások elterjedését, mert az üzemben tartók számára jelentős teher az ilyen működési környezet és az adminisztrációs háttér kialakítása – főleg azon szervezetek esetén, amelyek nem rendelkeznek légi áruszállítási

[2] Pilóta nélküli légi járművek forgalmi menedzsmentjét biztosító rendszer, amely működését tekintve hasonló, mint a jelenlegi ATM-infrastruktúra.

operációs tapasztalattal. A jogi és compliance megoldások működtetése adott esetben a rendszer által generált bevételek jelentős részét is felemészthetik.

2.7. A légi közlekedési szereplőkre gyakorolt hatások

A szolgáltatás kialakításával és megvalósításával összefüggésben figyelembe kell venni, hogy a pilóta nélküli légi járművek ugyanazt a légteret használják, mint a hagyományos, pilótával rendelkező légi járművek, igaz jóval alacsonyabban. A hagyományos és pilóta nélküli légi járművek közötti térbeli elkülönítés megvalósítható, ugyanis a drónok jellemzően a földfelszín felett 50–150 m-es magasságban repülnek, viszont előfordulhatnak olyan helyzetek, amikor a hagyományos gépek is használják ezt a magasságot (speciális műveletek, repülőterek környéke, légi rendészet, légi mentők stb.). Emiatt kialakulhatnak konfliktushelyzetek, veszélyes megközelítések, szélsőséges esetben akár összeütközések is [24], [25], [26], [27], [28].

Az ilyen jellegű kockázatok a használatban lévő pilóta nélküli légi járművek darabszámának növekedésével együtt fokozódnak. Ezt stratégiai kockázatcsökkentő megoldásokkal lehet részben kezelni, azonban ezek az intézkedések önmagukban nem tudják teljesen feloldani azokat a potenciális kockázatokat, amelyek a közös légtérhasználatból adódnak. A fennmaradó, az üzemeltetés közben felmerülő kockázatokat a taktikai és operatív kockázatcsökkentő megoldások hivatottak megszüntetni vagy elfogadható szintűre csökkenteni [19].

A felmerülő konfliktusok miatt, nagyvárosi környezetben, összetett légtérstruktúra esetén csak számos korlátozó intézkedés mellett lehet egy ilyen szolgáltatást működtetni, amely szinte minden esetben ideiglenesen vagy állandóan térbeli szempontból korlátozni fogja a szolgáltatáshoz való hozzáférést.

A Budapest feletti légtér vizsgálata alapján megállapítható, hogy vannak olyan No Drone Zone-ok (LHBP NDZ, LHR1 és LHR1A plusz a hazai jogszabályok által meghatározott egyéb infrastruktúrák feletti területek), amelyek nagyjából 60 km^2-es területet fednek le. Így Budapest 525 km^2-nyi területéből már legalább 11% ki van zárva a szolgáltatásból, és a maradék 89%-nyi területen is előfordulhatnak jelentős korlátozások időszakos jelleggel.

3. Jelenlegi alkalmazási példák és jó gyakorlatok

3.1. Kiskereskedelmi áruszállítási megoldások

A pilóta nélküli légi járművekkel megvalósított áruszállítás a drónok alkalmazásának egyik legígéretesebb formája, mivel általuk a szűk közúti közlekedési kapacitások – torlódások – kikerülhetők, és optimális repülési pályán – rövidebb úton – is kézbesíthetők az áruk. Annak ellenére, hogy ez az áruszállítási technológia még tesztelési és korai alkalmazási fázisban van, már számos cég kínál kísérleti jelleggel ilyen szállítási lehetőségeket, igaz korlátozott területeken.

Az Amazon Prime Air szolgáltatása 2022 nyarán kapta meg az FAA (Egyesült Államok Szövetségi Légügyi Hivatala) engedélyét, amely alapján lehetőségük van látótávolságon túli kiszállítási műveletek elvégzésére, így meg tudták kezdeni a szolgáltatást.

A szolgáltatás korlátozott helyszínen, korlátozott árucikkek szállítására alkalmas. Kalifornia államban, Lockefordban érhető el, azokon a helyszíneken, amelyek körülbelül 15 mérföldes

(25 km-es) közelségben találhatók a raktártól, és a drónokkal maximum 5 fontos, azaz nagyjából 2,5 kg-s csomagok szállíthatók. A szolgáltatással lefedett terület ~2000 km^2, ami nagyjából négyszerese Budapestnek [14]. A szolgáltatással érintett helyszíneken a cég ígérete szerint a csomagokat a megrendeléstől számított 1 órán belül kiszállítják.

Az Amazon cégen kívül a DHL, Google, Mercedes-Benz és a UPS is folyamatosan végez fejlesztési tevékenységet, hogy a városi logisztikában alkalmazni tudják a pilóta nélküli légi járműveket [20].

3.2. Nem kereskedelmi célú áruszállítási megoldások

A kiskereskedelmi átszállítási igények kielégítésén túl vannak olyan speciális, valós értéktöbblettel rendelkező egyedi drónos áruszállítási alkalmazások, amelyeket a hiányos vagy közúti infrastruktúrával nem rendelkező helyszíneken valósítanak meg. Jó példa erre az, amikor orvosi eszközöket, életmentő gyógyszereket, vakcinákat vagy egyéb egészségügyi és biológiai mintákat szállítanak a harmadik világ országainak nehezen megközelíthető helyszíneire. E műveletekhez jellemzően merev szárnyú drónokat használnak, mivel a szállítási távolság akár az 50–100 km-t is meghaladhatja. A műveleteket látótávolságon túli műveletként, autonóm módon valósítják meg. Számos harmadik világbéli országban ez a szállítási módszer már bevett gyakorlat, és van olyan cég, amely kifejezetten erre szakosodott.

A Zipline nevű cég ilyen műveleteket hajt végre Afrikában Ghánában és Ruandában, Japánban és az Egyesült Államokban. A merev szárnyú szállító drónokat katapult eszköz juttatja a levegőbe, és a cél felett az újrahasznosítható ejtőernyővel rendelkező csomag kidobása megtörténik. Ezt követően az eszköz visszarepül a központhoz, ahol elkapóháló segítségével fogadják. Így lehet biztosítani, hogy az üzemi infrastruktúra a lehető legkisebb területű legyen, ellenkező esetben a merev szárnyú eszközök miatt futópályára is szükség lenne. Egy-egy központtal 22 500 km^2-nyi területet tudnak lefedni, ahonnan egyszerre 20 drón irányítása tud egyidejűleg megvalósulni. Az eszközök 160 km-es hatótávolsággal, 110 km/h-s sebességgel haladnak, miközben maximum 1,8 kg-os csomagokat tudnak szállítani [20], [21].

Szintén példaértékű a svéd EverDrone cég megoldása, amely életmentő automata defibrillátorokat és egyéb életmentő orvosi felszereléseket szállít légi úton látótávolságon túli üzemben, autonóm módon, városi környezetben azokra a helyszínekre, ahol arra szükség van. A célpont felett, kötélen keresztül leereszti a drón az életmentő eszközt, amellyel az újraélesztést vagy a betegellátást már a mentők megérkezése előtt meg lehet kezdeni, így növelve a beteg életkilátásait [22], [23].

4. Összefoglaló

A cikkben részletezett kihívások alapján látható, hogy a drónos kiszállítási igények kiskereskedelemben való tömeges megjelenése olyan környezetvédelmi, közlekedésszervezési, légi közlekedési és egyéb problémákat generál, amelyek sok esetben globálisan nagyobb terhet jelentenek a szolgáltatások által elérhető előnyökhöz képest. Előnyként a kézbesítés felgyorsulását lehet tekinteni egyes esetekben, azonban azt is figyelembe kell venni, hogy ennek akár további igénynövelő hatása is lehet.

A pilóta nélküli légi járművel végrehajtott áruszállítási szolgáltatások kialakítása során részletekbe menően meg kell tervezni, hogy pontosan mikor, hol és milyen igények kielégítésére használják majd azt. Számos felhasználási terület van, ahol az ilyen jellegű szállításnak nagy jelentősége és valós hozzáadott értéke van:

- közúti infrastruktúrával nem rendelkező vagy nem megfelelő állapotban lévő közúti infrastruktúrával rendelkező területekre sürgősségi szállítási igények kielégítése, orvosi eszközök, gyógyszerek, életmentő felszerelések, vakcinák;
- biológiai minták és humán szervek szállítása kórházak és laboratóriumok között, abban az esetben, ha biztosított, hogy a légi szállítás gyorsabb és biztonságosabb, mint a közúti;
- készenléti és bűnüldöző szervek, kutató-mentő szolgálatok helyszíni munkáját segítő eszközök szállítása (például bombakereső eszközök, bomba hatástalanítása, veszélyes anyagok elszállítása, eltűnt emberek felkutatása stb.).

Ezek az alkalmazások csak példák arra, hogy milyen területeken, hogyan tudnak a pilóta nélküli légi járművek hozzájárulni a társadalmi biztonsághoz és jóléthez. A jövőben újabb szolgáltatások és megoldások lesznek elérhetők, a technológia megállíthatatlanul fejlődik. Azonban a jövőbeli alkalmazások során új kihívásokkal és korlátozásokkal kell számolni.

Továbbá érdemes azt a társadalmi, jóléti szempontot is figyelembe venni, hogy ha a szolgáltatások ára csökken, és valóban tömegek számára lesz elérhető, akkor ez egyben azt is előrevetíti, hogy jelentős mennyiségű eszköz fog nap mind nap a fejünk felett repülni, viszonylag alacsony – néhányszor 10 m-es – magasságban. Elfogadjuk majd azt, hogy a kertvárosi nyugalmat folyton egy-egy érkező vagy áthaladó drón zaja fogja megszakítani? Jelenleg ez még utópisztikus, de hamar eljöhet az a jövő, amikor nem a méhek zümmögését és madarak énekét fogjuk hallani a kertben ülve, hanem a drónok zúgását.

Irodalomjegyzék

[1] Yadav, A., Goel, S., Lohani, B., Singh, S., "A UAV Traffic Management System for India: Requirement and Preliminary Analysis," *Journal of the Indian Society of Remote Sensing,* 49. évf. 3. sz. pp. 515–525. 2020. Online: https://doi.org/10.1007/s12524-020-01226-0

[2] Schroth, L., The Drone Market 2019–2024: 5 Things You Need to Know, *Drone Industry Insights,* 2019. április 10. Online: https://droneii.com/the-drone-market-2019-2024-5-things-you-need-to-know

[3] Gupta, A.; Afrin, T.; Scully, E.; Yodo, N., "Advances of UAVs toward Future Transportation: The State-of-the-Art, Challenges, and Opportunities," *Future Transportation,* 1. évf. 2. sz. pp. 326–350. 2021. Online: https://doi.org/10.3390/futuretransp1020019

[4] Sylverken, A. A., Owusu M., Agbavor, B., Kwarteng, A., Ayisi-Boateng, N. K., Ofori, P., et al., "Using Drones to Transport Suspected COVID-19 Samples; Experiences from the Second Largest Testing Centre in Ghana, West Africa," *PLoS ONE,* 17. évf. 11. sz. pp. e0277057. 2022. Online: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0277057

[5] Ackerman, E., Strickland, E., "Medical Delivery Drones Take Flight in East Africa," *IEEE Spectrum,* 55. évf. 1. sz. pp. 34–35. 2018. Online: https://doi.org/10.1109/MSPEC.2018.8241731

[6] Lamptey, E., Serwaa, D., "The Use of Zipline Drones Technology for COVID-19 Samples Transportation in Ghana," *HighTech and Innovation Journal,* 1. évf. 2. sz. pp. 67–71. 2020. Online: https://doi.org/10.28991/HIJ-2020-01-02-03
[7] Drone Logistics and Transportation Market Size to Reach USD 10,990 Million by 2026 at CAGR 10.8%. Valuates Reports. *Cision PR Newswire,* 2021 március 9. Online: https://prn.to/3M4suHf
[8] Drone Package Delivery Market to Hit USD 7,388.2 Million by 2027. *GlobeNewswire,* 2020. november 30. Online: http://bit.ly/3RCF3dK
[9] Fortune Business Insights, Drone Package Delivery Market Size. 2021. november. Online: www.fortunebusinessinsights.com/drone-package-delivery-market-104332
[10] Roca-Riu, M., Menendez, M., "Logistic Deliveries with Drones," in *19th Swiss Transport Research Conference* (STRC 2019), Ascona, Switzerland, 2019. május 15–17. Online: https://doi.org/10.3929/ethz-b-000342823
[11] Boukoberine, N. M., Zhou, Z., Benbouzid, M., "Power Supply Architectures for Drones – A Review," in *Proceedings of the IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society,* Lisbon, Portugal, 2019. október 14–17. Online: https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927702
[12] Yowtak, K., Imiola, J., Andrews, M., Cardillo, K., Skerlos, S., "Comparative Life Cycle Assessment of Unmanned Aerial Vehicles, Internal Combustion Engine Vehicles and Battery Electric Vehicles for Grocery Delivery," *Procedia CIRP,* 90. évf. pp. 244–250. 2020. Online: https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.003
[13] Aurambout, J. P., Gkoumas, K., Ciuffo, B., "Last Mile Delivery by Drones: An Estimation of Viable Market Potential and Access to Citizens Across European Cities," *European Transport Research Review,* 11. évf. 30. sz. pp. 1–21. 2019. Online: https://doi.org/10.1186/s12544-019-0368-2
[14] Kim, E., Long, K., Amazon's Prime Air Drone Deliveries to Cost $63 Per Package. *Business Insider,* 2022. április 7. Online: www.businessinsider.com/amazon-prime-air-drone-delivery-cost-63-per-package-2025-2022-4
[15] Samaras, C., Stolaroff, J., Is Drone Delivery Good for the Environment? *Smithsonian Magazine,* 2018. február 14. Online: www.smithsonianmag.com/innovation/drone-delivery-good-for-environment-180968157/
[16] How Drones are Reshaping Home Delivery. *Packaging Europe,* 2021. október 5. Online: https://packagingeurope.com/how-drones-are-reshaping-home-delivery/4009.article
[17] Magistretti, S., Dell'Era, C., "Unveiling Opportunities Afforded by Emerging Technologies: Evidences from the Drone Industry," *Technology Analysis & Strategic Management,* 31. évf. 5. sz. pp. 606–623. 2019. Online: https://doi.org/10.1080/09537325.2018.1538497
[18] A Bizottság (EU) 2019/947 végrehajtási rendelete (2019. május 24.) a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról
[19] European Union Aviation Safety Agency, Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947. 2019. október 9. Online: www.easa.europa.eu/en/acceptable-means-compliance-and-guidance-material-group/amc-gm-implementing-regulation-eu-2019947
[20] Demuyakor, J., "Ghana Go Digital Agenda: The Impact of Zipline Drone Technology on Digital Emergency Health Delivery in Ghana," *Shanlax International Journal of Arts, Science and Humanities,* 8. évf. 1. sz. pp. 242–253. 2020. Online: https://doi.org/10.34293/sijash.v8i1.3301

[21] Gangwal, A, Akshika J., Mohanta, S., "Blood Delivery by Drones: A Case Study on Zipline," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology,* 8. évf. 8. sz. pp. 8760–8766. 2019. Online: www.ijirset.com/upload/2019/august/63_Blood.PDF
[22] Everdrone: Delivering Critical Medical Care By Drone. *Tele 2 IoT,* é. n. Online: https://tele2iot.com/case/everdrone-delivering-critical-medical-care-by-drone/
[23] For the First Time in Medical History, An Autonomous Drone Helps Save the Life of a Cardiac Arrest Patient. *EverDrone,* 2022. január 4. Online: https://everdrone.com/news/2022/01/04/for-the-first-time-in-medical-history-an-autonomous-drone-helps-save-the-life-of-a-cardiac-arrest-patient/
[24] Lykou, G., Moustakas, D., Gritzalis, D., "Defending Airports from UAS: A Survey on Cyber-Attacks and Counter-Drone Sensing Technologies," *Sensors,* 20. évf. 12. sz. p. 3537. 2020. Online: https://doi.org/10.3390/s20123537
[25] Willassen, H. R., Loedding E., Knutsen, A., "Drones at Oslo Airport Norway: A Case Study on How to Balance Safety and Business Development," *Journal of Airport Management,* 14. évf. 3. sz. pp. 260–268. 2020. Online: https://ideas.repec.org/a/aza/jam000/y2020v14i3p260-268.html
[26] Pyrgies, J., "The UAVs Threat to Airport Security: Risk Analysis and Mitigation," *Journal of Airline and Airport Management,* 9. évf. 2. sz. pp. 63–96. 2019. Online: https://doi.org/10.3926/jairm.127
[27] Konert, A., Kasprzyk, P., "UAS Safety Operation – Legal Issues on Reporting UAS Incidents," *Journal of Intelligent & Robotic Systems,* 103. évf. 51. sz. 2021. Online: https://doi.org/10.1007/s10846-021-01448-5
[28] Shvetsova, S. V., Shvetsov, A. V., "Ensuring Safety and Security in Employing Drones at Airports," *Journal of Transportation Security* 14. évf. pp. 41–53 2021. Online: https://doi.org/10.1007/s12198-020-00225-z
[29] French, S., Is Amazon Drone Delivery Really All That Environmentally Friendly? *University of Washington,* 2020. október 6. Online: https://depts.washington.edu/sctlctr/news-events/in-the-news/amazon-drone-delivery-really-all-environmentally-friendly
[30] Delivery Drones: Sustainable or Not? *City Logistics,* 2020. november 24. Online: www.citylogistics.info/research/delivery-drones-sustainable-or-not/
[31] Yoo, W., Yu, E., Jung, J., "Drone Delivery: Factors Affecting the Public's Attitude and Intention to Adopt," *Telematics and Informatics,* 35. évf. 6. sz. 2018. pp. 1687–1700. Online: https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.04.014

The Challenges of the Emergence of Delivery Drones in the Aviation System

The use of unmanned aerial systems is emerging in several industrial sectors. New services are arising in the service industry that has not existed previously. Technology development makes it possible to use these kinds of devices not only for data collection but for the fulfilment of transport tasks. It is essential to present the challenges and the potential negative effects of the emergence and widespread of the devices. This article reveals and presents these problems with their possible solutions in detail.

Keywords: *drone delivery, freight transport, drone law, UAV, UAS, RPAS, drone regulations*

Dr. Sándor Zsolt
egyetemi docens
Tokaj-Hegyalja Egyetem
zsolt.sandor1@gmail.com
orcid.org/0000-0001-7117-9069

Zsolt Sándor, PhD
Assistant Professor
University of Tokaj
zsolt.sandor1@gmail.com
orcid.org/0000-0001-7117-9069

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
34. évfolyam (2022) 3. szám 47–57. • DOI: 10.32560/rk.2022.3.4

Sándor Zsolt, Pusztai Máté

Pilóta nélküli légi járművek a mezőgazdaság szolgálatában – a hazai hatósági szabályozási keretrendszer

A pilóta nélküli légijármű-rendszerek mezőgazdasági célú felhasználása jelentős potenciállal rendelkező iparági terület. Ennek szabályozását számos hazai és EU-s jogszabály együttesen biztosítja. A felhasználás érdekében ezekkel tisztában kell lenni, és eltérő tényezőket kell figyelembe venni az engedélyezési eljárások során, attól függően, hogy pontosan mi is az adott művelet célja. Jelen cikkben a szerzők ezt a témakört járják körbe, és bemutatják, hogy az összetett szabályozás alapján a felhasználóknak a művelet jellegétől függően milyen kötelezettségeket kell teljesíteniük.

Kulcsszavak: *mezőgazdasági drónhasználat, permetezés, speciális kategória, drónszabályozás, kijuttatási művelet, monitoringművelet, pilóta nélküli légi jármű*

1. Bevezetés

A mezőgazdaság, és azon belül is a precíziós gazdálkodás az a terület, ahol a legnagyobb igény mutatkozik a pilóta nélküli légi jármű-rendszerek (UAS) használatára. Alkalmazásuk révén jelentősen növelhető a termés mennyisége és minősége, lehetőség van kedvezőtlen talajállapotok esetén is elvégezni a növényvédelmi beavatkozásokat, és összességében kedvezőbb üzemeltetési megoldásokat nyújtanak, mint a hagyományos, földi eszközök egy adott méretgazdaságossági határon belül.

A sok előny hatékony kihasználása érdekében ismerni kell azokat a szabályozási kereteket, amelyek mentén az ilyen jellegű műveletek végrehajthatók. A pilóta nélküli légi járművek (közismertebb nevükön drónok, vagy UAV-k) a légi közlekedés aktív szereplői, mivel ugyanazt a légteret használják, mint a hagyományos pilótával rendelkező eszközök. Így ezen eszközök mezőgazdasági felhasználása során figyelembe kell venni, hogy több hatósági követelménynek is meg kell felelni (légi közlekedési és mezőgazdasági), amelyeket különböző jogszabályok írnak elő és egymástól függetlenül működő hatóságok rendelnek el.

Jelen cikkükben a szerzők ezt az összetett szabályozási struktúrát mutatják be, rávilágítva arra, hogy a mezőgazdasági, növényvédelmi és légi közlekedési rendelkezések hol és hogyan érnek össze, mik a kapcsolódási pontok, és a feladatok elvégzése érdekében milyen követelmények együttes kielégítése szükséges.

2. Peremfeltételek és az alapvető szabályok

A mezőgazdasági célokat szolgáló művelet, ha azt légi járművel (például drónnal) látják el, akkor légi tevékenységnek minősül, mivel a művelet elvégzése során a drón ugyanazt a légteret használja, amelyet a hagyományos légi járművek is. Emiatt be kell tartani a légi közlekedés biztonságát szolgáló szabályokat is, hogy minimalizálni lehessen az esetleges összeütközési kockázatot, amely abból származik, hogy fennáll a lehetősége, hogy egy helyen, egy időben a drón mellett egy másik – hagyományos vagy szintén pilóta nélküli – légi jármű is megjelenik.

Ez azt jelenti, hogy a tevékenység ellátása során nemcsak a mezőgazdasági/növényvédelmi szabályozási követelményeket, hanem a légi közlekedésre vonatkozókat is be kell tartani. Emiatt összetettebbé válnak a folyamatok.

A mezőgazdaságban a drónokat jellemzően két fő feladat ellátására lehet alkalmazni:

- monitoringtevékenység, amely során a drón egy adott terület feletti átrepüléssel gyűjt adatokat optikai úton, vagy
- növényvédelmi és talajerő-gazdálkodási tevékenység, amely során a drón növényvédő szert, termésnövelő anyagot vagy vetőanyagot juttat ki a kezelendő földterületre.

E feladatokon túl még megjelenhetnek olyan speciális drónnal végzett feladatok is, mint például a termés begyűjtése, ültetés stb. Ezek egy-egy jól behatárolt feladatot jelentenek, amelyek egyedi céleszközöket igényelnek, és az univerzális felhasználás nem, vagy csak igen korlátozott módon megoldott. Jelen cikkben ezeket a területeket nem mutatjuk be, azonban a felhasználás tekintetében az általános hatósági elvek itt is alkalmazhatók.

2.1. Légi közlekedési szabályok

2.1.1. Repülési műveletek elvégzésére vonatkozó követelmények

A légi közlekedési szabályok közül a legfontosabb a 2021. év eleje óta hatályos (EU) 2019/947 végrehajtási rendelet, amely alapvetően meghatározza, hogy pilóta nélküli légi járművel mikor, hol és hogyan lehet repülni, azaz úgynevezett UAS-műveletet végrehajtani [1]. EU-s jogszabály lévén ez hazánkban közvetlenül és kötelezően alkalmazandó minden olyan légtérhasználóra, aki pilóta nélküli légi járművel repül.

Attól függően, hogy milyen műveletet és azt mekkora pilóta nélküli légi járművel hajtják végre, a művelet az úgynevezett „nyílt" vagy „speciális" műveleti kategóriába fog tartozni. Az 1. táblázat összefoglalja a két műveleti kategória főbb sajátosságait – kiemelten a mezőgazdasági célú felhasználás szempontjából.

Lényeges, hogy a „nyílt" kategóriában azokat a műveleteket – amennyiben a kategória peremfeltételein belül maradnak – lehetőség van további uniós jog szerinti műveleti engedélyek megszerzésének kötelezettsége nélkül végrehajtani. Ugyanakkor az általános légi közlekedési szabályok betartása – figyelembe véve az egyéb hazai szabályokat is például környezetvédelmi szempontból korlátozott légtérben való repülés, eseti légtérre vonatkozó kötelmek stb. – a nyílt kategóriában is irányadó. Amennyiben valamely művelet a „nyílt" kategória feltételei szerint nem végrehajtható, akkor „speciális" kategóriájúnak minősül, és ebben az esetben

már műveleti engedélyt kell szerezni rá. Ilyenkor azoknak a feltételeknek is eleget kell tenni, amelyek a műveleti engedély megszerzéséhez szükségesek. Erről részleteiben később lesz szó.

1. táblázat
A „nyílt" és „speciális" műveleti kategóriák közötti főbb különbségek [a szerzők]

Vizsgálandó szempont	„Nyílt" műveleti kategória	„Speciális" műveleti kategória
UAV maximális felszállótömege	Csak 25 kg alatti* UAV-val lehet a műveletet végrehajtani	Lehetőség van 25 kg vagy a feletti drónnal is műveletet végrehajtani
Látótávolságon belüli (VLOS) vagy látótávolságon túli üzem (BVLOS) és vezérlési mód	VLOS és manuális vezérlés, ahol lehetősége van a pilótának folyamatosan beavatkoznia a repülésbe	BVLOS és / vagy autonóm működés
Földfelszín feletti maximális magasság	Maximum 120 m	120 m feletti művelet
Anyag kijuttatása	Nem lehetséges	Lehetőség van rá, mezőgazdasági művelet esetében a megfelelő külön engedélyek birtokában
Szükséges minimumkompetenciák (légi közlekedési szempontból)	UAS.OPEN.020 szerinti vizsga vagy kompetenciatanúsítvány	kompetenciatanúsítvány + egyéb távpilóta-kompetenciák (kijuttatás esetén)

(* Megjegyzés: Az [EU] 2019/945 felhatalmazáson alapuló rendelet által szabályozott osztályazonosító címkék megjelenésével a C4 UA osztályban a 25 kg-ot is elérheti majd a nyílt kategóriában üzemeltethető drónok legnagyobb felszállótömege.)

Amennyiben monitoringfeladatokat kívánnak ellátni pilóta nélküli légi járművel, akkor az a legtöbb esteben elvégezhető a „nyílt" műveleti kategóriáinak megfelelően. Ebben az esetben a megfelelő védőtávolságok, magassági korlátok és az általános biztonsági szabályok betartásával, a műveletre vonatkozó előzetes műveleti engedély nélkül is végre lehet hajtani a repülést – természetesen minden egyéb vonatkozó követelmény betartásával (például távpilóta-kompetenciák, megfelelő eszköz választása, lakott területtől kellő távolságban, kötelező biztosítások stb.).

Amennyiben a „nyílt" kategóriára vonatkozó követelmények egyike valamilyen oknál fogva nem teljesíthető, akkor a műveletet a „speciális" kategóriára vonatkozó feltételek szerint kell végrehajtani. Ennek oka, hogy a „nyílt" kategóriára vonatkozó feltételek konjunktívak, azokat egyszerre és együttesen kell teljesíteni.

Ezzel szemben, ha olyan műveletet szeretne végrehajtani a felhasználó, ahol már valamilyen anyag kijuttatása valósul meg a drónról, akkor az minden esetben „speciális" kategóriájú műveletnek minősül. Mivel ezek a műveletek magasabb repülésbiztonsági kockázattal rendelkeznek, így ezekre jóval szigorúbb szabályok vonatkoznak, és a felhasználónak előzetesen számos követelményt kell teljesítenie, és a művelet csak a légi közlekedési hatóság által kiadott engedély birtokában hajtható végre, továbbá a művelet elvégzése során figyelembe kell venni a kijuttatásra vonatkozó növényvédelmi előírásokat is (például növényvédő szerre vonatkozó védőtávolságok, keverési koncentráció stb.).

„Speciális" kategóriájú műveleteket kétféle engedély birtokában lehet végezni:

- *műveleti engedéllyel,* amely lehet:
  - *konkrét hatályú/egyedi műveleti engedély:* az UAS üzemben tartó számára csak az engedélyben egyedileg meghatározott földrajzi helyszín(ek)en biztosít lehetőséget – adott esetben több azonos jellegű – UAS-művelet elvégzésére;

  - *általános hatályú:* az UAS üzemben tartó számára lehetővé teszi az engedély érvényességi időtartamán belül korlátlan számú művelet elvégzését az általános földi és légi jellemzőkkel meghatározott területeken – azon lehetséges helyszínek összessége, amelyek a hatóság által elfogadott földi és légi kockázatokra vonatkozó korlátoknak eleget tesznek (például népsűrűség, légtérosztály, maximális repülési magasság, szomszédos légterek minimális távolsága stb.);
- *könnyű UAS üzemben tartói tanúsítvány (LUC) birtokában,* amely felruházza annak birtokosát (UAS üzemben tartót), hogy a tanúsítvány keretében meghatározott művelettípusokat a hatóság által megszabott kockázati határokon belül, saját hatáskörben, hatósági közreműködés nélkül engedélyezze a saját repülési műveletek tekintetében. Ennek megszerzéséhez az UAS üzemben tartónak megfelelő műveleti eljárásokat kell kidolgoznia – úgynevezett üzemeltetési kézikönyvet, vagy LUC-kézikönyvet –, és az engedélytípust kiállító légi közlekedési hatóság felé igazolnia kell kompetenciáit, ami kiterjed az UAS üzemben tartó szervezetére, az általa alkalmazott képzésekre, az elsajátított kompetenciákra, az eszközök használatának módjára és még több területre, amelyek közül az egyik legfontosabb a művelet lebonyolításához kapcsolódó kockázatok kezelésének módja.

Mind a két engedélytípusnál egy-egy műveletre vonatkozóan kiadnak egy műveleti engedélyt, csak a kibocsátó fél eltérő. Hagyományos műveleti engedélynél a légi közlekedési hatóság, LUC esetén az UAS üzemben tartója engedélyezi a műveletet.

Bármelyik megoldást is alkalmazzák, az adott engedélytípus megszerzését megelőzi az UAS üzemben tartó megfelelő felkészülése, az eljárások dokumentálása és mindezek hatóság általi ellenőrzése. Egy-egy adott művelet engedélyezését minden esetben megelőzi egy részletes és jól dokumentált kockázatelemzés, ahol az UAS üzemben tartójának számba kell vennie az összes földi és légi kockázatot, és amennyiben ezek relevánsak, akkor kockázatcsökkentő intézkedéseket kell alkalmazni, hogy mértékük – a hatóság által is jóváhagyott – elfogadható szintre csökkenjen. Az intézkedések összetettsége és szigorúsága függ a helyszín elhelyezkedésétől, tagoltságától, az ott potenciálisan felbukkanó külső (a műveletbe nem bevont) személyek számától, az akadályoktól (például távvezeték, szélturbina stb.), az alkalmazott eszköz típusától és a mesterséges infrastruktúrák közelségétől is (lakóépületek, utak és vasútvonalak közelsége stb.). A kockázatelemzés során meg kell határozni a kötelező védőtávolságokat, ahol a művelet elvégzése során biztosítani kell, hogy oda a műveletben részt nem vevő személy ne tudjon bejutni. Továbbá olyan műszaki és egyéb operatív védelmi intézkedéseket is alkalmazni kell, amelyek szavatolják, hogy probléma esetén se legyenek veszélyben a műveletbe nem bevont személyek.

Az EU-s szabályozás értelmében a kereskedelmi tevékenységet végző drónos permetezést végző – de akár a monitoringtevékenységet ellátó – UAS üzemben tartónak 750 000 SDR[1] fedezetű kötelező felelősségbiztosítással kell rendelkeznie. Fontos, hogy a kijuttatást végző drón üzemeltetése esetén mindig az uniós biztosítási követelményeknek kell megfelelni, függetlenül a kereskedelmi cél meglététől, ugyanis a piacon elérhető legkisebb permetező drón tömege is meghaladja a 20 kg-os jogszabályi határt [2].

[1] Special Drawing Rights, azaz „Különleges Lehívási Jogok" – speciális konverziós pénznem.

A hivatkozott EU-s jogszabályokat kiegészítik a hazai jogszabályok, amelyek arról rendelkeznek, hogy a magyar légteret hogyan vehetik igénybe ezek az eszközök, és milyen további kötelezettségei vannak a felhasználóknak. Ezek vonatkoznak eseti légtér kijelölési kötelezettségére, nyilvántartásba vételi vagy képzési kötelezettségekre [8], [9], [10].

A műveletet csak a légi közlekedési hatóság által nyilvántartásba vett eszközzel lehet elvégezni, és a pilóta nélküli eszközön ezt az úgynevezett nyilvántartási jelet az UAS üzemben tartó egyedi nyilvántartási azonosítójával együtt fel kell tüntetni.

2.1.2. Pilóta nélküli légi járművekre vonatkozó műszaki követelmények

A repülési műveletek elvégzésére vonatkozó szabályokon túl, a pilóta nélküli légi járművekre is vonatkoznak EU-s szabályok, amelyek olyan műszaki követelmények, amelyeket a légi közlekedés biztonsága érdekében kell kielégítenie minden, az EGT területén forgalomba hozott eszköznek – például kötelező tanúsítások, CE jelölés, vagy adott esetben az osztályazonosító címkék elhelyezése. Ezeket az (EU) 2019/945 felhatalmazáson alapuló rendelete szabályozza [3]. A rendeletben lefektetett szabályok betartása a gyártó, importőr, forgalmazó felelőssége – így a forgalomba hozott eszközök már kielégítik a követelményeket –, ezáltal a felhasználónak nem szükséges a jogszabály részleteivel foglalkoznia. Felhasználói oldalon leginkább e követelmények megvalósulásának ellenőrzése jelenik meg, amely jellemzően a CE és az egyéb jelölések meglétére és azok valódiságának ellenőrzésére korlátozódik.

2.1.3. Személyikompetencia-követelmények

A pilóta nélküli légi járműveket vezető személyeket távpilótáknak hívják. Ahhoz, hogy valaki távpilótaként a „nyílt" kategórián belüli műveletet tudjon végrehajtani, vizsgával igazolt elméleti ismeretekkel kell rendelkeznie. A művelet komplexitásától függően elengedő lehet egy alapszintű vizsga[2] (például ha 500 g-nál kisebb drónnal repül, vagy csak az emberektől és infrastruktúráktól legalább 150 m-es távolságban szeretné használni az esetleg ennél nagyobb UAV-ot, illetve, ha jövőben C0 vagy C1 osztályazonosítóval ellátott eszközt szeretne használni), vagy az alapszintű vizsgán túl még további elméleti ismeretekre is szükség van, ha kockázatosabb műveleteket szeretne a távpilóta végrehajtani. Utóbbi eset az, amikor emberekhez közel szeretné használni a 2 kg-nál kisebb UAV-ot, esetleg C2-es osztályazonosítóval ellátott eszközt. Ebben az esetben kiegészítő vizsgára van szükség. A kiegészítő vizsgával szerezhető meg a távpilóta kompetenciatanúsítvány,[3] amely az EU-ban és így hazánkban is jelenleg a legmagasabb távpilóta képzettséget jelenti [1].

„Speciális" kategóriájú műveletek során a távpilótáknak kompetenciatanúsítvánnyal kell rendelkezniük, ugyanis a műveletek már olyan komplexitásúak, amelyek igénylik a magasabb szintű ismeretek igazolt elsajátítását, amit a hatóság is megkövetel.

Amennyiben a művelet során növényvédő szert is kijuttat, akkor szükség van a 6/2021. (II. 5.) ITM rendeletben szereplő pilóta nélküli légi jármű irányítói igazolványra és a következő

[2] UAS.OPEN.020 szerinti vizsgaigazolás.
[3] UAS.OPEN.030.

fejezetben ismertetett növényvédelmi képzés elvégzésére is [4]. Előbbi megszerzéséhez el kell végezni a drónpilóta-tanfolyamot – egy, a légi közlekedési hatóság által akkreditált szervezetnél –, amely képzés elméleti és gyakorlati részből áll. Ezt követően van lehetőség az elméleti és gyakorlati részből a KAV Közlekedési Alkalmassági és Vizsgaközpont Nonprofit Kft.-nél vizsgázni. A vizsga révén megszerzett úgynevezett pilóta nélküli légi jármű irányítói igazolvány érvényességi ideje öt év, a sikeres vizsga napjától számítva.

2.2. Növényvédelmi szabályok

A pilóta nélküli légi járművekkel végzett mezőgazdasági műveletek keretét agráripari szempontból két hazai jogszabály határozza meg. A 44/2005. (V. 6.) FVM–GKM–KvVM együttes rendelet a tevékenység elvégzésére vonatkozóan határoz meg szabályokat, míg a 43/2010. (IV. 23.) FVM rendelet a tevékenység elvégzését lehetővé tevő eszközök műszaki követelményeit fekteti le [5], [6].

2.2.1. Légi növényvédelmi beavatkozás elvégzésére vonatkozó szabályok

Mezőgazdasági repülés keretében fel lehet használni pilóta nélküli légi járműveket is annak érdekében, hogy mező- vagy erdőgazdasági célú, növényvédő szerrel, növényvédő szernek nem minősülő növényvédő hatású termékkel vagy termésnövelő anyaggal végzett növényvédelmi, tápanyag-gazdálkodási tevékenységet folytassanak, és így a légi járműről ilyen anyagok kijuttatása a kezelendő terület felett megvalósuljon.

Lényeges, hogy a légi permetezést csak meghatározott körülmények fennállása esetén lehet alkalmazni. Ezek az alábbiak:

- olyan környezeti, természeti állapot merül fel, amely a légi permetezésen kívüli más növényvédelmi módszerrel eredményesen nem hárítható el, vagy
- a légi permetezés előnyösebb a földi úton való kijuttatással szemben, az egészségre és a környezetre gyakorolt kisebb hatása miatt.

Csak a pilóta nélküli légi járművel való kijuttatásra engedélyezett növényvédő szer és növényvédő szernek nem minősülő növényvédő hatású termék juttatható ki, amelyre a légi kijuttatási engedélyokirat elérhető. Ettől eltérni csak akkor lehet, ha rendelkezésre áll szükséghelyzeti vagy kísérleti engedély, összhangban az 1107/2009/EK európai parlamenti és tanácsi rendelettel [7].

A művelet végrehajtásához a légi műveletet felügyelő szakirányítónak kijuttatási tervet kell készíteni, amelyet a tervezett művelet előtt legalább 30 nappal kérelem formájában el kell juttatni az illetékes megyei kormányhivatalhoz. Ettől eltérni csak indokolt esetben lehet, illetve bizonyos veszélyek megjelenése esetén e nélkül is el lehet végezni a műveletet, megfelelő indoklás esetén.

A kijuttatási terv szerinti – vagy adott esetben az attól eltérő, esetleg annak hiányában végrehajtott – permetezést vagy légi növényvédelmi beavatkozást, a műveletet megelőző munkanap reggel 9 óráig be kell jelenteni az illetékes megyei kormányhivatalnak. A leadott dokumentumon fel kell tüntetni a légügyi szempontból lényeges adatokat is.

Amennyiben szükséges, úgy méhkímélő technológia alkalmazása kötelező.

A légi kijuttatási műveletet legalább két főnek kell végrehajtani. Ebből az egyik a távpilóta, a másik pedig a repülésfigyelő, aki a távpilótát segíti a helyszín folyamatos figyelemmel tartásával, hogyha olyan körülmény áll elő, akkor a távpilóta a műveletet fel tudja függeszteni. Ez összhangban van a légi közlekedési szabályok során azzal, amikor megfigyelő segíti a távpilótát.

A művelet elvégzése során a növényvédelmi szempontból alkalmazandó védőtávolságokat be kell tartani, amelyek adott esetben szigorúbbak is lehetnek, mint a légi közlekedés biztonsági szempontjából, a kockázatelemzés során meghatározott védőtávolság. Ezen túl a meteorológiai szempontokat és korlátokat is figyelembe kell venni, valamint azt is, hogy az UAV útvonala bizonyos területek felett nem vezethet át (például fokozottan védett természeti terület, erdőrezervátum vagy bioszféra-rezervátum magterülete stb.).

2.2.2. Légi növényvédelmi beavatkozást végző eszközre vonatkozó műszaki követelmények

A hatályos hazai jogszabályoknak megfelelően növényvédelmi beavatkozásra csak forgalomba hozatali engedéllyel rendelkező eszköz használható. Ennek azonban előfeltétele, hogy a kijuttatást végző részegységet (amely lehet eltávolítható, vagy nem) cseppképzés és szórástechnikai szempontból típusminősítési eljárás alá kell vetni. A típusminősítési eljárás magára a kijuttató eszközre vonatkozik, amely a permetszer kijuttatását végzi – a drón ilyen szempontból maga az a platform, amely a kijuttatóeszközt hordozza. A minősítés megszerzése a gyártó vagy a forgalmazó feladata, aki nemcsak az új, hanem a már forgalomba hozott eszközökre is megszerezheti ezt utólagosan.

Az eljárást a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem (MATE) folytatja le a gyártó vagy a forgalmazó kezdeményezésére.

A felhasználó felelőssége ellenőrizni, hogy az általa használt gép rendelkezik-e ilyennel, vagy sem. Az engedéllyel rendelkező eszközök listájáról információ a MATE Egyetemi Laborközpontjának honlapján található,[4] a *Forgalomba Hozatalra Engedélyezett Növényvédelmi Gépek Jegyzéké*ben, ahol szerepelnek a típusminősítésen átesett UAS-ok. Lényeges, hogy a cikk írásának idején már szinte az összes népszerű permetező UAS rendelkezik típusminősítéssel, aminek oka, hogy az engedély megszerzésének kötelezettsége minden, legalább 5 dm^3 űrtartalmú tartállyal ellátott berendezés esetén fennáll, és a dróniparban egyfajta sztenderd, hogy minimum 10 literes tartállyal szerelik fel a drónokat.

A típusminősítési eljárás pontos követelményeit a vonatkozó 43/2010. FVM rendelet tartalmazza [6].

2.2.3. Személyikompetencia-követelmények

A növényvédelmi kompetenciákról a 44/2005. (V. 6.) FVM-GKM-KvVM együttes rendeletben található részletes információ [5]. A rendelet alapján pilóta nélküli légi járművel történő, kijuttatással járó növényvédelmi beavatkozást csak olyan személy végezhet, aki szerepel a pilóta

[4] Lásd: https://uni-mate.hu/egyetemi-laborkozpont

nélküli légi járművel való légi-mezőgazdasági munkavégzésre jogosultak nyilvántartásában. Ebbe az adatbázisba csak akkor kerülhet be a távpilóta, ha:

1. elvégezte a NÉBIH által erre kijelölt szervezet által szervezett pilóta nélküli légi járműves növényvédelmi alapképzést. Ez egy elméleti és gyakorlati képzésből álló tanfolyam, amelyet akkreditált szervezetek tarthatnak (a tanfolyam vizsgával zárul);
2. rendelkezik a már említett pilóta nélküli légi jármű irányítói igazolvánnyal.

Az első pontban említett képzés előfeltétele, hogy a leendő távpilóta rendelkezzen az (EU) 2019/947 végrehajtási rendelet szerinti online vizsgaigazolással vagy távpilóta kompetenciatanúsítvánnyal. Utóbbi akkor is szükséges, ha a művelet kijuttatást nem érint, azonban az „speciális" kategóriájú műveletként lesz végrehajtva. Ezen túl előfeltétel még a B kategóriás jogosítványhoz szükséges egészségügyi alkalmasság, valamint 80 órás „zöldkönyves" növényvédelmi teljesítését igazoló okmány megléte.

Lényeges, hogy a pilóta nélküli légi járműves növényvédelmi alapképzést kétévenként, vizsgával végződő növényvédelmi szakmai továbbképzés keretében kell megújítani, amit a NÉBIH által erre kijelölt szervezetnél lehet elvégezni.

3. A légi közlekedési és növényvédelmi szabályok összekapcsolódása

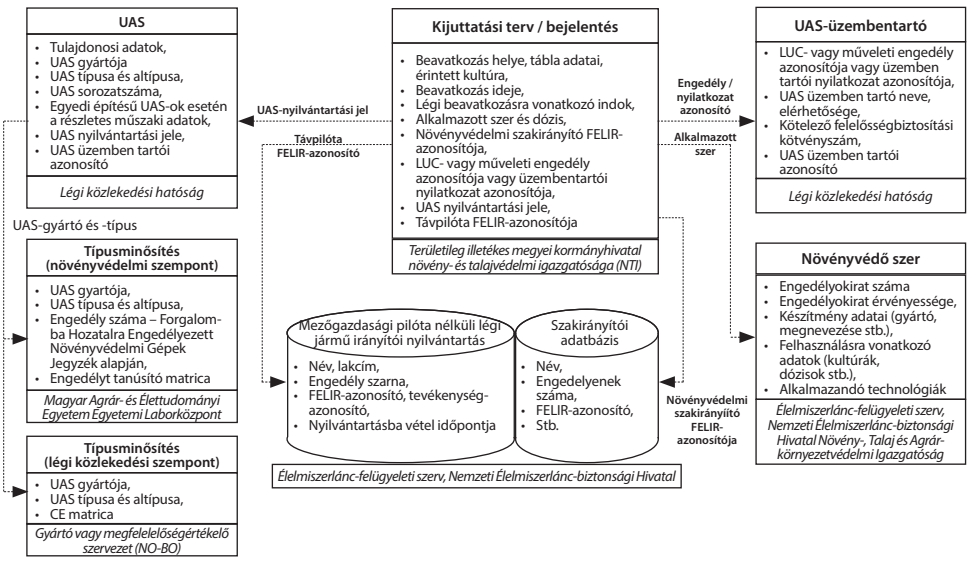
A különböző szabályozási elemek a növényvédelmi beavatkozás előzetes bejelentésében érnek össze, amikor is a szakirányító a 44/2005. együttes rendelet alapján a légi mezőgazdasági beavatkozást a megelőző munkanap délelőtt 9 óráig bejelenti az érintett megyei kormányhivatalnak. A bejelentésnek a mezőgazdasági adatokon túl tartalmaznia kell a légi közlekedési hatóság által kiadott engedélytípusok valamelyikének egyedi azonosítóját és a műveletet végrehajtó UAS egyedi nyilvántartási jelét is. Előbbi lehet az UAS üzemben tartó LUC-engedélyének vagy a műveleti engedélyének azonosítója.

Ez a jogi passzus megköveteli, hogy a beavatkozáshoz álljon rendelkezésre műveleti engedély vagy LUC-tanúsítvány, mert ezek hiányában a bejelentést nem is lehet megtenni, és így a pilóta nélküli légi járművel végzendő növényvédelmi repülési művelet nem is megvalósítható. A jogszabály hivatkozott pontja – a bejelentés kötelező tartalmi elemei – biztosítja, hogy a légi közlekedési és növényvédelmi biztonsági célok együttesen jussanak érvényre, ugyanis a művelet megvalósításához ezek együttes kielégítése szükséges.

Az 1. ábra bemutatja az egyes kapcsolatokat, szemléltetve azt is, hogy mely nyilvántartás vezetéséért mely hatóság felelős.

A fejezetben hivatkozott jogszabály alapján a szakirányítónak munkatérképet kell készítenie, amelyet a műveletet megelőzően a távpilótának át kell adnia. Légi közlekedési szempontból a kockázatelemzés során kell a művelettel érintett területet felmérni, és értékelni az ott található akadályokat, kijelölni a fel- és leszállóhelyeket a kötelező védőtávolságokkal együtt, és ezt vizuális formában megjeleníteni. Így e két folyamat összefonódik, azzal a különbséggel, hogy légi közlekedési szempontból a folyamatot az UAS üzemben tartójának kell elvégeznie. A folyamatok ezáltal feltételezik, hogy a szakirányító és az UAS üzemben tartó közös munkával alakítja ki a kezelendő területen a védőtávolságokat, és közösen határozzák meg, hogy milyen

kockázatcsökkentő intézkedéseket alkalmaznak majd. Ebből is látható, hogy a két tervezési folyamat szervesen összefonódik, önállóan nem tudnak érvényre jutni.



1. ábra
Légi közlekedési és növényvédelmi adatok összekapcsolódásának módja [a szerzők]

Lényeges, hogy a pilóta nélküli légi járművel végzett mezőgazdasági célú repülés során a növényvédelmi és a repülési szabályokat is be kell tartani, és amennyiben az egyik az adott helyre szigorúbb követelményeket támaszt, akkor azt kell alkalmazni.

4. Összefoglaló

A pilóta nélküli légi járművekkel végzett növényvédelmi és talajerő-gazdálkodási tevékenységek a jövőben egyre hangsúlyosabbak lesznek, mivel általuk jelentős erőforrást lehet megtakarítani. Általuk gyorsabb, könnyebb és célzottabb beavatkozást lehet végrehajtani, mint a földi megoldásokkal.

Azonban a tevékenységekhez tartozó szabályozási elemek számos részből tevődnek össze, és a feladatok ellátásához ezek mindegyikét maradéktalanul ki kell elégíteni. A cikkben bemutatott kötelezettségek igen jelentős része a felhasználókat terheli, míg kisebb része az ilyen eszközök forgalmazóit.

Lényeges, hogy a felsorolt engedélyek megszerzése kötelező annak érdekben, hogy a felhasználás jogszerű legyen. Ezek jelentős időszükséglettel rendelkeznek, így nem árt, ha az UAS üzemben tartója már előre megtervezi tevékenységeit, és ennek megfelelően szerzi be a szükséges dokumentumokat.

Irodalomjegyzék

[1] A Bizottság (EU) 2019/947 végrehajtási rendelete (2019. május 24.) a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról
[2] Az Európai Parlament és a Tanács 785/2004/EK rendelete (2004. április 21.) a légifuvarozókra és légi járművek üzemben tartóira vonatkozó biztosítási követelményekről
[3] A Bizottság (EU) 2019/945 felhatalmazáson alapuló rendelete (2019. március 12.) a pilóta nélküli légi jármű-rendszerekről és a pilóta nélküli légi jármű-rendszerek harmadik országbeli üzembentartóiról
[4] 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
[5] 44/2005. (V. 6.) FVM-GKM-KvVM együttes rendelet a mező- és erdőgazdasági légi munkavégzésről
[6] 43/2010. (IV. 23.) FVM rendelet a növényvédelmi tevékenységről
[7] Az Európai Parlament és a Tanács 1107/2009/EK rendelete (2009. október 21.) a növényvédő szerek forgalomba hozataláról valamint a 79/117/EGK és a 91/414/EGK tanácsi irányelvek hatályon kívül helyezéséről
[8] 1995. évi XCVII. törvény a légi közlekedésről
[9] 4/1998. (I. 16.) Korm. rendelet a magyar légtér igénybevételéről
[10] 26/2007. (III. 1.) GKM-HM-KvVM együttes rendelet a magyar légtér légi közlekedés céljára történő kijelöléséről

Unmanned Aerial Vehicles in the Service of Agriculture – The Hungarian National Agricultural Regulatory Framework

The use of unmanned aerial vehicle systems for agricultural purposes is a new industrial topic with significant potential. This application area is regulated by several domestic and EU legislation jointly. To use the UASs in this field, the regulation background must be known by the user and the different application factors should be taken into account during the authorisation of the planned missions, depending on the purpose of the given operation. In this article, the authors present this topic. User's obligations are revealed, which originated from the nature of the operations.

Keywords: *agricultural drone usage, drone legislation, monitoring mission, spray missions, UAV, UAS*

Dr. Sándor Zsolt egyetemi docens Tokaj-Hegyalja Egyetem zsolt.sandor1@gmail.com orcid.org/0000-0001-7117-9069	Zsolt Sándor, PhD Assistant Professor University of Tokaj 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
34. évfolyam (2022) 3. szám 59–76. • DOI: 10.32560/rk.2022.3.5

Csató Péter, Óvári Gyula

A hidrogén felhasználásának jelene és jövője a repülésben

Az elmúlt években rendkívüli mennyiségű üvegházhatású gáz jutott a légkörbe, aminek jelentős része a repüléshez köthető. A jelenleg használt, egyre csökkenő mennyiségben elérhető fosszilis energiahordozók kiváltására az egyik legígéretesebb alternatíva a hidrogén. Hajtóanyagként hagyományos gázturbinás hajtóművekben, belső égésű motorokban és protonáteresztő membrános üzemanyagcellában is felhasználható energiatermelésre. Azonban a hidrogén tárolása, szállítása és a légi járműbe való betöltése sok esetben nehézkes vagy még nem megoldott feladat. Számos terv született azonban e problémák megoldására, amelyek kivitelezése, 2030-as és 2050-es határidők mellett, jelenleg is folyamatban van. E cikk célja, hogy átfogó képet adjon az eddig elért eredményekről, és előrevetítse a hidrogén felhasználásának lehetséges jövőjét.

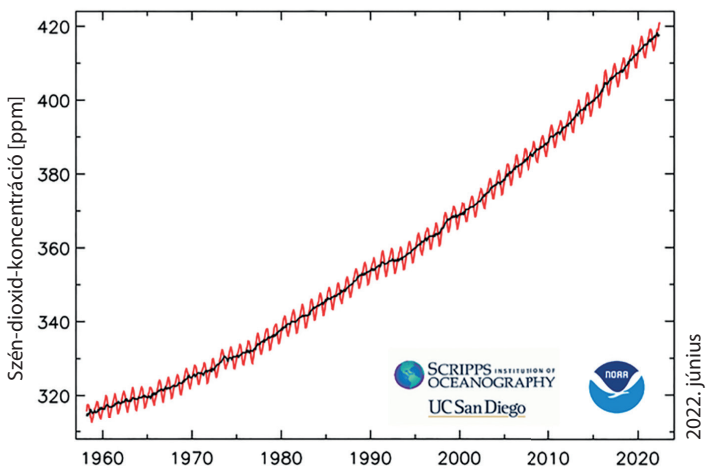
Kulcsszavak: *üzemanyagcella, hidrogén, powerpaste, dekarbonizálás, repülés, kriogén*

1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedek során a repülőeszközök – a kor kívánalmainak megfelelően – rendkívüli ütemben fejlődtek. Azonban hajtóanyagaik továbbra is fosszilis energiahordozók származékai, amelyek kitermelhető mennyisége véges. Emellett jelenleg világviszonylatban az átlagos napi nyersolajszükséglet 93 103 millió hordó. Becslések szerint ilyen mértékű fogyasztás esetén 47 évre elegendő a kitermelhető mennyiség. Azonban nem szabad megfeledkezni a folyamatosan növekvő energiaigényről akár az ipar, akár a közlekedés szempontjából, aminek kielégítése ezt az időtartamot folyamatosan csökkenti. Továbbá a rendelkezésre álló kőolaj kitermelhetőségét, valamint az árak várható alakulását a fogyasztói igények változása mellett számottevően befolyásolhatják egyéb gazdasági, politikai hatások. Ilyen például a jelenlegi nemzetközi konfliktusokban részt vevő felek katonai szükségleteinek jelentős növekedése, nem beszélve a közel-keleti olajtartalékok hovatartozásának kérdéséről. Emellett az ázsiai nagyhatalmak növekvő energiaigénye miatt folyamatosan bővülő kereslet is jelentős árfelhajtó hatást okoz [14].

A megemelkedett kőolaj-felhasználás hatására az elmúlt évtizedekben eddig még nem tapasztalt mennyiségű szén-dioxid jutott a légkörbe. Az emberi tevékenység következtében az éves kibocsátás az Európai Bizottság és a Holland Környezetvédelmi Ügynökség által 2022-ben kiadott EDGAR-adatbázis alapján 37 857 580 000 t [11]. Egyéb, még erősebb üvegházhatású gázok, például a metán, nem szerepelnek ezen adatok között. Ezek a gázok, a szén-dioxiddal

együtt a bolygó felszínéről kisugárzó hőt, amely egyébként az űrbe kerülne, a légkörbe zárják, annak folyamatos felmelegedését okozva, ami különböző szélsőséges időjárási hatásokat eredményez. Az üvegházhatású gázok szennyezése a világ óceánjaira gyakorolt hatásai közé tartozik a tengervíz felszínének emelkedő hőmérséklete, a tengerszint emelkedése, valamint a fokozott szénabszorpció, ami savasabbá teszi a tengervizet, és az óceánok oxigénszintjének csökkenéséhez vezet, ezzel megnehezítve egyes tengeri élőlények túlélését. Az ipari forradalmat megelőzően az emberi civilizáció közel 6000 évében a szén-dioxid szintje folyamatosan 280 ppm körüli érték volt (azaz, a levegő minden egymillió molekulájából 280 szén-dioxid-molekula volt). 2022 májusában ez a mutató elérte a 420 ppm értéket (1. ábra), és fokozatosan közelíti a 450 ppm visszafordíthatatlansági küszöbértéket [4].



1. ábra
A Föld légköre CO_2-koncentrációjának változása (Hawaii, Mauna Loa állomás) [4]

Az éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi munkacsoport (IPCC) legfrissebb adatai szerint a légi közlekedés (belföldi és nemzetközi) felel az emberi tevékenység által generált szén-dioxid-kibocsátás 2%-áért (840 000 000 t) [8]. A repülés várható növekedési ütemét figyelembe véve azonban a kibocsátott szén-dioxid mennyisége a következő 30 évben, további intézkedések nélkül, meg fog duplázódni. Azonban a repülés környezetkárosító hatása ennél jóval nagyobb arányú, hiszen a repülőgépek általános üzemelési magasságán, a sztratoszféra határán már minimális a függőleges irányú légmozgás, így a hajtóművekből távozó szennyezőanyagok (nitrogén-oxidok, kén-dioxid, szén-monoxid) évtizedekig megmaradhatnak, akkumulálódnak, megkötő közeg hiányában pedig hatásuk sokszorozódik [14].

Ennek megakadályozására 2020 decemberében 195 ország aláírta azt a megújított párizsi megállapodást, amelyben vállalja 2030-ig a karbonsemleges, majd 2050-ig a karbonmentes polgári, illetve katonai légi közlekedést is. Ez azt jelenti, hogy a kibocsátást olyan szintre csökkentik, amelyet a természeti folyamatok meg tudnak kötni. Az Európai Repülésbiztonsági Ügynökség (EASA) által minden EU-tagállam – így Magyarország – számára kiemelt fontossággal előírt

feladat a fenntartható, alternatív hajtóanyagok felhasználására való fokozatos átállás. A fosszilis energiahordozók kiváltására napjainkban is keresik a megoldásokat, ami nem csupán a megfelelő alternatíva megtalálását, hanem az azt szállítani, tárolni, elosztani képes infrastruktúra kiépítését, illetve az ezzel üzemelni képes eszközök kifejlesztését is magában foglalja.

2. Számításba vehető alternatív tüzelőanyagok

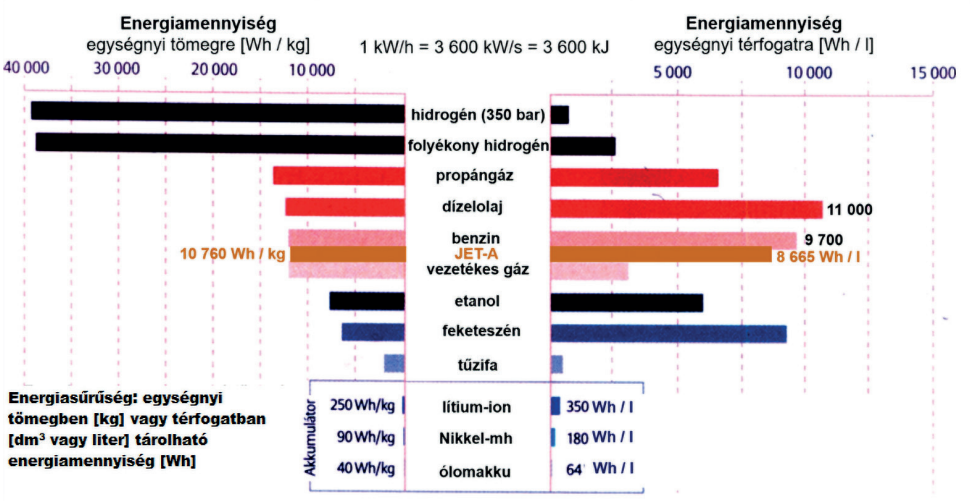
A leírt kihívásokra adott válaszként a légi közlekedés hatásainak csökkentését célzó számos módszert már széles körben vizsgálták a korábbi kutatások. A lehetséges alternatívák között jelenleg a legígéretesebbek az új meghajtási technológiák, például az akkumulátoros, hibrid-elektromos vagy hidrogénmeghajtás, valamint az alternatív üzemanyagok (1. táblázat).

A fenntartható tüzelőanyagok (*sustainable aviation fuels,* SAF), a bioüzemanyagok és a szintetikus üzemanyagok (*synfuels,* más néven PtL, Power-to-Liquids) kerozinszerű „drop-in" üzemanyagok, amelyek kompatibilisek a legtöbb repülőgéptípussal, így alkalmazhatók a repülőgépek szerkezeti és hajtómű kialakításának jelentős megváltoztatása nélkül. A bioüzemanyagok vagy biomasszák, szerves hulladékon alapulnak, és akár 94%-os nettó szén-dioxid-csökkentést is eredményezhetnek, fajlagos energiatartalmuk (MJ/kg) összemérhető a jelenleg használatos repülőgép-üzemanyagokkal (1. táblázat). Hosszú távon a bioüzemanyagok alapanyagainak elérhetősége korlátozott lehet, és potenciálisan versenyhelyzettel járhat a termőföldek más célra való felhasználhatósága miatt. A szintetikus üzemanyagok csak az ipari folyamatokból származó vagy közvetlenül a levegőből kinyert szén-dioxid és hidrogén előállításához és szintéziséhez igényelnek megújuló energiát.

1. táblázat
Folyékony és gáz tüzelőanyagok fizikai jellemzői [7]

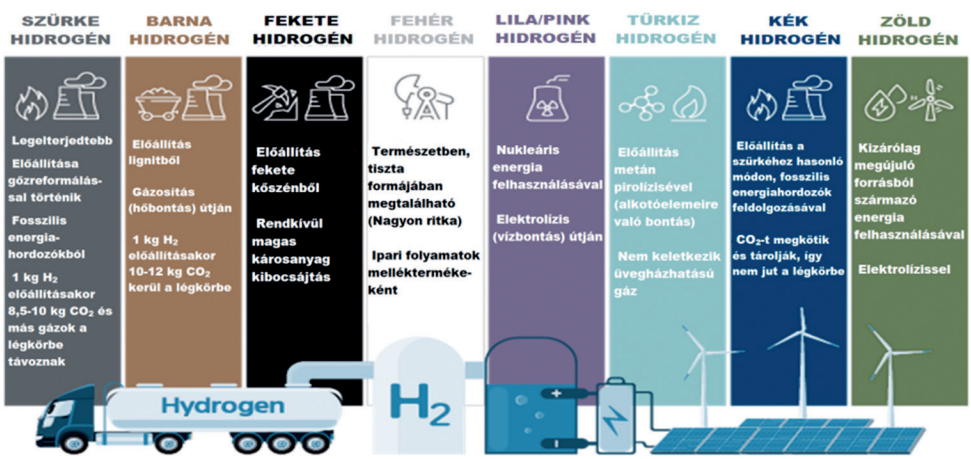
Üzemanyag	Égéshő [MJ/kg]	Energiasűrűség [MJ/l]	Sűrűség [kg/m^3]
Hidrogén (cseppfolyós)	**143**	**10,1**	**71**
Hidrogén (sűrített, 700 bar)	**143**	**5,6**	**42**
Hidrogén (környezeti nyomású)	**143**	**0,0107**	**0,09**
Metán (környezeti nyomású)	55,6	0,0378	424
Földgáz (cseppfolyós)	53,6	22,2	428
Földgáz (sűrített, 250 bar)	53,6	9	215
Földgáz (környezeti nyomású)	53,6	0,0364	0,747
LPG propán	49,6	25,3	507
LPG bután	49,1	27,7	584
Benzin	46,4	34,2	744
Etanol	29,8	21,1	788
Biodízel (metilészter)	42,2	33	887
Dízel	45,4	34,6	836
Kerozin JetA	46,4	36,7	790

A megújuló energiával tölthető akkumulátoros elektromos repülőgépek lényeges előnye, hogy repülés közben nincs károsanyag-kibocsátásuk. A vizsgálatok azonban kimutatták, hogy az akkumulátoros elektromos meghajtás a belátható jövőben nem lesz kivitelezhető nagyobb repülőgépekre és hosszabb repülési hatótávolságokra, a jelenleg ismert akkumulátorok alacsony energiasűrűsége miatt (2. ábra).



2. ábra
Különböző energiahordozók és tárolók energiasűrűsége [28]

A légi járművek hidrogénmeghajtása egy másik lehetőség a káros hatások jelentős csökkentésére a légi közlekedésben, zöld hidrogén alkalmazása, amely elnevezését onnan kapta, hogy előállítása során kizárólag megújuló energiaforrásokat használnak fel (3. ábra).



3. ábra
A hidrogén előállításának módszerei [12]

3. Működési elvek

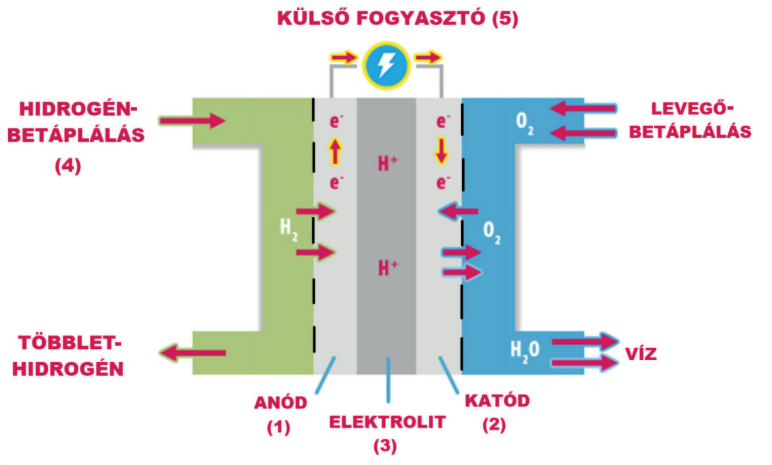
A hidrogén hajtóanyagként való felhasználásának legkézenfekvőbb módja annak belső égésű motorokban való elégetésével történő energiafelszabadulás.

A repülőgépek működtetésére a tárolás gazdaságossága, a hajtóműbe való pontos adagolás szükségessége miatt vagy cseppfolyósított (kriogén) állapotban vagy magas nyomású gáz formájában célszerű alkalmazni. Az egységnyi tömegéből nyerhető égéshője 2,7-szerese a kerozinénak, de más paraffin-szénhidrogének égéshőjét is felülmúlja. 1 kg kerozin elégetésekor 3,16 kg szén-dioxid és 1,25 kg víz jön létre. 1 kg hidrogén elégetésekor 9 kg víz keletkezik (2. táblázat). Tehát 1 kg kerozin energiatartalma 0,36 kg hidrogénének felel meg. A folyékony hidrogén elégetése során sem szén-dioxid, sem a kerozin elégetésekor keletkező más mérgező, illetve üvegházhatású melléktermék nem keletkezik. Azonban a keletkező 2,6-szer több víz, nagy magasságokban szintén kedvezőtlenül befolyásolja az üvegházhatást [15].

2. táblázat
A kerozin és a folyékony hidrogén égéstermékei [28]

Égéstermék	Kerozin	L H_2
Elsődleges égéstermék	CO_2 H_2O	H_2O
Égési melléktermék és az atmoszférával való reakciók termékei	$HC \rightarrow O_3$ $NO_x \rightarrow O_3$ $CO \rightarrow O_3$ $SO_2 \rightarrow H_2SO_4$	$H_2 \rightarrow H_2O$ $NO_x \rightarrow O_3$

A hidrogén hajtóanyagként való másik felhasználása az üzemanyagcella, amelynek számos típusát különböztetünk meg, azok kémiai összetétele, felhasználási területe és hatásfoka alapján. A járműiparban főként a protonáteresztő membrános üzemanyagcella (PEMFC) használatos (4. ábra), annak számos pozitív tulajdonsága miatt. Az átalakulást nem kíséri hang- vagy fényjelenség. Az üzemi hőmérséklete ~80 °C, gyorsan és könnyen üzembe helyezhető, kompakt, és jóval könnyebb, mint a hasonló, például szilárd oxidos cellatípus. A protonáteresztő membrános cella alkalmazásával 50–60%-os hatásfok érhető el [27].



4. ábra
A protonáteresztő membrános üzemanyagcella elvi felépítése [20]

A 4. ábrán látható módon, a külső házon beérkező hidrogén (4) az anódon lévő platina katalizátor (1) hatására megválik az elektronjától. Azonban a protonáteresztő membrán elektroliton (3) keresztül csak a pozitív töltésű ionok tudnak a katódhoz áramlani, ezért a negatív töltésű elektronok csak külső terhelésen keresztül (5) juthatnak az anódról (1) a katódra (2), vezetéken keresztül, villamos áramot hozva létre. A katód oldalon lévő katalizátor egyesíti a hidrogéniont elektronnal és az itt beáramló oxigénmolekulákkal. Ennek eredményeként hő és vízgőz képződik. Az anódot és a katódot az áramló közegektől egy porózus szerkezetű, gáz áteresztésére alkalmas anyag választja el. Inverter segítségével váltóáram is létrehozható.

Az üzemanyagcellában végbemenő reakciók:

- anódreakció:

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \tag{1}$$

- katódreakció:

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O \tag{2}$$

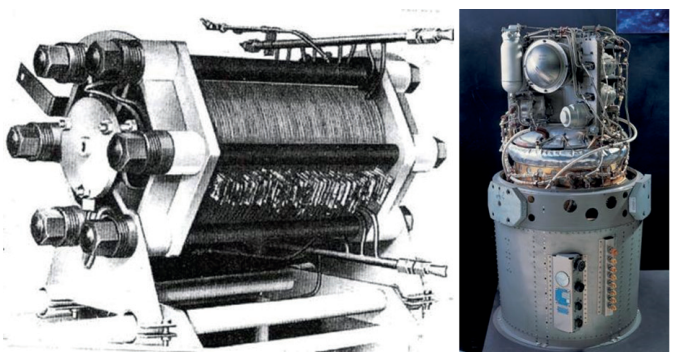
- teljescella-reakció:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \tag{3}$$

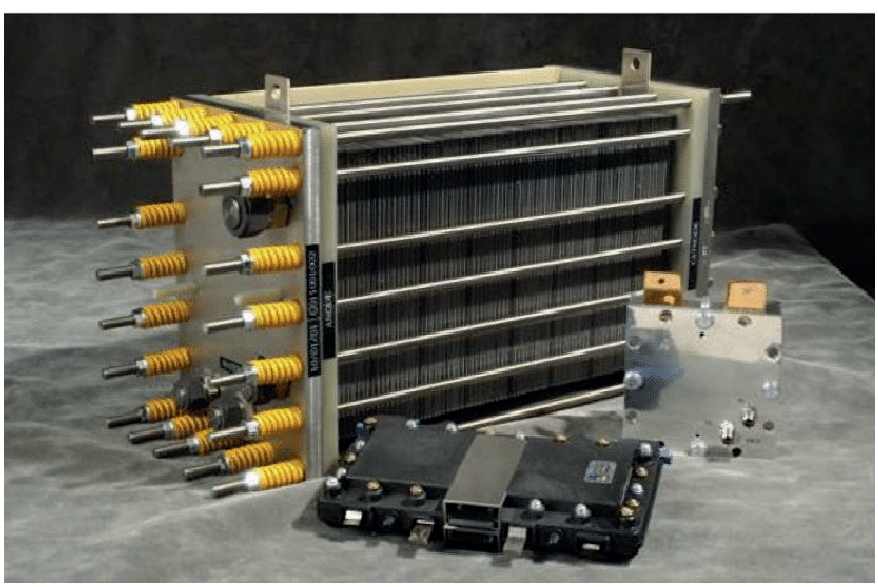
A PEM-üzemanyagcella 1,16 V feszültség előállítására képes, amely közel sem elég egy jármű meghajtására, ezért a nagyobb teljesítmény érdekében e cellákat sorosan és/vagy párhuzamosan összekapcsolva cellatelepeket alakítanak ki [27].

4. Az üzemanyagcella gyakorlati alkalmazása

Az üzemanyagcella megvalósításának alapjait Sir William Grove 1839-ben, elektrolízissel kapcsolatban végzett kísérletei során fektette le, amikor két elektródát alkalmazva, az egyikre hidrogéntartalmú, a másikra oxigéntartalmú oldatot vezetett, és a kettő közti feszültséget mérte. A következő mérföldkő az 1930-ban, Francis Bacon által továbbfejlesztett, majd 1932-ben bemutatott kálium-hidroxid elektrolitos, nikkel elektródás üzemanyagcella volt, amelynek tervei alapján 1959-re már 5–6 kW teljesítményű protoncsere-membrános cellaköteget hoztak létre.



5. ábra
Francis Bacon-féle cellaköteg [21] *és Pratt & Whitney Apollo üzemanyagcella* [5]



6. ábra
Modern 5 kW (hátul), 30 W (elöl) és 25 W (jobbra) teljesítményű üzemanyagcella [23]

Még abban az évben Harry Ihring bemutatta első, ilyen elven működő járművét, egy 15 kW teljesítményű traktort. A hatvanas évek elején a Pratt & Whitney repülőgéphajtómű-gyártó cég megvásárolta az üzemanyagcella licencét, és igyekeztek csökkenteni az üzemelési hőfokot, a gáznyomást és a berendezés tömegét, így a P&W típusú üzemanyagcella felhasználhatóvá vált az Apollo űrprogramban. Ennek továbbfejlesztett változatait a NASA űrsiklóiba a hetvenes évek közepétől egészen napjainkig beépítette. Jelenleg is számos kutatás folyik a hidrogén üzemanyagcella minél hatékonyabb, kompaktabb és gazdaságosabb kialakítására, alkalmazására mind a szárazföldi, mind a légi közlekedésben (például 6. ábra). Napjainkban több repülőgépgyártó cég is mutatott be terveket hidrogénmeghajtású repülőgépről.

Napjainkban az üzemanyagcellák lehetséges alternatívát kínálnak az akkumulátorral hajtott pilóta nélküli légi járművek energiaellátására is, mivel megőrzik a teljesen elektromos rendszer egyszerűségét és előnyeit. Az üzemanyagcellás és akkumulátor alapú rendszerek összehasonlításához fontos ismerni a két technológia alapvető különbségeit (3. táblázat). Az üzemanyagcella annyiban hasonlít az akkumulátorhoz, hogy egyenáramot biztosít. Az akkumulátorral ellentétben azonban az üzemanyagcellában külön tüzelőanyag (hidrogén) és oxidálószer (levegő) áramoltatása történik. Ez az üzemanyagcellás rendszer eleve biztonságosabb az akkumulátortechnológiáknál. Általánosságban elmondható, hogy mivel az oxidálószert a külső levegőből nyerik, és nem tárolják az üzemanyaggal együtt, az üzemanyagrendszer energiatartalma jóval meghaladja a hagyományos akkumulátoros rendszereket.

3. táblázat
Hasonlóságok és különbségek az akkumulátor és az üzemanyagcella között [17]

Hasonlóságok	Különbségek
• Mindkettő közvetlenül elektrokémiai reakciókon keresztül termel villamos energiát. • Mindkettőben elektrolittal érintkező anód és katód található. • Mindkettőnél kisfeszültségű egyenáramú cellák vannak sorba kapcsolva, nagyobb feszültség és teljesítmény elérése érdekében.	• Az akkumulátor energiát tárol, míg az üzemanyagcella igény szerint energiát termel. • Az üzemanyagcellát nem kell újratölteni. • Az üzemanyagcellában az anód- és a katódgázok (hidrogén és levegő) szeparálva vannak; míg egy akkumulátorban nem, ami biztonsági problémát jelenthet.

Az akkumulátorral működő UAV üzemelési idejének növelésére további akkumulátorokat építenek be, ami gyors ütemben növeli a rendszer teljes tömegét. Összehasonlításképpen, az üzemanyagcellás rendszerrel hosszabb működési idő elérésére csak egy nagyobb hidrogéntartályt szerelnek be, ami minimális hozzáadott tömeget jelent [17].

A jelenlegi limitált hatótávolságú, repülési idejű és szállítókapacitású drónok teljesítményének javítására már számos, különböző üzemanyagcellás megoldás készült. Ezek átlagosan 2,4 kW teljesítménnyel, 6 l-es, 350 bar-os hidrogéntartállyal, 6–8,5 kg hasznos teher szállítása mellett 120 percet képesek a levegőben maradni (7. ábra) [19].

Azonban már szélesebb körben is folynak a fejlesztések. Például a ZeroAvia cég 2020 végén sikeresen végrehajtott tesztrepülést egy hidrogénüzemanyag-cellás meghajtásra átalakított, hatüléses Piper M típusú repülőgéppel (8a. ábra), megalapozva ezzel az elkövetkező évek kutatási irányát. Ebben a gépben egy 250 kW teljesítményű elektromos rendszert helyeztek el, amellyel ~300 m magasságban, 160 km/h sebességgel repültek. A kutatási-fejlesztési program következő fázisaként egy 19 személyes Dornier 228 típusú repülőgép átalakítása van folyamatban (8b. ábra) [22].



7. ábra
SENSUS 8 típusú UAV [19]



a) b)

8. ábra
A ZeroAvia Piper M és Dornier 228 típusú modifikált repülőgépe [13], [25]

Emellett az Airbus ZEROe kísérleti repülőgépei szintén hidrogénüzemanyag-cellákat használnak a modifikált gázturbinás hajtóművek kiegészítő elektromos energiájának előállítására, ami rendkívül hatékony hibrid-elektromos meghajtási rendszert eredményez.

Az Airbus három hidrogénüzemű szén-dioxid-semleges repülőgép-koncepciót mutatott be (9. ábra). Mindhárom tervezése során a zéró kibocsátás elérésének különböző módjait igyekeztek megvalósítani [3].



9. ábra
A három Airbus ZEROe repülőgép-koncepció [16]

Az első lehetőség egy két turbofan hajtóműves repülőgép (9. ábra felül), amely 120–200 utas befogadására alkalmas, és 2000 tengeri mérföld (3700 km) távolságot képes megtenni. Valójában ezt szánják az A320-as típus utódjának. A cseppfolyósított hidrogént tartalmazó tartályok a nyomástartó válaszfal mögötti farokrészben találhatók. A második lehetőség egy legfeljebb 100 utas befogadására alkalmas turbólégcsavaros repülőgép (9. ábra alul), amely több mint 1000 mérföld (1852 km) megtételére képes. A hidrogént itt is gázturbinás hajtóműben égetik el. A harmadik koncepció a „csupaszárny" kialakítás alkalmazása (9. ábra középen), ez a repülőgép legfeljebb 200 utas befogadására képes, és a repülési hatótávolsága meghaladja a 2000 mérföldet. Az ultraszéles törzs használata további lehetőségeket biztosít a hidrogéntartályok elhelyezésére, valamint az utastér kialakítására is. Az első tesztrepülést a tervek szerint 2026-ban fogják végrehajtani [1], [3], [16].

5. Jelenlegi kihívások

A hidrogénüzemű repülőgép-tervezés legnagyobb kihívása a hidrogén tárolásának és szállításának problémája, annak egységnyi térfogatra vonatkoztatott alacsony energiasűrűsége miatt, akár annak elégetéséről, akár üzemanyagcellában való felhasználásáról van szó. Normál légköri nyomáson (101 325 Pa) és 0 °C-on körülbelül 3000 l térfogatra lenne szükség gáz halmazállapotú hidrogén esetében ahhoz, hogy ugyanolyan mennyiségű energia tárolását érjük el, mint ami egy liter kerozin üzemanyag elégetésével kinyerhető. Ennek eredményeként a hidrogén tárolási sűrűségének növelése szükséges ahhoz, hogy repülőeszközökben való felhasználása reálisan és elfogadható gazdaságossággal lehetővé váljon. Számos módszer létezik a nagyobb sűrűségű tárolására. Ezek a megközelítések azonban bizonyos típusú energiabevitelt

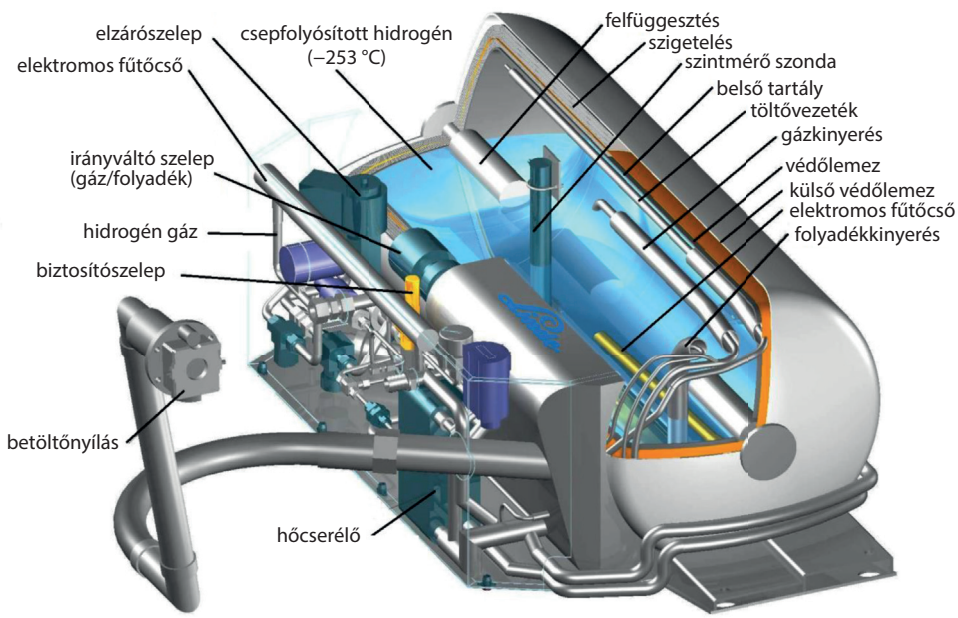
igényelnek, akár munka-, hő- vagy bizonyos esetekben hidrogénmegkötő anyagok formájában. A megfelelő tárolási módot három alapvető elvárás alapján határozhatjuk meg:

- a minél nagyobb gravimetrikus[1] és térfogati hidrogénsűrűség, amely meghatározza az anyag tömegegységre és térfogategységre vonatkoztatott energiatartalmát;
- termodinamikai tulajdonságok, amelyek lehetővé teszik a reverzibilis hidrogénfelvételt és -felszabadítást a standard környezeti körülményekhez minél közelebb;
- kémiai reakciók gyors lefolyása, ami biztosítja az üzemanyag folyamatos, szabályozott betáplálását és a feltölthetőséget.

A tárolóanyag és a tárolt hidrogén közötti kölcsönhatás jellege alapján a tárolás típusa lehet fizikai, kémiai tárolás és adszorpció.

5.1. Fizikai tárolás

A fizikai tárolás a hagyományos technikai megoldások közé tartozik, ami történhet hidrogén tiszta formájában kémiailag változatlan, sűrített gázként vagy kriogén (cseppfolyósított) állapotban. Sűrített gáz tárolása, szilárdsági megfontolásokból kizárólag hengeres és/vagy gömb alakú tartályokban történik, legalább 300 bar nyomáson, így energiasűrűsége ~20 kg/m^3.



10. ábra
Folyékonyhidrogén-tartály elvi felépítése [3]

[1] Gravimetria: súlyanalízis, súly szerinti elemzés, tömegmérésen alapuló technika.

A jelenlegi kereskedelmi forgalomban kapható hidrogénüzemű járművekben egyre gyakrabban használnak 700 bar nyomású hidrogént, amelynek sűrűsége ~40 kg/m^3. Előzetes számítások szerint a repülésben 850–900 bar-os tárolókapacitás alkalmazása célszerűbb. A cseppfolyósított hidrogén sűrűsége valamivel kedvezőbb, 71 kg/m^3 [9].

Azonban a hidrogén cseppfolyós halmazállapotának fenntartásához a hőmérsékletet folyamatosan [(–253) – (–262)] °C tartományban kell tartani, ami különböző hűtőberendezések és tartályszigetelés beépítését teszi szükségessé, így többlet szerkezeti tömeg is megjelenik (10. ábra). Az egyik lehetőség a tartály szigetelésének javítására és tömegének csökkentésére titánötvözetek alkalmazása, amelyek már széles körben használatosak a repülőgép- és űriparban, számos előnyös tulajdonságuk miatt (például a nagy fajlagos szilárdság, jó korrózióállóság, alacsony hővezető képesség és a kis hőtágulási együttható). Másik megoldás lehet a fejlesztés alatt álló kompozitok alkalmazása. A különböző szálerősített műanyagok (FRP), mint például a szén-, üveg- és kevlárszál-erősítésű polimerek jó rezgéscsillapításuk és alacsony hőtágulási együtthatójuk miatt lehetséges alternatívát nyújthatnak.

5.2. Adszorpció

A hidrogén tárolásának másik módja a hidrogénmolekulák és egy másik anyag felületi molekulái között kialakuló van der Waals-kölcsönhatáson alapul, amelyet adszorpciónak nevezünk. Ilyen anyagok lehetnek a különböző szén nanoszerkezetek, például a grafén, szén-nanocsövek, nanoszálak, fullerének,[2] zeolitok,[3] megfelelő pórusmérettel rendelkező aktivált szén, illetve a fémorganikus térhálók[4] (*metal-organic framework,* MOF). A hidrogén ezekben az anyagokban állandó jelleggel és reverzibilisen is tárolható, azaz adott anyag hőmérsékletét megfelelő nyomáson megnövelve a hidrogén felszabadul. Bár ennek a folyamatnak a szabályozására általában a hőmérséklet és a nyomás a legalkalmasabb paraméter, a hidrogén megkötése, illetve leadása más módon is megvalósítható, például mechanikai vagy akusztikus energia útján [2].

Mivel ez a kölcsönhatás viszonylag gyenge kötést eredményez a hidrogén és az adszorbeáló anyag felülete között, ezért a legtöbb ilyen szobahőmérsékleten igen alacsony hidrogéntároló kapacitással rendelkezik, és csak –196 °C, valamint nagy nyomás (p≥100 bar) mellett ér el elfogadható értéket.

5.3. Kémiai tárolás

A hidrogén azonban nemcsak felületen való megkötés útján léphet kapcsolatba szilárd anyagokkal, bizonyos anyagcsaládokkal nem az előbb felsorolt molekuláris szinten, hanem szilárd anyagban, új kémiai kötések kialakításával, atomi szinten történik kapcsolódás, ami az abszorpció speciális változata, és kemiszorpciónak nevezünk.

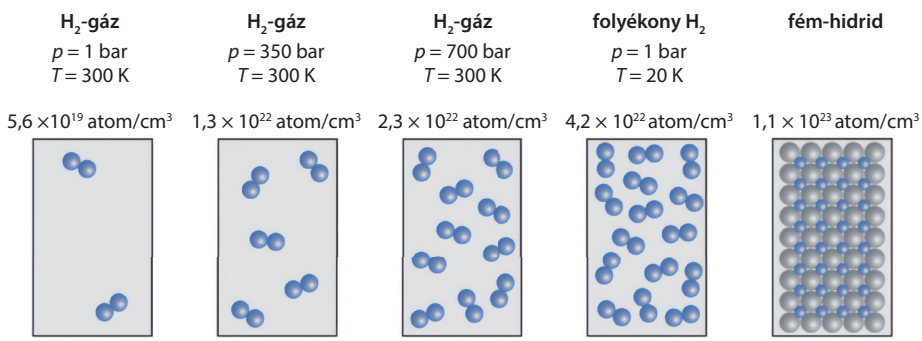
[2] A fullerén olyan szén-allotróp, amelynek molekulája egyes és kettős kötéssel összekapcsolt szénatomokból áll, így zárt vagy részben zárt hálót alkotnak, öt-hét atomból álló kondenzált gyűrűkkel. A molekula lehet üreges gömb, ellipszoid, cső vagy sok más alakú és méretű.

[3] A zeolit csoport tagjai víztartalmú alumoszilikátok, amelyekben a víztartalom jelentős része reverzibilis és alacsony hőmérsékleten eltávolítható.

[4] MOF: olyan porózus kristályos szerkezetek, amelyekben a fémionokat organikus elemek kötik össze.

A kémiai kötésen alapuló tárolási technológiák két típusra oszthatók: fém-hidridekre és az úgynevezett kémiai hidridekre. A *fém-hidridekben* a hidrogén vagy közvetlenül, vagy egy komplex ion részeként fématomhoz kötődik. Ahogy az a 11. ábrán látható, fém-hidridekben való tárolással jelentősen növelhető a hidrogénmolekulák átlagos sűrűsége a gáznemű és folyékony hidrogénhez képest. Ezek nagy térfogati kapacitással, kedvező kinetikai és termodinamikai tulajdonságokkal rendelkeznek, emellett reverzibilisek. Azonban a gravimetrikus kapacitásuk a gyakorlatban meglehetősen alacsony (~2 tömegszázalék), és több évtizedes tanulmányozás után jelenleg sincs egyértelmű fejlesztési irányuk [26].

A *kémiai hidridek* teljes egészében nem fémes elemekből, hanem általában szén, nitrogén, bór, oxigén és hidrogén keverékéből állnak. Ha a hidrogén kémiailag kapcsolódik a tárolóanyaghoz, akkor jellemzően jelentős mennyiségű energia szükséges hő formájában a felszabadításához. Ezenkívül, a hidrogénfelszabadulás mellett a hidridben a struktúra- és hőmérsékletváltozás hatására új kötések alakulhatnak ki, illetve a folyamat hőfejlődéssel járhat, emellett a felszabaduló hidrogént meg kell tisztítani, ami általában jelentős energiafelhasználást tesz szükségessé.

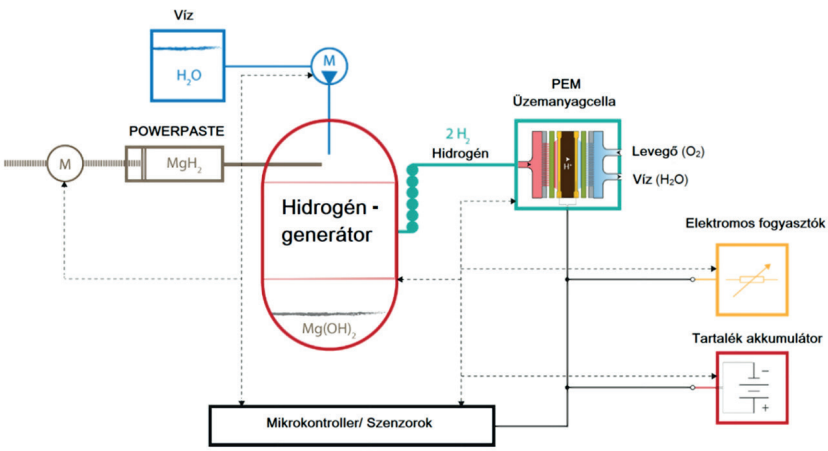


11. ábra
A hidrogénmolekulák átlagos sűrűsége különböző tárolási módszerek esetén [18]

Azonban az elmúlt években a Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology (IFAM) kutatói kifejlesztették a szilárd magnézium-hidrid alapú üzemanyagot, a hidrogén „Powerpaste"-et, amellyel jelenleg kis járműveket, (robogókat és motorkerékpárokat) működtetnek. Ez a paszta szobahőmérsékleten és nyomáson tárolható. Előállítása a magnézium és hidrogén 350 °C-on és 5–6 bar nyomáson való elegyítésével történik, amit visszahűtve krémszerű anyagot kapnak. A Powerpaste-alapú energiaellátás elvi vázlata a 12. ábrán látható. A jármű tárolóegységéből dugattyú segítségével, a kívánt mennyiségben adagolva a Powerpaste kijuttatható, majd egy másik tartályból víz hozzáadásával olyan reakció megy végbe, amely során annyi hidrogéngáz keletkezik, ami mennyiségben dinamikusan igazodik az üzemanyagcella működési szükségleteihez (4. egyenlet). Ezt a folyamatot bizonyos hozzáadott fémsók és nem mérgező észterek segítségével olyan mértékben dinamikussá tették, hogy a hidrogéntermelés szinte azonnal leállítható vagy folytatható.

$$MgH_2 + 2\,H_2O \rightarrow 2\,H_2 + Mg(OH)_2 \qquad (4)$$

Valójában a Powerpaste a keletkező hidrogénnek csak egy részét adja; a maradék a befecskendezett vízből származik, ami megközelítőleg 10 tömegszázalékot jelent. Így energiasűrűsége 1,9 kWh/l, ami körülbelül tízszerese a Li-Ion akkumulátorénak. Ezért – a gyártó állítása szerint – gépjárművek, drónok és repülőgép-segédhajtóművek meghajtására is egyaránt felhasználható lesz.



12. ábra
Powerpaste-alapú energiaellátás általános vázlata [10]

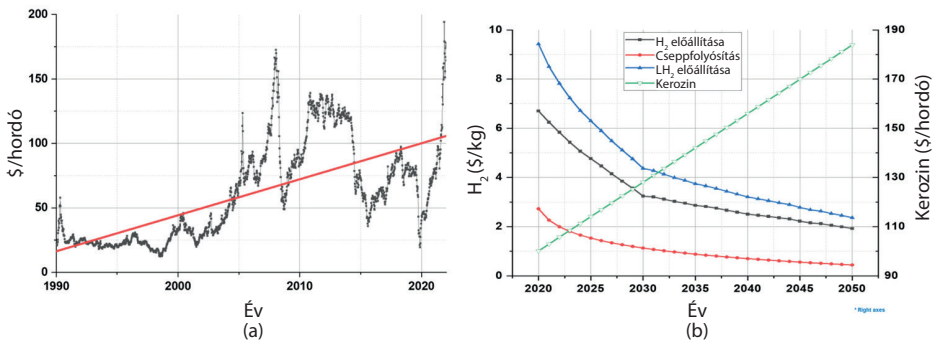
Ez a tárolási mód viszonylag biztonságos, mivel a bomlás megkezdéséhez 250 °C hőmérséklet szükséges. Ezzel a módszerrel a tankoláshoz csak a pasztát tartalmazó tartályt kell kicserélni, a vizes tartályt pedig feltölteni. Nem igényel drága infrastruktúrát, ellentétben a gáznemű vagy kriogén hidrogénnel. A Powerpaste szállítása is olcsó, mivel nincs szükség drága nagynyomású tartályokra vagy a folyékony hidrogén tárolásához szükséges hűtésre. A Fraunhofer IFAM jelenleg egy olyan Powerpaste gyártó létesítményt épít, amely egyelőre évente négy tonna Powerpaste előállítására lesz képes [10].

6. Predikciók

A következő néhány évben számos hajtóműpróba és tesztrepülés várható világszerte, a hidrogénhajtású drónok tökéletesítése és a kis, közepes és nagy hatótávolságú utasszállító repülőgépek kereskedelmi forgalomba hozatala céljából. Többek között az Airbus ZEROe program keretén belül, a fejlesztés alatt álló három repülőgép első kereskedelmi járatát 2035-re tervezi. A ZeroAvia 2025-re 40–80 fős, 2030-ra 100–200 fős utasszállító repülőgépek üzembe állítását tervezi. Emellett figyelemreméltók a H2Fly GmbH, az AviationNovation LLC, a Pipistrel, a GKN Aerospace vagy az Urban Aeronautics Ltd. ilyen irányú fejlesztései, amelyek szintén a 2030 és 2035 közötti időszakra tervezik a hidrogénhajtású repülőeszközeik gyártásának megkezdését.

A repülőipar kerozinról hidrogénre való átállásához, így az IATA Flightpath 2050 előírásainak való megfelelés, 2030-ra 114 Mt-val kevesebb JetA használatát feltételezi, ami

körülbelül 66%-os csökkenést jelent. Jelenleg a Nemzetközi Energiaügynökség adatai szerint a világszerte megtermelt hidrogén mennyisége hozzávetőlegesen 70 millió t, ami a 2021-ben a légi közlekedési ágazatban szükséges 116 millió t-nak csak a 60%-a. Ezen túlmenően számos területen – a légi közlekedésen kívül is – más hidrogénüzemű járművek számára is szükség van hidrogénre. Ezért az Egyesült Államok és Korea hidrogéngazdasági ütemtervet készített a gáz iránti gyorsan növekvő kereslet kielégítésére, a jelenlegi előállítási struktúráról a nagyüzemi gyártási rendszerre való átállással. Figyelembe véve a hidrogénalapú energiaigény növekedését és a termelési költségek csökkenését, várhatóan a repülőipar által igényelt H_2 mennyisége kielégíthető lesz. A kerozin eddigi hordónkénti árának emelkedéséből (13a. ábra) és a hidrogén előállításának költségeiből, ami a jelenlegi kisüzemek bővülése esetén várhatóan 50%-kal is csökkenni fog, előrevetíthető az árak alakulása (13b. ábra) [24].



13. ábra
A kerozin árának változása (a), kerozin és hidrogén árának előrejelzése (b) [24]

Összehasonlítva 2020-ban még a folyékony hidrogén (LH_2) ára 4,7–5,2-szerese volt a JetA üzemanyagénak, de 2030 után várhatóan az előbbi előállításának költsége alacsonyabb lesz, mint a kerozinié [24]. Ezért, ha az átállás üteme fokozatos, akkor lehetővé válik a korai szakaszban a magas gyártási költségek miatti gyors költségnövekedés megakadályozása. Ehhez olyan infrastruktúra kiépítése kezdődött el, amely lehetővé teszi a hidrogén gyors, hatékony szállítását az előállítási helytől a felhasználóhoz vagy tárolási bázisra, illetve biztosítja annak egyszerű és biztonságos betöltését a légi járműbe. Azonban a folyamatos fejlesztés mellett az ehhez kapcsolódó működési és biztonsági rendszabályokat is naprakészen kell tartani, és biztosítani, hogy ez gazdaságilag is fenntartható módon történjen.

7. Összegzés

A légi közlekedés az egyik legnehezebben dekarbonizálható ágazat, a repülőeszközök hagyományosan nagy energiaigénye miatt. Az új generációs repülőgépek és hajtóművek tervezési lehetőségei a hagyományos üzemanyag-felhasználás hatékonyságfejlesztésének tekintetében a határaihoz közelednek. Mivel más ágazatok a fenntartható és alternatív energiaforrások felé fordulnak, a légi közlekedés iparágában is meg kell fontolni minden lehetőséget

a károsanyag-kibocsátás csökkentésére, a nemzetközi klímavédelmi egyezményekben elfogadott tervek, előírások megvalósítására. Noha vannak még alkalmazási kihívások, a hidrogén az egyik potenciális megoldás, amelynek felhasználása pozitívan hozzájárulhat az iparág fenntartható növekedéséhez, és nagymértékben csökkentheti a nettó károsanyag-kibocsátást. E gáz felhasználható repülőgépek meghajtására belső égésű motorokban való elégetéssel vagy üzemanyagcellák alkalmazásával elektrokémiai úton. Ezek a meghajtási módszerek merőben új repülőgép-koncepciókat is eredményeznek, mivel szükségessé válik a hidrogéntárolási lehetőség implementálása. Az eltérő rendszerteljesítmény és energiasűrűség miatt a hidrogén-égetés méretezhető közepes és nagy hatótávolságú repülőgépekre, míg az üzemanyagcellával való meghajtás jelenleg leginkább a rövid hatótávolságú repülőgépszegmensre, illetve a nagy hatótávolságú légi járművek alrendszereinek táplálására alkalmazható. Repülés közben egyik verzió esetén sem történik szén-dioxid- vagy nitrogén-oxid-kibocsátás, a koromképződés pedig jelentősen csökkenthető az égetésnél, és teljesen kiküszöbölhető az üzemanyagcellás repülőgépekkel. A jelenleg is zajló kutatási és fejlesztési projekteknek köszönhetően a következő évtizedekben 50–90%-kal csökkenthető a repülés globális felmelegedést okozó károsanyag-kibocsátásának hatása. Ezen túlmenően ezek az innovációk nagymértékben hozzájárulhatnak az Európai Bizottság által elfogadott „European Green Deal"-ben a légi közlekedés károsanyag-kibocsátására vonatkozó csökkentési célok teljesítéséhez.

Irodalomjegyzék

[1] Hardingham-Gill, T., Airbus to Test Hydrogen-Fueled Engine on A380 Jet. *CNN,* 2022. február 25. Online: https://edition.cnn.com/travel/article/airbus-test-hydrogen-fueled-engines-on-a380/index.html

[2] Balog K., „A hidrogén tárolása és annak korlátai," *Energiaellátás, Energiatakarékosság Világszerte,* 44. évf. 7. sz. pp. 41–52. 2005.

[3] 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

[4] National Ocean and Atmospheric Administration, *Carbon Dioxide Now More Than 50% Higher than Pre-Industrial Levels.* 2022. június 3. Online: www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels

[5] National Air and Space Museum, *FuelCell, Apollo.* é. n. Online: https://airandspace.si.edu/collection-objects/fuel-cell-apollo/nasm_A19780288000

[6] Energy Efficiency & Renewable Energy, Alternative Fuels Data Center, *How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?* é. n. Online: https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work

[7] www.engineeringtoolbox.com

[8] IPCC, *Sixth Assesment Report.* é. n. Online: www.ipcc.ch/assessment-report/ar6

[9] Lahmer, K., Bessaih, R., "Thermal Effects of Kinetic Reaction Models on Hydrogen Absorption Modeling in Metal Hydride Tank," in *Proceedings of CHT-15. 6th International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer,* 2015. május 25–29. pp. 1082–1091. Online: https://doi.org/10.1615/ICHMT.2015.IntSympAdvComputHeatTransf.990

[10] Röntzsch, L., Vogt, M., *PowerPaste for Off-Grid Power Supply.* Dresden, Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials IFAM, Branch Lab Dresden,

2019. február. Online: www.zess.fraunhofer.de/content/dam/ikts/zess/documents/POWERPASTE_WHITE_PAPER_2019.pdf
[11] Crippa,M.et al.,*CO2 Emissions of All World Countries – 2022 Report.* Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2022. Online: https://doi.org/10.2760/56420
[12] Goddin, N.,Hydrogen: Grey + Blue ≠ Green. *Artemis,* 2022. január 12. Online: www.artemisfunds.com/en/gbr/institution/investment-insights/2022/jan/hydrogen-grey-blue-green
[13] Manthey,N.,Zero Avia Completes Maidenflight with Hydrogen Aircraft. *Electrive,* 2020. szeptember 30. Online: www.electrive.com/2020/09/30/zeroavia-completes-maidenflight-with-hydrogen-aircraft
[14] Óvári Gy., Fehér K., „Repülőgépek elektromos meghajtása – szükségszerűség kompromisszumokkal I. rész,"*Haditechnika,*54. évf. 6. sz. pp. 5–10. Online: https://doi.org/10.23713/HT.54.6.02
[15] Óvári Gy., Szegedi P., „Hagyományos repülőgép-üzemanyagok kiváltásának lehetőségei és korlátai," *Hadmérnök,* 5. évf. 4. sz. pp. 16–37. 2010.
[16] Airbus удивила прототипами самолетов на водородном топливе. Подробности. *Neftegaz,* 2020. szeptember 25. Online: https://neftegaz.ru/news/aviatehnika/632380-vodorodnyy-/
[17] Osenar, P.,Sisco, J.,Reid, C.,*Advanced Propulsion for Small Unmanned Aerial Vehicles: The Role of Fuel Cell BasedEnergy Systems for Commercial UAVs.* Ballard, 2017. január. Online: www.unmannedsystemstechnology.com/wp-content/uploads/2017/02/White-Paper-Fuel-Cell-Energy-Systems-for-UAVs.pdf
[18] Helmolt, R. von,Eberle, U., "Fuel Cell Vehicles: Status 2007." *Journal of Power Sources,*165. évf. 2. sz. pp. 833–843. 2007. Online: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.073
[19] ISS Aerospace, *SENSUS 8 Unmanned Aerial System.* é. n. Online: www.issaerospace.com/sensus-8-hydrogen-uav/
[20] Heiser, T.,Auxiliary Inverter Solutions for Fuel Cell Vehicle Turbo Compressor Applications.*KEB,*2019. január 28. Online: www.kebamerica.com/blog/fuel-cell-vehicle-auxiliary-inverter-solutions/
[21] Bagotsky, V. S., *Fuel Cells.* ECS, Electrochemistry Encyclopedia, 2009. Online: https://knowledge.electrochem.org/encycl/art-f03-fuel-cells.htm
[22] Bellamy, W., "ZeroAvia Completes First Phase of Test Flights On Path to Hydrogen-Electric Turboprop. *Aviation Today,* 2020. július 7. Online: www.aviationtoday.com/2020/07/07/zeroavia-completes-first-flight-path-hydrogen-electric-turboprop/
[23] Wang, Y. et al., "A Review of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Technology, Applications, and Needs on Fundamental Research," *Applied Energy,* 88. évf. 4. sz. pp. 981–1007. 2011. Online: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.030
[24] Choi, Y., Lee, J., "Estimation of Liquid Hydrogen Fuels in Aviation," *Aerospace;* 9. évf. 10. sz. 564. 2022. Online: https://doi.org/10.3390/aerospace9100564
[25] ZeroAvia Kicks Off US 19-seat Aircraft Testing and Demonstration Program on Path to Worldwide Application of its Powertrain Technology. *ZeroAvia,* 2022. május 6. Online: www.zeroavia.com/dornier-228-in-hollister
[26] Yang,J. et al., "High Capacity Hydrogen Storage Materials: Attributes for Automotive Applications and Techniques for Materials Discovery," *Chemical Society Reviews,*39. évf. 2. sz. pp. 656–675. 2010. Online: https://doi.org/10.1039/B802882F

[27] Békési B., Juhász M., „Pilóta nélküli légijárművek energia forrásai," Economica, 7. évf. 1. sz. 92–100. 2014. Online: https://doi.org/10.47282/ECONOMICA/2014/7/1/4311
[28] Óvári Gy., Fehér K., „Repülőgépek elektromos meghajtása – szükségszerűség kompromisszumokkal IV. rész,"Haditechnika,55. évf. 3. sz. pp. 17–24. Online: https://doi.org/10.23713/HT.55.3.03

The Present and Future of Hydrogen Use in Aviation

In recent years, an enormous amount of greenhouse gases have entered the atmosphere. A significant part of it is linked to aviation. Hydrogen is one of the most promising alternatives for replacing the currently used fossil energy sources, which are available in decreasing quantities. It can also be used as a propellant for energy production in traditional gas turbine engines, internal combustion engines and proton exchange membrane fuel cells. However, its storage, transportation and loading it into the aircraft is often a difficult or unsolved task. Multiple plans have been created to solve these problems. Their implementation is currently under way, with deadlines of 2030 and 2050. The purpose of this article is to give a comprehensive picture of the results achieved so far and to predict the possible future of the use of hydrogen.

Keywords: *fuel cell, hydrogen, powerpaste, decarbonisation, aviation, cryogenics*

Csató Péter, MSc
doktori hallgató
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Műszaki Doktori Iskola

csato.peter@stud.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@stud.uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-9515-5376

Óvári Gyula, MSc, CSc
egyetemi tanár
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék

ovari.gyula@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-8604-5861

Gyula Óvári, MSc, CSc
Professor
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

„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
34. évfolyam (2022) 3. szám 77–89. • DOI: 10.32560/rk.2022.3.6

Békési Bertold, Csóré Attila, Gajdács László

A légi járművek adatfeldolgozó és adattovábbító rendszere – az Air Data Computer

A repülések során különböző levegőparaméter-adatok folyamatos mérése történik. A beérkező információk szükségesek a pilóták és a berendezések számára a különböző feladatok végrehajtásához és a biztonságos repülés megvalósításához. A korszerű számítástechnikai eszközök lehetőséget biztosítanak a mechanikai műszerek és műszerrendszerek modernizációjára. A számítógépek és egyéb digitális berendezések alkalmazásával a hagyományostól eltérő módon valósítják meg az adatok feldolgozását, továbbítását, valamint azok megjelenítését. A cikkben a szerzők ismertetik a modern légi járműveken alkalmazott repülési adatok rendszerének felépítését, a rendszerrészek feladatait és azok működését.

Kulcsszavak: *levegőparaméter-adatok számítóegysége (ADC), repülési adatok rendszere (ADS), levegőparaméter-adatok és tehetetlenségi helymeghatározó egység (ADIRU), Pitot-statikus rendszer, digitális ADC*

1. Bevezetés

A pilóták számára a légi járművek fedélzetén különböző információk és adatok jelennek meg, amelyek kulcsfontosságúak a repülés során. Hagyományos nyomásmérő műszerek segítségével határozhatók meg adatok a magasságról, sebességről és Mach-számról. Újabb típusú, modernizált vagy korszerűsített repülőgépeken azonban megfigyelhető, hogy a fentiekben említett információkat egy központi számítógép bemenő jelekből dolgozza fel, számítja, majd modern kijelzőkön keresztül jeleníti meg. Ezt a feladatot a levegőparaméter-adatok számítóegysége (levegőjelek számítóegysége) végzi, elnevezése az angol Air Data Computer (ADC) mozaikszóból származik. Az ADC a légi jármű repülési adatai rendszerének (*Air Data System*, ADS) része. Az első, mechanikus ADC-t az 1930-as években fejlesztették ki, hogy referenciaként szolgáljon a robotpilóta-rendszernek.

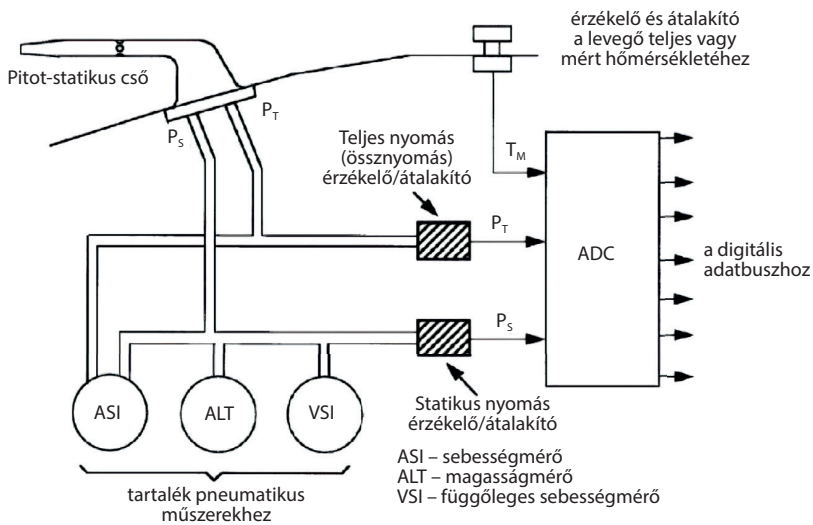
2. Fedélzeti repülési adatok rendszere

Az ADS rendszer lévén több egységből és komponensből tevődik össze. Komplikáltságtól függően eltérők lehetnek az egyes típusok rendszerrészeinek számai. Az egyszerűbb ADS-ek az alábbiakból tevődnek össze:

- számítógépegység;
- megjelenítő kijelzők;
- alapadatokat biztosító mérőberendezések: a Pitot- és statikus nyomásmérő, levegő-hőmérséklet-mérő, a rendszer bonyolultságától függően egyéb szenzorok;
- a rendszer működéséhez szükséges tápegység [8].

Ugyanazon típusú ADC-k különböző repülőgépekben is előfordulnak, de ennek megvalósításához különböző mértékű integráció szükséges. A pontos adatok gyűjtéséhez, azok pontosításához konfigurálni, integrálni kell az adott repülőgéphez, hiszen típustól függően eltérőek lehetnek az érzékelők és a portok elhelyezkedései [8].

A hagyományos ADC-k a magasságot, függőleges sebességet, repülési sebességet és Mach-számot jelenítik meg (1. ábra). A hagyományostól eltérő, korszerűbb típusok esetében megjelenik a teljes levegő-hőmérséklet (lefékezett levegő hőmérséklete) (TAT[1]), a statikus (álló) levegő hőmérséklete (SAT[2]) és a valós repülési sebesség[3] (TAS[4]) is.



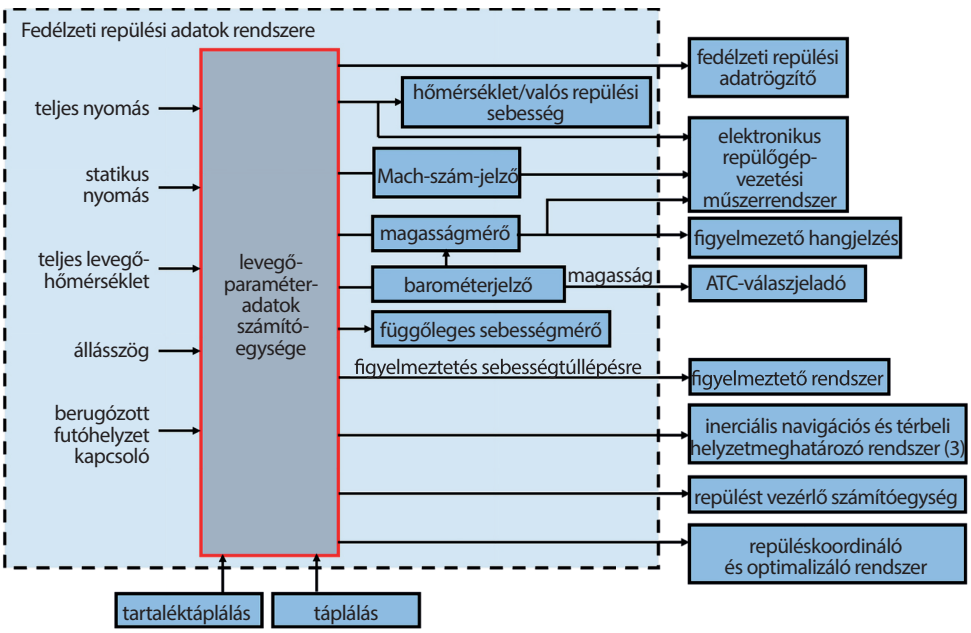
1. ábra
Az ADC felépítése (Békési Bertold [5] alapján)

A rendszer a kijelzés mellett további fontos feladatot lát el, továbbítja az adatokat, a kimenő értékeket az automatikus repülésvezérlő rendszer (AFCS[5]), a repülési adatrögzítő (FDR[6]),

[1] TAT: Total Air Temperature.
[2] SAT: Static Air Temperature.
[3] Szokás tényleges sebességnek vagy levegőhöz viszonyított sebességnek is használni.
[4] TAS: True Air Speed.
[5] AFCS: Automatic Flight Control System.
[6] FDR: Flight Data Recorder.

a repüléskoordináló és optimalizáló rendszer (FMS[7]), a veszélyes földmegközelítést jelző rendszer (GPWS[8]), a pályavezérlő rendszer (FDS[9]) és a navigációs számítógép stb. felé [2], [6], [8].

Az egyszerűbb és kisebb méretű repülőgépekben, főként helikopterek esetében kettő darab, egyszerű felépítésű levegőparamétereket feldolgozó egység kerül beépítésre, amelyet Air Data Unit-nak (ADU) neveznek. Különböző gyártók által létrehozott ADS-ek (2. ábra) eltérhetnek egymástól, nemcsak felépítésük, hanem elnevezésük alapján is [14].



2. ábra
Hagyományos ADS felépítése (Békési Bertold [2], [8] alapján)

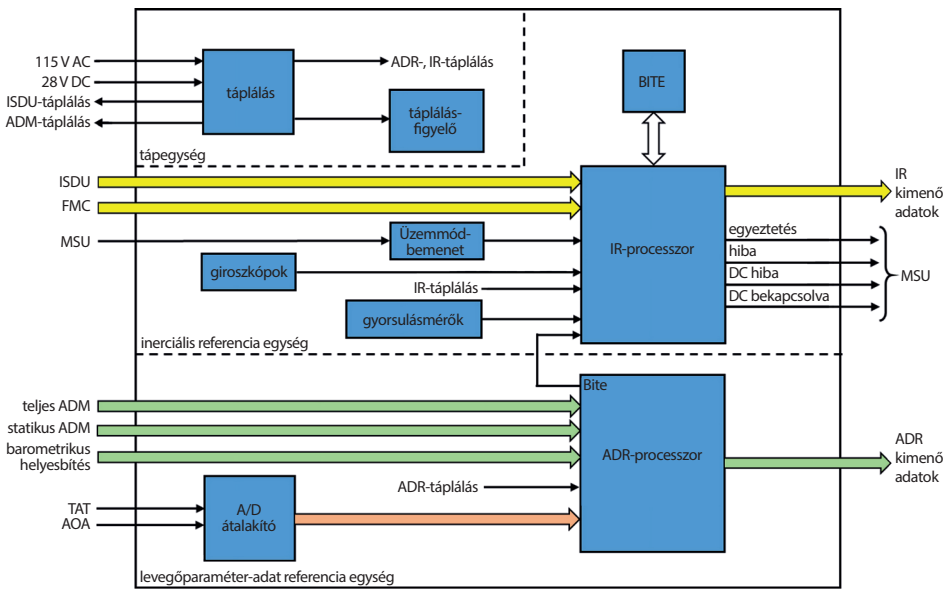
Az Airbus és a Boeing repülőgépeken egyetlen egységen belül alakítják ki, kombinálva a levegőparaméter-adatok számítóegységét a magassági, irány- és navigációs forrásokkal. Ezzel a típussal ADIRU[10]-ként találkozhatunk (3. ábra), de a gyártó ezt a rendszert már helyettesíti a GNADIRS[11] mozaikszóval rövidített rendszer alkalmazásával [10], [14].

A 3. ábrából is látható, hogy az ADIRU egy tápegységből, levegőparaméter-adatokat feldolgozó egységből (ADM[12]) és az inercális referencia (IR-[13]) egységből áll, amely a levegőből származó paraméteradatokat folyamatosan méri és a tehetetlenséggel kapcsolatos

7 FMS: Flight Management System.
8 GPWS: Ground Proximity Warning System.
9 FDS: Flight Director System.
10 Air Data Inertial Reference Unit: levegőparaméter-adatok és tehetetlenségi helymeghatározó egység.
11 Global Navigation Air Data Inertial Reference System: globális navigációs levegőparaméter-adatok inerciális referenciarendszere.
12 Air Data Module: levegőparaméter-adatok feldolgozó egysége.
13 Inertial Reference: tehetetlenségi helymeghatározás, inercális referencia.

számításokat végez. A levegőparaméter-adatok inerciális referenciarendszere (ADIRS[14]) 3 db ADIRU-t tartalmaz.

Az ADR[15]-processzor kiszámítja a magasság, a barometrikus korrigált magasság, a levegőhöz viszonyított számított sebesség (CAS[16]), a maximális megengedett sebesség, a Mach-szám, a valódi sebesség (TAS[17]), a statikus levegő-hőmérséklet (SAT), a teljes levegő-hőmérséklet (TAT), a dinamikus nyomás, a statikus nyomás és a teljes nyomás értékeit [4], [12].



3. ábra
B737 ADIRU felépítése (Békési Bertold [4] alapján)

(Megjegyzés: Az ábrán található még eddig fel nem oldott rövidítések: ISDU[18] – Inertial system display unit; FMC[19] – Flight management computer; MSU[20] – Mode selector unit; AOA[21] – Angle of attack; BITE[22] – Built in test equipment)

Az inerciális vonatkoztatási (tehetetlenségi referencia) résznek a földrajzi szélesség beállítására és a repülőgép helyzete bemenetre van szüksége a működéshez, ahol 3 gyorsulásmérőt és 3 lézer giroszkópot használ, amelyek érzékelik a repülőgép mozgását és szögelmozdulásait a helyzet, az irány, a gyorsulás és a pozíció meghatározásához [4].

Az IR-processzor kiszámítja a bólintás, a bedöntés, a legyezés, a szélesség, a hosszúság, a valós géptengelyirányszög, a mágneses géptengelyirányszög, a tehetetlenségisebesség-vektorok,

[14] Air Data Inertial Reference System: levegőparaméter adatok inerciális referenciarendszere.
[15] Air Data Reference: levegőparaméter-adatok referenciaegysége.
[16] Calibrated Airspeed: kalibrált sebesség vagy levegőhöz viszonyított számított sebesség.
[17] True Airspeed: valódi sebesség, tényleges sebesség, levegőhöz viszonyított sebesség.
[18] ISDU: inerciális rendszer kijelző és kezelő egység.
[19] FMC: repüléskoordináló és optimalizáló számítógép.
[20] MSU: üzemmód kiválasztó egység.
[21] AOA: állásszög.
[22] BITE: beépített tesztberendezés.

a lineáris gyorsulások, a szögsebesség, a repülési pályairányszög, a szél sebessége és iránya, az inerciális rendszer által számított magasság, a függőleges sebesség és gyorsulás, a földhöz viszonyított sebesség, az elsodródás szöge, a függőleges pályairányszög, a repülési útvonal szög- és gyorsulásértékeit [4].

Ezek a rendszerek kombinálhatók, bonyolíthatók, képesek több adatot kezelni, számítási feladatot elvégezni és több információt biztosítani, viszont működésük és felépítésük elve megegyezik az egyszerűbb típusokéval. A következő oldalakon a napjainkban alkalmazott rendszerek elvi működésének és felépítésének bemutatása olvasható és látható egyszerűsített ábrákon keresztül [14].

3. Pitot-statikus rendszer

A repülőgépek műszereit és kijelzőit többnyire úgy alakítják ki, hogy a már korábban említett levegőparaméter-adatok mindkét pilóta előtt, külön megjelenjenek és rendelkezésre álljanak. Ennek megvalósítása úgy történnik, hogy a két pilóta számára biztosított információk két külön ADC-egységből származnak. Az egységek megtáplálása független Pitot- és statikus forrásokból történik. Biztonsági szempontból ezek keresztkapcsolása is megvalósítható, amit a későbbiekben részletezünk [2], [6], [8].

Bizonyos ADS-ek esetében, az ADC-be futó csatornáktól szintén független rendszerrészt építhetnek be. Kialakításuk elve, hogy kikerülve az ADC-t, a Pitot-statikus rendszerből közvetlen módon táplálja a készenléti barometrikus magasságmérőt és repülésisebesség-mérő műszert. A készenléti műszerek megléte túlbiztosítási szempontból fontos, hiszen az áramköri, egyéb számítástechnikai hibák miatt a levegőparamétereket feldolgozó egység (ADU) nem, vagy hibás kimenő értékeket továbbíthat. Ilyen helyzetben lépnek életbe a készenléti műszerek.

A fentiekben kifejtettek alapján megfogalmazható, hogy általános esetben az Air Data System részeként három független Pitot- és statikus rendszert integrálnak a gép törzsén. A nyomásvételező portokat úgy helyezik el, hogy minél kisebb mértékben befolyásolja a rendszert, a mérési pontosságot az oldalcsúszás, az elfordulás és a repülés során fellépő egyéb tényező [8].

4. Levegőparaméter-adatok számítóegysége

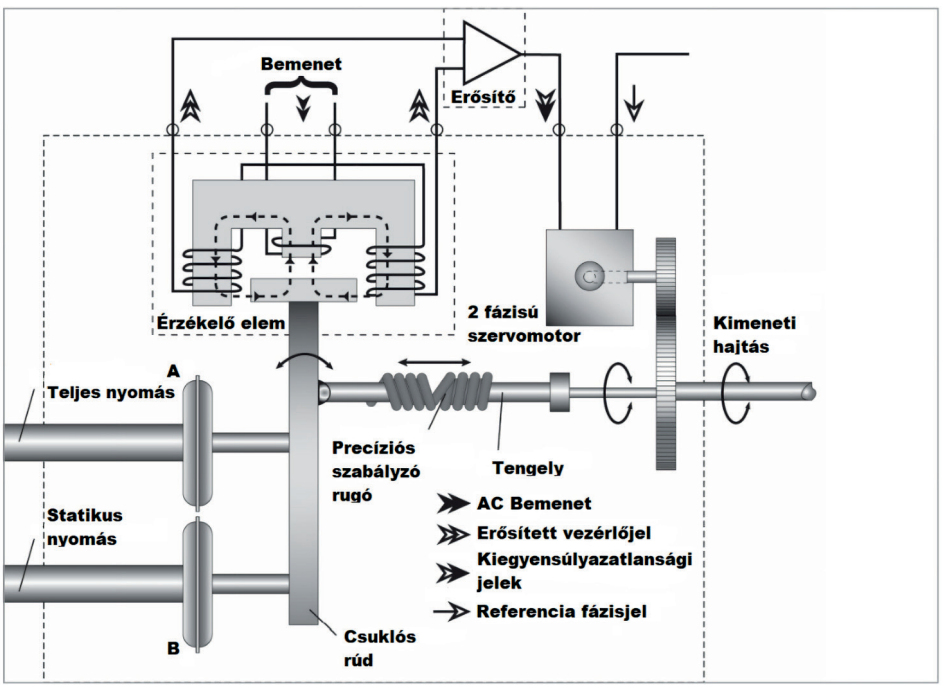
A modern ADC-egységekben jelátalakítók segítségével az analóg jeleket átalakítják digitális jelekké. Az átalakítás után a hőmérséklet- és nyomásadatokat digitális jel formában továbbítják más rendszerek, modulok felé, valamint megjelenítik a kijelzőkön [8]. Megkülönböztethetünk azonban olyan ADC-ket, amelyek esetében a beérkező adatok analóg jelként továbbítódnak. Mindezek alapján a kimenő adatok analóg vagy digitális jelének[23] megfelelően lehet analóg vagy digitális az ADC [2], [8].

[23] Az analóg kimeneti jeleket és annak a további feldolgozását/alkalmazását más rendszerek által Signal Processing (SP-) technológiának, a digitális kimeneti jeleket pedig Digital Signal Processing (DSP-) technológiának nevezzük.

4.1. Analóg levegőparaméter-adatok számítóegysége

Az analóg típus esetében a mérések elvégzésére, azok eredményeinek megjelenítésére folyamatos fizikai változókra van szükség, mint például nyomásra vagy feszültségre. A 4. ábrán egy analóg ADC repülési sebességértékelő modul elvi felépítése látható.

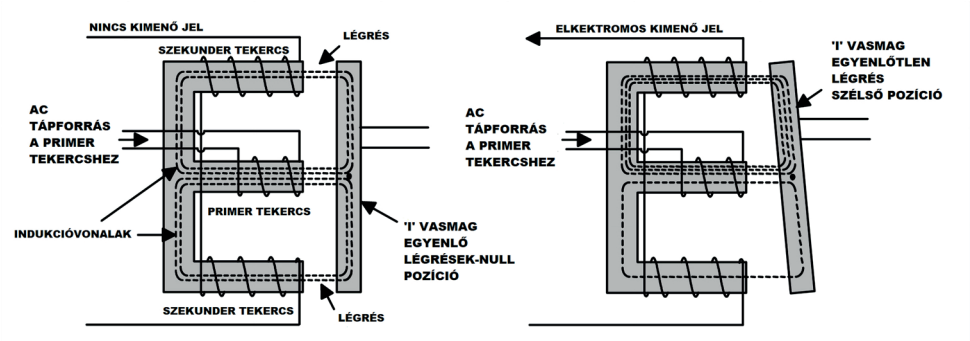
Ebben az esetben a folyamatos fizikai változókat a statikus és a teljes nyomások képezik. A két szelencébe közvetlenül belevezetik a statikus és a teljes nyomást, amelyek mechanikusan össze vannak kötve a csuklós rúddal. A csuklós rúd végére van rögzítve az E-I érzékelő I-magja, amely a nyomásváltozás hatására válik mozgó I-maggá. Tehát amikor a teljes nyomás változik, azaz az A szelence tágul, a B változatlan marad (a magasság nem változik) a csuklós rúd jobbra mozdul el a fix E-maghoz képest. Ekkor megbomlik az egyensúly, azaz az indukálódott feszültségek nem lesznek tovább egyenlők. A keletkezett jeleket a szervomotorhoz továbbítja az erősítőn keresztül. A kétfázisú szervomotor elforgatja a meghajtott tengelyt, amely egy szöghelyzetvezérlő jeladóhoz csatlakozik, ahol a szöghelyzet mérhető és sebességként leolvashatóvá válik [2], [8], [9], [13].



4. ábra
Analóg ADC – repülési sebesség modul elvi ábrája (Csóré Attila [2], [8] alapján)

Az E-I (Pick-off) érzékelőt (5. ábra) nagyon kicsi szög- és lineáris elmozdulások mérésére használják, mint amilyen például a magasságmérő műszer szelencéjének, nyomásváltozás hatására bekövetkező méretváltozása. Ez az érzékelő két lágyvas magból áll: a fix E-mag és a mozgó I-mag. Az E-mag belső tagja köré egy váltakozó feszültséggel táplált tekercs van

tekerve. Ez működik elsődleges (primer) tekercsként. A külső tagok köré ellentétes irányban feltekert sorba kötött tekercset tesznek. Ez a két tekercs együtt lesz a másodlagos (szekunder) tekercselés. Az elsődleges tekercsben folyó áram mágneses teret indukál. A változó mágneses tér hatására a másodlagos tekercsekben feszültség indukálódik. Az ellentétes menetirány miatt az indukálódott feszültségek fázisa ellentétes. Ameddig az I-mag pontosan az E-mag tagjai fölött van, a két ellentétes fázisú feszültség nagysága azonos, mivel kioltják egymást. Amikor az I-magot elmozdítjuk az egyik irányba, az indukálódott feszültségek nem lesznek tovább egyenlők, a permeabilitás különbsége miatt. Az eredő feszültségből az I-mag elmozdulásának mértéke, a fázisából pedig az iránya adódik [3], [13].

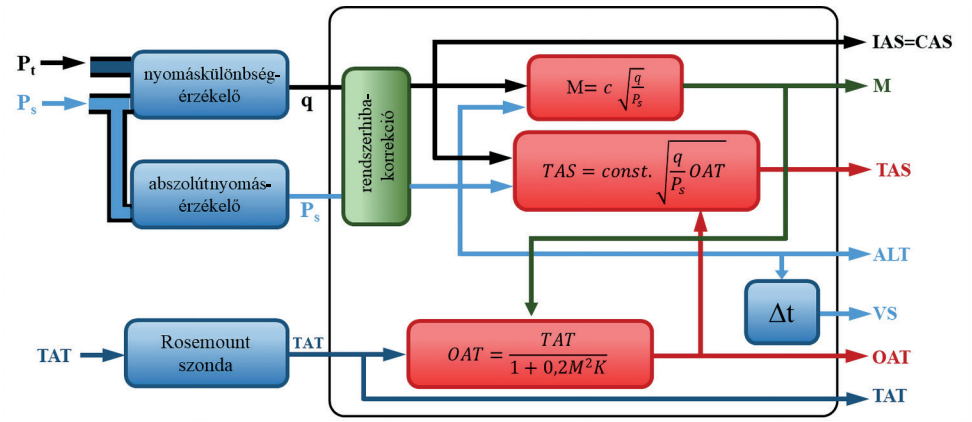


5. ábra
A szelence működése (Csóré Attila [9] alapján)

Tehát a 4. ábrán látható E-I érzékelő elem szemlélteti a nyomás hatására bekövetkező változásokat a szelence belsejében, valamint a kimeneten megjelenő elektromos jel előállítását. A nyomásváltozás következtében a szelencében található vasmag helyzete megváltozik, az „I" vasmag kitér az „E" vasmag felső sarkának irányába. A kitérés következtében a tekercsek közötti légrések egyenlőtlenné válnak. Az egyenlőtlen légrés következtében megváltozik a rendszer mágneses ellenállása, az 5. ábra jobb oldalán látható módon, amiből adódóan kimenő elektromos jel keletkezik. A keletkezett jel az erősítőn keresztül a szervomotorhoz halad tovább [9], [13].

Az analóg ADC-egységek belső felépítésük alapján két modulra oszthatók. Az első modul feldolgozza a hőmérsékletet, a statikus és a teljes nyomásból származó adatokat. Ezt követően továbbítja az adatokat a magasság, a számított repülési sebesség, a Mach-szám és a valódi repülési sebesség meghatározásához. A második a magassági modulból származó adatokat dolgozza fel és határozza meg a függőleges sebességet [8].

Matematikai képletek segítségével felírhatók a Mach-szám, a valódi repülési sebesség, a statikus és a dinamikus nyomás összefüggései (6. ábra).



6. ábra
Az ADC működési elve (Békési Bertold [10] alapján)

Ezeket a matematikai képleteket használja fel az ADC-egység, és folyamatos számításokat végez a bemenő jelek adataiból. A számítások után a kimeneten megjelennek az adatok, és továbbhaladnak a megfelelő egységek felé [8], [10].

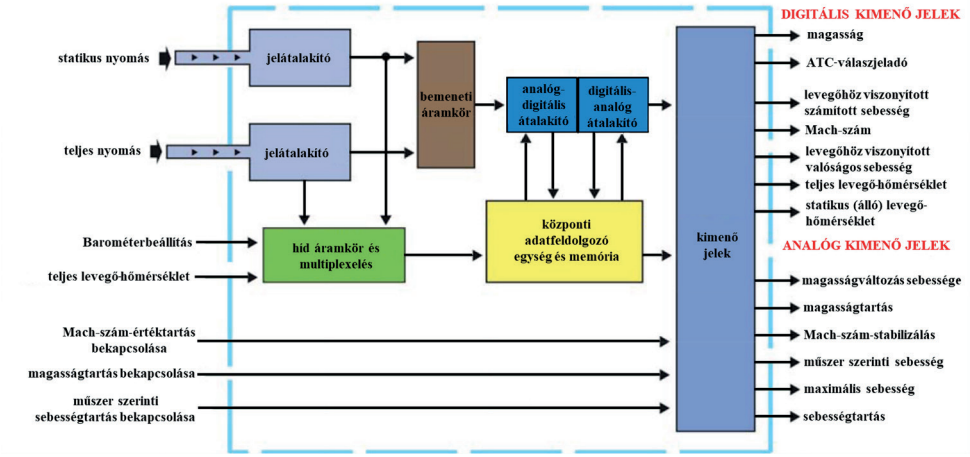
4.2. Digitális levegőparaméter-adatok számítóegysége

A modern légi járművek rendszerei között egyre gyakrabban jelennek meg a digitális ADC-k (DADC[24]). Ezek az egységek bináris jelek segítségével látják el feladatukat. A bemenő analóg jelekből, jelátalakító segítségével hozzák létre a digitális információt [5], [7], [8].

A nyomás és hőmérséklet analóg jelét a rendszer átalakítja, megtörténik a bináris jelek feldolgozása, számítása és az adatok pilótafülkébe való továbbítása. Az analóg típusokkal szemben a szervomotorok helyett további számítástechnikai eszközöket és elektronikai áramköröket építenek be. Abban az esetben, ha analóg kimeneti jelre van szükség, akkor ennek megvalósítása csupán a digitális jelek visszaalakításával érhető el, hiszen a bemeneti adatokat a rendszer közvetlen módon digitálissá alakítja [9].

A digitális rendszerek adatbuszokat használnak nagy mennyiségű információ továbbítására. A kompatibilitás érdekében ezeket a közös előírásoknak megfelelően kell megtervezni. A repülőelektronika legnagyobb és legsikeresebb vállalata az amerikai egyesült államokbeli ARINC (Aeronautical Radio Incorporated). A vállalat kínált először olyan gyors és egyben megbízható adatbuszrendszereket, amelyek gyakorlatilag bármelyik repülőgéptípusba integrálhatók voltak. A mai napig a repülőgépek jelentős hányada ezeket az adatbuszokat használja, mind a polgári, mind a katonai repülőgépeken [3]. A 7. ábrán a digitális ADC-rendszer elvi felépítése látható [9].

[24] DADC: Digital Air Data Computer.



7. ábra
Digitális ADC felépítése (Békési Bertold [9] alapján)

A Mach-érték, magasságérték és a műszer szerinti sebesség- (IAS[25]-) értéktartó módok bekapcsolásával az adott feladat végrehajtásához szükséges adatokat továbbítja a robotpilóta egységéhez. Ebben az esetben olyan érzékelő berendezéseket alkalmaz, amelyek úgy vannak kialakítva, hogy tartalmazzák magukban a távadót is, ezért külön érzékelő és jelátalakító berendezésre nincs szükség. Működésük elve, hogy összehasonlítást végeznek a beállított és a valós értékek között, majd a megfelelő jeleket továbbítják a robotpilóta felé [9].

4.3. A rendszer redundanciája

A légi járművek esetében kiemelkedően fontos a berendezések, műszerek és szoftverek megfelelő működése, meghibásodásuk kockázatának a lehető legalacsonyabb szintre csökkentése. A kockázat minimalizálása érdekében szükséges a fontosabb területeket úgynevezett tartalékokkal ellátni. Esetünkben a tartalék akkor aktiválódik, ha az elsődleges rendszerben hiba lép fel, a másodlagos rendszer nélkül pedig komoly problémák adódnának. A biztonság fontos szempont, de figyelembe kell venni, hogy valóban csak a legszükségesebb rendszereken alkalmazzák ezt, hiszen a túlbiztosítás magas költségeket vonhat maga után a repülés területén, nem beszélve a megnövekedett tömegről, amely a hasznos terhelhetőséget csökkenti [11].

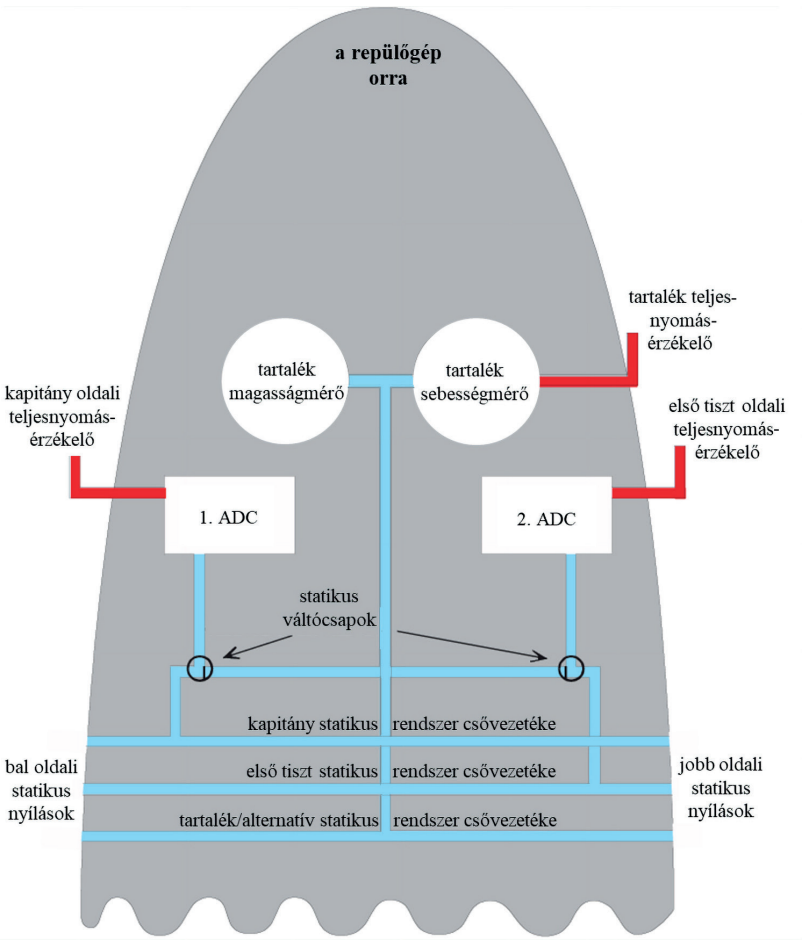
A repülések során előfordulhat, hogy a repülőgépen levő statikus nyomásvételező portok közül valamelyik eltömődik vagy eljegesedik, és a szükséges értékek nem jelennek meg a bemeneten, ami a különböző repüléshez fontos paraméterek kijelzéseinek meghiúsulásához vezethet. Az ilyen jellegű hibák elkerülése érdekében történik a rendszer redundáns

[25] IAS: Indicated Air Speed.

kialakítása. A rendszer úgy épül fel, hogy lehetőség nyíljon váltócsapokon keresztül mindkét ADC nyomásadatokkal való ellátása, ha valamelyik ágon hiba lép fel [8].

A meghibásodás felderíthetőségének szempontjából bizonyos repülőgépeken a két ADC-ből származó kimenő adatok megjelenítése keverve történik; a jobb, illetve a bal oldali ADC-ből egyaránt információk kerülnek az ellentétes oldali kijelzőkre [8].

Ezen összefüggések alapján megérthető, hogy légi járművek esetében miért szükséges két ADC alkalmazása, amelyek külön-külön biztosítják az adatokat a kapitány és az első tiszt számára, valamint hogy az adatvételezés megvalósítása miért is egymástól független portokon, mérőpontokon keresztül történik. A 8. ábrán a redundáns rendszer elvi felépítése látható.



8. ábra
Redundáns rendszer (Békési Bertold [2], [8] alapján)

4.4. Hibajelzés

A nem megfelelő működés jelzésének szempontjából összehasonlító felügyelőrendszert is beépíthetnek. Ennek az egységnek a feladata a két ADC kimenő jeleinek összehasonlítása. A nem megfelelő értékeknél automatikusan figyelmeztető jelzést ad a pilóták számára. A mechanikus műszerek esetében az értékek összehasonlítása csak vizuálisan végezhető el. A hibajelzés a kijelzőkön kívül, külön a központi figyelmeztető rendszer paneljén is megtörténhet.

Az ADS-nek számos előnye van a hagyományos műszerekhez képest. Továbbfejlesztett kijelzők és elektromos műszerek egyértelmű és könnyen leolvasható információt biztosítanak. A hagyományos mechanikus műszerek meghibásodásának jelentős része a belső alkatrészek között fellépő súrlódásból következik, emiatt késleltetési hiba léphet fel. Az analóg ADS-ek szervomotorokat alkalmaznak, ebből adódóan jelentősebb súrlódások nem alakulnak ki, késleltetési hibák nem jelentkeznek. A digitális ADS-ek esetében még kevesebb mechanikai kapcsolatokat megvalósító elemekkel ellátott berendezéseket alkalmaznak [2], [8].

4.5. Hibajavítás

Ahhoz, hogy ugyanazon ADS-típusokat különböző légi járműveken is alkalmazni lehessen, megfelelő korrekciókra és integrációra van szükség. A repülőgépeken eltérő, illetve speciális helyeken helyezhetik el a mérőpontokat. Nyomásterekből, illetve a különböző áramlási szögekből adódóan úgynevezett helyzethibák alakulnak ki, amelyek eltérő előjelű és nagyságrendű hibákat okozhatnak a Pitot-statikus portok elhelyezésének függvényében. Az ilyen jellegű hibák korrigálásához pozícióhiba-korrekció, angolul PEC[26] szükséges [1], [13].

Az ADC-be való kézi adatbevitelre nincs lehetőség bármilyen meghibásodás esetén, de a beépített tesztberendezés (BITE) azonnal jelzi az esetlegesen fellépő hibát. Ezért minden ADC-ben háromféle BITE-folyamat létezik:

- bekapcsolási teszt – az ADC bekapcsolásakor, indításkor vagy szünet után. A mikroprocesszor, a memóriatároló és a levegőparaméter-adat funkciók ellenőrzése történik;
- folyamatos teszt – ez minden bemeneti és kimeneti szakasz automatikus ellenőrzése, amelyet az ADC működése során körülbelül másodpercenként végez el;
- karbantartási teszt – ez lehetővé teszi a karbantartó személyzet számára, hogy a földön ellenőrzéseket végezzen a Teszt vagy Teszt/előzmények kapcsoló segítségével (jelenlegi vagy meghibásodások utáni) [2], [6], [8].

5. Befejezés

A cikkben bemutattuk a légi járműveken alkalmazott levegőparaméter-adatok számító egységét. Rengeteg repülőgéptípus van a világon, eltérő berendezésekkel és műszerezettséggel, de láthatjuk, hogy a számítástechnika minden területen egyre nagyobb jelentőséggel jelenik meg és váltja fel az analóg eszközöket. Találkozhatunk kisebb és egyszerűbb Air Data Unit berendezésekkel, de akár bonyolultabb, a nagy méretű repülőgépeken alkalmazott, magasan

[26] PEC: Position Error Correction.

integrált és nagy számítási kapacitással rendelkező repülési adatok rendszerével (ADS) is. Ezek a berendezések biztosítják a repüléssel kapcsolatos fontosabb paraméterek kijelzését, rögzítését és további felhasználását. A digitális technika mellett azonban fontos a biztonság és a túlbiztosítás is, ezért ezen a területen még az analóg műszerek továbbra is megtalálhatók (az újabb repülőgépeken ezeket felváltja az elektromos táplálású), amelyek főként készenléti helyzetben vannak, és a fő rendszer meghibásodása esetén lépnek működésbe.

Irodalomjegyzék

[1] Airbus Helicopters Germany, *Air Speed Indication Calibration Measurement Position Error Correction-PEC.* 2014. Online:: https://doi.org/10.5162/etc2014/6.3

[2] "Air Data Computer," in *Aircraft General Knowledge 4. Instrumentation.* 4th Edition. JAA/EASA ATPL syllabus, Oxford Aviation Academy (UK) Limited, pp. 257–264. 2008. Online: https://dokumen.tips/documents/oxford-atpl-4th-ed-book-05aircraft-general-knowledge-4instrumentation.html?page=2

[3] Békési B., *Műszertan I.* Repüléstudományi Szemelvények 2020. pp. 149–206. Online: www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem-2020.pdf

[4] Boeing 737 Air Data & Inertial Reference Unit. *Facebook,* é. n. Online: www.facebook.com/B737Theory

[5] Digital Air Data Computer. *Electronic Note,* é. n. Online: http://myelectronicnote.blogspot.com/2017/05/dadc-digial-air-data-computer.html

[6] EASA ATPL Training: Instrumentation. 2016. pp. 69–71.

[7] Flight Mechanic, *Air Data Computers (ADC) and Digital Air Data Computers (DADC).* Online: www.flight-mechanic.com/pressure-instruments-part-two/

[8] "Air Data Computer," in *Instrumentation ATPL Ground Training Series.* CAE Oxford Aviation Academy (UK), pp. 97–100. 2014. Online: https://vk.com/doc295496974_438639456?hash=7ed6dbd121b9cb92dc

[9] "Central Air Data Computer," in *Instrumentation JAA ATPL Training.* Jeppesen Sanderson Inc., pp. 61–64. 2004. Online: https://dokumen.tips/education/jeppesen-instrumentation-55d984ff7a1df.html?page=2

[10] *Instrumentation.* EASA ATPL Training, Boeing Services Deutschland GmbH, Jeppesen, 2016.

[11] Kosztolányi T. et al., „Robotrepülőgépek Redundáns Rendszerei," *Repüléstudományi Közlemények,* 24. évf. 2. sz. pp. 908–910. 2012. Online: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2012_cikkek/73_Makkay_Imre-at_all.pdf

[12] Moir, I., Seabridge, A., Jukes, M.,: *Civil Avionics Systems.* 2nd Edition. John Wiley & Sons Ltd., 2013. Online: https://doi.org/10.2514/4.102288

[13] Pallett, E. H. J., *Aircraft Instruments & Integrated Systems.* Pearson Prentice Hall, 1992.

[14] SKYbrary, *Air Data Computer (ADC).* é. n. Online: https://skybrary.aero/articles/air-data-computer-adc

Aircraft Air Data Processing And Transmission System – The Air Data Computer

During the flights, various air data are continuously measured. The incoming information is necessary for pilots and equipment to perform various tasks and achieve safe flight. Modern computer equipment provides an opportunity to upgrade mechanical instruments and instrument systems. With the use of computers and other digital equipment, the processing, transmission and display of data are carried out in a different way than conventional. In this article, the authors describe the structure of the Air Data System used in modern aircraft, the tasks of the system components and their operation.

Keywords: *Air Data Computer (ADC), Air Data System (ADS), Air Data Inertial Reference Unit (ADIRU), Pitot-static system, digital ADC*

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

Csóré Attila
hadnagy, üzemeltető mérnök
MH vitéz Szentgyörgyi Dezső 101. Repülődandár
Logisztikai alegységek, Repülőműszaki Zászlóalj
Szállítórepülőgép Üzembentartó Század
csoreattila19@gmail.com
orcid.org/0000-0002-2892-5166

Attila Csóré
Lieutenant, Maintenance Engineer
MH "Dezső Szentgyörgyi" 101st Aviation Brigade
Logistics subunits, Aviation Technical Battalion
Transport Aircraft Operator Squadron
csoreattila19@gmail.com
orcid.org/0000-0002-2892-5166

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

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
34. évfolyam (2022) 3. szám 91–107. • DOI: 10.32560/rk.2022.3.7

András Vajda, István Szalkai

New Complex Military and Civil UAV[1]/RPA[2] Classification System for Registration, Administrative Purposes, and Special Operation Preparation

In addition to the existing different UAV classification terms (e.g. NATO JAPCC,[3] UVSI,[4] US ARMY, EASA,[5] CAA,[6] etc.), the article deals with the necessity and possibilities of creating a new, more sophisticated and unified classification system, combined with a high security labelling system that provides a more professional registry of UAVs (both civilian and military). Based on the new unique code system, it is possible to clearly identify the most essential properties and specification data (e.g. payload, armaments, hanging points, sensors, range, endurance, speed and altitude ranges, weather minimums, etc.), nature of use (e.g. military recon/assault, SAR,[7] agriculture, law enforcement, recreation, hobby, commercial, etc.), type of flight modes, risk level (combined with accident statistics), cost of the unit, VIN,[8] etc. It also helps the efficient work of law enforcement agencies/authorities to check the lawfulness of UAV operation onsite (database contains photos, insurance status and other detailed information), avoiding corrupt identification of the unit.

Keywords: *UAV, classification, RFID,[9] authority, onsite, inspection, police, identification, registration, insurance*

1. The need for classification of UAVs

It is not a novelty finding that the development and spread of UAVs is unstoppably progressing, which has now become part of everyday life. The improvement of technology and science, the emergence and research of new lighter and higher tensile strength materials, the development

1 Unmanned Aerial Vehicle.
2 Remotely Piloted Aircraft.
3 Joint Air Power Competence Centre.
4 UVS International: The association represents Unmanned Aerial System (UAS) manufacturers and operators, etc.
5 European Union Aviation Safety Agency.
6 Civil Aviation Authority.
7 Search and Rescue.
8 Vehicle Identification Number.
9 Radio Frequency Identification.

of batteries, engines (electronic, piston, gas turbine, hybrid, CO_2, nuclear, etc.), the lower production costs and higher performances of advanced sensors, control systems, spares and subsystems and last but not least the rapid development of optical systems resulted in smaller and cheaper UAVs, so they became common and available for everyone.

Table 1.
UAV definitions [1]

UAV definition by Act XCVII of 1995 on Aviation	
UAV	A civil **aerial vehicle**, which is designed and operated in such a way that its driving is not carried out by a person on board.
Aerial vehicle	**Any structure** whose atmospheric residence is due to interaction with air other than the effects of airborne forces on the ground.
State UAV	Aerial vehicle for military, customs, police and border control bodies, which are designed and operated in such a way that they are not driven by a person on board.
UAV definition by the U.S. Department of Defense	
UAV	A powered, aerial vehicle that does not carry a human operator, uses aerodynamic forces to provide vehicle lift, can fly autonomously or be piloted remotely, can be expendable or recoverable, and can carry a lethal or non-lethal payload. Ballistic or semi-ballistic vehicles, cruise missiles, and artillery projectiles are not considered unmanned aerial vehicles [2].
UAV definition by ICAO circular no 328 AN/190	
UAV	An unmanned aerial vehicle is a pilotless aircraft, in the sense of Article 8 of the Convention on International Civil Aviation, which is flown without a pilot-in-command on-board and is either remotely and fully controlled from another place (ground, another aircraft, space) or programmed and fully autonomous.

According to the current (6 April 2016) Hungarian law (see Table 1), the following devices can also be identified or classified as an UAV (see Figure 1).



Figure 1.
Interesting objects that can be classified as UAVs by the current Hungarian law [3]

Although a multimillion-dollar state-of-the-art military attack UAV according to the present legislation is legally similar to an 8-dollar children's toy drone, they are completely different in nearly every aspect (see Figure 2).

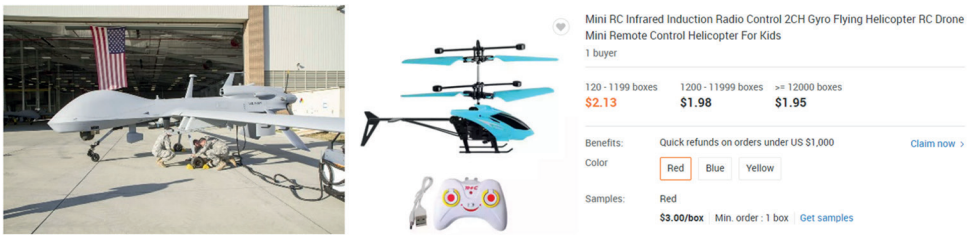


Figure 2.
Price range: General Atomics MQ-1C Gray Eagle (unit cost: 21.5 million USD FY2013[10]) vs a Mini RC Infrared Induction Radio Control 2CH Gyro Flying Helicopter for Kids from Alibaba (unit cost: 1.95 USD) [4], [5]

We will demonstrate in the following pages, that the existing classification systems are neither able to fulfil all the requirements of a modern legislation and regulation system, nor able to classify even the present and future drones according to their real risk factor.

If we want to analyse a UAV, we need to consider – among others – the following main aspects:

- construction (fix/rotor wing, electric/jet powered, size, materials, number of rotors, etc.);
- performance (max. altitude, speed, MTOW,[11] payload, etc.);
- capabilities (onboard sensors, armament, utilities, filming, etc.);
- legal conditions (legal limitations, required insurance, licenses, etc.);
- financial conditions (price and availability, etc.).

Usually the construction (as a carrier of the sensors, armament, etc.) is subordinated to performance, it is not a goal, it is only a tool for achieving the goal. In these cases, the most important aspect is always the capability for the specified task. All other properties are subordinate. This statement is not necessarily true for private users, often the construction itself is the most important aspect (e.g. RC[12] modellers). Summarising the preferences of different end-users for construction, performance, capabilities, legal and financial conditions, the following table would be created (see Table 2) based on market research.

Table 2.
Importance level of different users [6]

Average importance levels of main factors (1: not important, 2: moderately important, 3: important 4: very important					
Type of user	**Construction**	**Performance**	**Capabilities**	**Legal conditions**	**Financial conditions**
Military/state user	1	4	4	2	2
Professional and company user	1	3	3	2	3
Private user	3	2	2	1	4

[10] Fiscal year.
[11] Maximum take-off weight.
[12] Radio controlled.

For their strategic importance, military systems operate independently (in practice, in parallel with civilian systems), in line with military specifications and requirements. As a result of the liberalisation of the aviation market, private owners/operators are present in both aerodrome infrastructure and aircraft, as well as in air traffic or service areas [7].

The legislation system cannot work effectively without identifying the potential different risk factors based on several aspects. UAVs are getting more and more common in our life. We would like to demonstrate some examples, why regulations and classification are important.

2. Applied classification systems

The currently used classification systems usually form groups based on 1 to 3 aspects only. These tables are usually suitable to enlist each of these devices into 1 category, but in most cases useless for clearly placing them upon variable criteria of more categories.

Case (see next tables): We have a special UAV with the following specification:

- MTOW: 20 grams;
- Max. speed: 18 knots;
- Max operating altitude: 1,000 feet AMSL[13];
- Max. range: 2 km;
- On board equipment: built in 4K camera, deployable container for 2-gram payload (e.g. for Novichok poison used in the U.K. to eliminate Russian MI6 agent).

Question: Which group does this UAV belong to, based on the classification tables? Can we specify the risk level from the following tables (see Tables 3–11)?

Answer

Table 3.
Device identification according to different classification systems [6]

Classification system	Category	Suitable to determine risk level?
U.S. Army	N/A	No
EASA	A1 / C0 **("No regulation" category!!!)**	No
U.S. DoD	Group 3	No
Scientific article	N/A	No
CAA	Class II Micro	No
NATO JAPCC	N/A	No
UVSI	N/A	No

The newest technology allows us to have/buy this special utility UAV. In most cases we cannot specify obviously the right group, as some parameters fit into different groups. If a regulation will be set for this device, it will be extremely difficult to determine what group's (e.g. safety) regulation would be valid for this.

[13] Above Mean Sea Level.

The existing tables are usually not very effective, they are nice and seem scientific, but the level of practicality and usability is often limited (see the case before). The quantity and quality of available information are also limited, and sometimes it is impossible to fit the device into one category, as properties cannot make clear justification (so, tables become more or less useless).

We would like to show you some examples of current classification systems [8].

Table 4.
UAV classification system by the U.S. Army [8]

	Class I UAV	Class II UAV	Class III UAV	Class IV UAV
Level	Platoon	Company	Battalion	Brigade
Weight	2–5 kg	50–75 kg	150–250 kg	>1,500 kg
Flight endurance	50 min	2 h	6 h	24 h
Range	8 km	16 km	40 km	75 km

Table 5.
Classification of EASA UAV categories [9]

Operation		Remote pilot competency (age according to MS legislation)	UAS				UAS operator registration
Sub-category	Area of operation (far from aerodromes, maximum height 120 m)		Class	MTOM / Joule (J)	Main technical requirements (CE marking)	Electronic ID / Geo awareness	
A1 Fly over people	You can fly over uninvolved people (not over clouds)	Read consumer info	Privately built	<250 g	N/A	No	No
			C0		Consumer information, Toy directive or < 19 m/s, no sharp edges, selectable height limit.		
		Consumer info Online training, Online test,	C1	<80 J or <900 g	Consumer information, < 19 m/s, kinetic energy, mechanical strength, lost-link management, no sharp edges, selectable height limit.		
A2 Fly close to people	You can fly at a safe distance from uninvolved people	Consumer info Online training, online test, theoretical test in center recognised by the aviation authority	C2	< 4 kg	Consumer information, mechanical strength, no sharp edges, lost-link management, selectable height limit, frangibility, low speed mode.	**Yes + unique SN for identification**	Yes

Operation		Remote pilot competency (age according to MS legislation)	UAS				UAS operator registration
Sub-category	Area of operation (far from aerodromes, maximum height 120 m)		Class	MTOM / Joule (J)	Main technical requirements (CE marking)	Electronic ID / Geo awareness	
A3 Fly far from people	You should: • fly in an area where it is reasonably expected that no uninvolved people will be endangered • keep safe distance from urban areas	Consumer info Online training, Online test,	C3	< 25 kg	Consumer information, lost-link management, selectable height limit, frangibility.	If required by zone of operations	
			C4		Consumer information, no automatic flight		
			Privately built		N/A		

Table 6.
U.S. Department of Defense (DoD) – UAV classification system [10]

UAS Group	Size	MTOW (lb.)	Nominal operating altitude (ft)	Speed (knots)	Representative UAS
Group 1	Small	0–20	<1,200 AGL	<100	RQ-11 Raven, WASP
Group 2	Medium	21–55	<3,500 AGL	<250	ScanEagle
Group 3	Large	<1,320	<FL 180		RQ-7B Shadow, RQ-21 Blackjack, NAVMAR RQ-23 Tigershark
Group 4	Larger	>1,320		Any airspeed	MQ-8B Fire Scout, MQ-1A/B Predator, MQ-1C Gray Eagle
Group 5	Largest		>FL 180		MQ-9 Reaper, RQ-4 Global Hawk, MQ-4C Triton

Table 7.
UAV classification by a scientific article [11]

	MTOW (kg)	Distance	Radius (nm)	Alt (feet)
Class 0	<25	close	<10	1,000
Class 1	25–500	short	10–100	15,000
Class 2	501–2,000	medium	101–500	30,000
Class 3	2,000<	long	500<	30,000<

Table 8.
CAA classification system [8]

Categories	Description	Maximum Take-off Mass (kg)	Flight Altitude (m)		Remarks
Class I Fix wing Rotor wing Lighter than air	Micro	<1.5/2	<150 AGL	<500	Flight vs. visually perceptible horizon
	Group A	> 1.5 / 2 < 7			
	Group B	> 7 < 25			
	Group C	> 25 < 150			

Categories	Description	Maximum Take-off Mass (kg)	Flight Altitude (m)		Remarks
Class II Fix wing Rotor wing Lighter than air	Micro	<1.5/2	>150 AGL	>500	Flight over the horizon
	Group A	> 1.5 / 2 < 7			
	Group B	> 7 < 25			
	Group C	> 25 < 150			

Table 9.
UAV classification by NATO JAPCC [12]

Class	Category	Normal employment	Normal Operating Altitude	Normal Mission Radius
Class I (less than 150 kg)	Small (> 20 kg)	Tactical Unit (employs launch system)	<5,000 ft AGL	AGL 50 km (LOS)
	Mini (2–20 kg)	Tactical Sub-unit (manual launch)	<3,000 ft AGL	25 km (LOS)
	Micro (< 2 kg)	Tactical PI, Sect, Individual (single operator)	<200 ft AGL	5 km (LOS)
Class II (150–600 kg)	Tactical	Tactical Formation	<10,000 ft AGL	200 km (LOS)
Class III (>600 kg)	Strike/Combat	Strategic/National	<65,000 ft	Unlimited (BLOS)
	HALE	Strategic/National	<65,000 ft	Unlimited (BLOS)
	MALE	Operational/Theatre	<45,000 ft MSL	Unlimited (BLOS)

Table 10.
UVSI classification system [8]

Description	Abbreviation	MTOM (kg)	Range (km)	Max. Flight Altitude (m)	Flight Endurance (h)
Tactical					
Nano (NAV)	η	<0.025	<1	100	<1
Micro (MAV)	μ	<5	<10	250	1
Mini	MINI	<30	<10	150–300	<2
Close range	CR	150	10–30	3,000	2–4
Short range	SR	200	30–70	3,000	3–6
Medium range	MR	150–500	70–200	3–5,000	6–10
Medium Range, Endurance	MRE	500–1,500	>500	5–8,000	10–18
Low Altitude, Deep Penetration	LADP	350	>250	50–9,000	0.5–1
Low Altitude, Long Endurance	LALE	<30	>500	3,000	>24
Medium Altitude, Long Endurance	MALE	1,000–1,500	>500	14,000	24–48
Strategic					
High Altitude, Long Endurance	HALE	2,500–12,500	>2,000	15–20,000	24–48
Combat UAV	UCAV	10,000	~1,500	10,000	~2
Special task					
Lethal	LET	250	300	3–4,000	3–4
Decoys	DEC	250	<500	50–5,000	>4

Table 11.
Different UAV regulations in some EU Member States [13]

Country	MTOW	Regulations
Czech Republic	m ≤ 20 kg	Continuous visual contact No license required Banned from residential area and airport vicinities
	m > 20 kg	Special operation license required for commercial activity Approaching people and buildings – except take-off and landing – closer than 100 m is strictly forbidden Must keep min. 150 m horizontal distance from crowded areas No operation allowed over residential areas and roads with heavy traffic Special license can provide exemption from the above mentioned limitations on an ad hoc basis
Poland	m ≤ 25 kg max	No altitude limitations Continuous visual contact Mandatory insurance No operation in the 5 km vicinity of airports without ATC prior permission No operation allowed closer than 100 m from residential areas, No operation allowed closer than 30 m from people, animals and vehicles
Romania	m ≤ 500 g	No limitations
	500 g < m < 150 kg	Prior permission is required (by phone) Prior permission from the Ministry of National Defence required for all operations below 3,000 m over Bucharest
	15 kg ≥ m	Airworthiness Certificate required
	20 kg ≥ m	Insurance required
Croatia	m ≤ 150 kg	Insurance required Operation license required Continuous visual contact Max. operation altitude: 500 m AGL Only day operation allowed No operation in the vicinity of airports closer than 3 km No operation allowed closer than 30 m from people, buildings and residential areas No operation allowed closer than 150 m from group of people
Italy	m ≤ 300 g	Considered risk-free operation if speed is less than 60 km/h Continuous visual contact No operation allowed over and in the vicinity of people, residential and critical infrastructure areas
	300 g < m ≤ 25 kg	Continuous visual contact No operation allowed over and in the vicinity of people, residential and critical infrastructure areas
	25 kg < m ≤ 150 kg	Airworthiness Certificate required Permission from CAA before operation is required
Germany	m ≤ 250 g	Continuous visual contact
	m ≥ 250 g	Continuous visual contact Owner name and address must be attached on a fireproof table
	m > 2 kg	Continuous visual contact Drone pilot license required
	m > 5 kg	Operation license required General license (e.g. operation in restricted airspace, catastrophe site, etc.) Ad-hoc license
	m ≤ 25 kg	Continuous visual contact

Country	MTOW	Regulations
France	m ≤ 25 kg	No altitude limits No pilot license required No type and airworthiness license required No airspace regulations Continuous visual contact
	m > 25 kg	No altitude limits Pilot license required Type and airworthiness license required No airspace regulations Continuous visual contact



Figure 3.
Electronic ID sample: XPS-TR Mode S Transponder with ADS-B Out [14]

The XPS-TR (Figure 3) is a Mode S transponder that incorporates ADS-B Out broadcast technology. Installing the lightweight, compact transponder on UAV will enhance the aircraft's flight safety by adding a continuous means to determine its location.

3. Size vs. potential risk

Most of the existing classification systems are focusing on the size primarily (based on the MTOW), when they want differentiate regulations. It is also valid for the 2019/945 EU regulation. As you can see from the previous tables, the regulations and classifications are all completely different, none of them can help the effective regulations. If a modeller goes to another country within Schengen boundaries, he/she can break the law or hurt the interests of individuals very easily.

We also need to consider the risk factors in a more sophisticated way; therefore, identifying the privacy and terror risks are essential over the standard ground and aerial risks. The weight/speed/altitude, etc. itself should not be the only criteria as a high speed, low weight and small size UAV with an advanced optical device with manual control without autonomous control system and home back function could be much more dangerous, than a 2.1 kg low speed UAV with the state-of-the-art control system and automatic avoidance/geo awareness system (see the case).

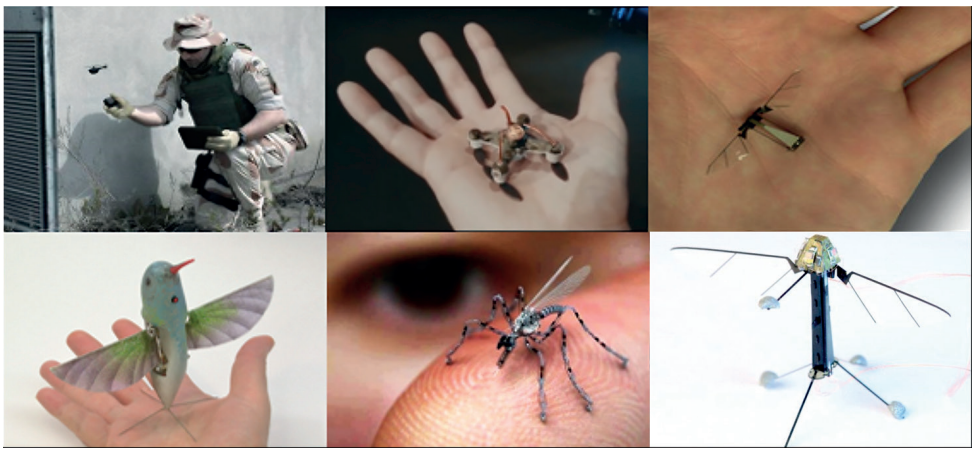


Figure 4.
Unclassified light weight drones under 250 grams [3]

The UAVs shown in Figure 4 are all known to the public (not under secret R+D), all of them have special capabilities (spy drones, can do remote DNA sampling, lethal [suicide] attack missions, swarm technology [see description further], etc.). All these models are real, some of them are older than 10 years. Please remember for the right lower UAV, its weight is only 106 mg (much less than a gram), it will have importance later. We should not forget that today's technology is more developed, and this listing does not include classified newest R+D models.

4. Uncontrolled production and usage

Normally everyone can operate a small toy/hobby/sport UAV by his/her own; being a member of a professional UAV operator organisation or association is not obligatory. Furthermore, everyone can design an UAV, he/she is not obliged to license the home-built UAVs by professional notified bodies (yet), if the maximum take-off weight of the aircraft does not exceed 120 grams and is unable to be operated more than 100 meters from the operator (according to 2009/48/EC Directive). These factors and the lack of professional control could create some risks that should be handled by the law.

Internet acts as an easily reachable effective, but uncontrolled information database and a promotional media, from where the users can buy entire products and systems, or they can download nearly any product specifications, even entire controlled or uncontrolled design plans, demo videos, CBTs,[14] control systems, tools, applications, etc. Today's technology allows users to download existing 3D designs of any parts (except electrical parts like servos, PCBs,[15] etc.) or even full UAV models (Figure 5), helping the home-made production as home-based

[14] Computer Based Training.
[15] Printed circuit board.

3D printers can print the parts directly, allowing cheap and fast part production. It is also obvious that it is impossible to supervise/control all kinds of small UAVs, plans, parts, etc.



Figure 5.
Web portal specialised in 3D printable UAVs [15]

Due to the rapid development of webshop-type sales channels and the connecting CEP[16] shipping services, the new technology solutions and parts can spread rapidly and widely all over the world uncontrolled. There are countless manufacturers/merchants on the market, who do not only produce/sell ready-made drones, but also parts, sensors, control systems, "Mode S" transponders, other professional/consumer quality subsystems, etc.; therefore, anyone can design and assemble a unique UAV at home from numerous components in hours/days. The number of potential configurations is uncountable.

5. UAVs in the transportation sector (passenger and cargo)

Besides classical military, law enforcement, SAR and agricultural air surveillance applications, UAVs are getting involved in daily trade and transport too (see Figure 6 and 7), they are becoming common in the near future. We hear news about the first services of different areas. For example, on 16 November 2016 Domino Pizza in Whangaparaoa, New Zealand completed the first order delivery, which was 2 pizzas (for scientific accuracy and keeping the credibility, let us note that the world's first UAV delivered food order was a "Peri-peri Chicken Pizza" and a "Chicken and Cranberry Pizza" [8]).



Figure 6.
The world's first real food order delivery by a UAV (see the box winching system, avoiding landing over residentials for safety and security reasons). The right picture shows an early model of the same company [3], [16], [17]

[16] Courier Express Parcel: a time guaranteed parcel shipping service, which has a rapidly growing share in the world's shipping services. The abbreviation comes from the German Manner-Romberg Unternehmensberatung GmbH., who used this expression for first time.

A revolution can be predicted in the postal delivery market (CEP), which can significantly reduce delivery time especially in overcrowded, high traffic intensity areas or countryside. There are a lot of issues that should be solved (e.g. interference, sabotage, naughty children, weather phenomena, other outer forces, safety, etc.). Sometimes big companies have failures as well.



Figure 7.
Russian Post launched its first UAV post drone on 2 April 2018. The 20,000 USD drone smashed into a building and tumbled to the ground a few seconds after airborne [18]

The top futuristic, but existing application would be the air taxi/passenger UAV (Figure 8 and 9). More companies made research, and some have made the first tests as well. Two of the most high-profile single-seat passenger drones under test phase are the Ehang 184 and the Volocopter VC200.



Figure 8.
The first UAV designed to carry a passenger was introduced at the Consumer Electronics Show (CES) 2016 by Chinese entrepreneurs and is called the Ehang 184 [19]



Figure 9.
Volocopter VC200 passenger drone with 18 separate rotors, created by the German E-Volo company [20]

As we can see, the task is the same, but the concept, the safety factor and the implementation are completely different.

6. Micro and nano drones, swarm technology

We should not forget to mention the state-of-the-art new technologies about nano and micro UAVs, and swarm technology. UAV Swarming/swarm intelligence is a field of robotics research. Using appropriate software, the UAVs act like "aerial robots", which can ascend synchronously, communicate with each other in mid-air and create cross-references. Fixed formation group flights and complex acrobatic group flights are thus possible.

The U.S. Department of Defense conducted a successful test in October 2016, where 103 Perdix drones were launched from three F/A-18 Super Hornets (Figure 10). The micro-drones demonstrated advanced swarm behaviours such as collective decision-making, adaptive formation flying and self-healing abilities. The drones collectively decide that a mission has been accomplished, fly on to the next mission and carry out that one. The benefit of a swarm is that if one drone drops out – and a few appear to crash – the group can rearrange itself to maintain coverage.



Figure 10.
103 Perdix drones launched from F/A-18 Super Hornets (UAV carrier operation) [21]

"Due to the complex nature of combat, Perdix are not pre-programmed synchronized individuals, they are a collective organism, sharing one distributed brain for decision-making and adapting to each other like swarms in nature", said SCO Director William Roper. "Because every Perdix communicates and collaborates with every other Perdix, the swarm has no leader and can gracefully adapt to drones entering or exiting the team" [22].

This technology opens a wide corridor for further developments not only in military applications, but in several commercial, industrial, law enforcement and SAR applications outdoor and indoor.

7. Summary on classification

We do not want to list all types of UAVs in this article, these were only examples about different types, different safety and risk levels and it shows the extremely wide diversity of UAV applications.

The dramatic increase in the number and types of drones justifies them being classified into certain classes according to certain criteria.

We should make a significant difference between them in many ways, especially when we are talking about legal regulations and the terms of operation. An appropriate differential classification system is an elementary requirement for an effective system, that can help in administration, operation, regulation and supervision.

If the regulations will be too strict, most of the users will commit violations, most of them will not be ticketed because of the lack of effective control. It would be a mistake. If the rules are too loose, it can be dangerous for the society. Appropriate regulation needs exact classification of the existing diverse devices.

Although it would be obvious, we can hardly find any legal aid to determine the right class of different UAVs in our existing law. The above referred Act on Air Transportation already obliged the CAA to create a public official UAV registration database, but it does not exist yet.

We already asked information from the CAA, and the received questionnaire does not contain any relevant template to create a useful, searchable and sortable database, nor helps any third party or the CAA to make any research or product development or regulation or feedback for UAV services, operation or other applications. Only the following data are asked: UAV's manufacturer, type and VIN/SN[17] and owner's personal data (name, date of birth, mother's maiden name, address, phone number, e-mail). No other information requested by the authority about take-off weight, performance, dimensions, accessories, etc.

Our aim is to create a new, more sophisticated and unified classification system, combined with a high security labelling system that provides a more professional registry of UAVs (both civilian and military). Based on the new unique code system, it is possible to clearly identify the most essential properties and specification data (e.g. payload, armaments, hanging points, sensors, range, endurance, speed and altitude ranges, etc.), nature of use (e.g. military recon/assault, SAR, agriculture, law enforcement, recreation, hobby, commercial, etc.), type of flight modes, weather minimums, risk level (combined with accident statistics), cost of the unit, VIN/SN, etc. It also helps the efficient work of law enforcement agencies/

[17] Vehicle Identification Number/Serial Number.

authorities to check the lawfulness of UAV operation on site (database contains photos, insurance status and other detailed information), avoiding corrupt identification of the unit. We identify further application possibilities for military, law enforcement, commercial and administrative purposes.

References

[1] Act XCVIII of 1995 on Aviation, 71. § 5., 35., 36 points, table made by the authors.
[2] M. Palik, 'A harcászati pilótanélküli repülő eszközök képességei'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 18, no 2. pp. 23–28, p. 4. 2006.
[3] Photo montage by the authors.
[4] J. Gould and B. Harris, 'Congress pushes DoD to rule on Gray Eagle drone delivery to Ukraine'. *Defense News,* 22 September 2022. Online: www.defensenews.com/unmanned/2022/09/22/congress-pushes-dod-to-rule-on-gray-eagle-drone-delivery-to-ukraine/
[5] Alibaba.com. Online: www.alibaba.com/product-detail/Mini-RC-Infrared-Induction-Radio-Control_1600610505552.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.28414b9b5GWX4Q
[6] Table made by the authors.
[7] M. Palik and A. Vajda, 'Polgári-katonai együttműködés a légi forgalmi szakszemélyzetek képzésében'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 20, no 1. pp. 15–24. 2008.
[8] Table made by the authors based on B. Békési, Zs. Bottyán, P. Dunai, A. Halászné Tóth, I. Makkay, M. Palik, Á. Restás and T. Wührl, *Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek.* Budapest, National University of Public Service. pp. 65–69. 2013. Online: www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/UAV_handbook_Secon_edition.pdf
[9] Table made by the authors based on Commission Regulation (EU) 2019/945 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems.
[10] Table made by the authors based on Wikipedia, *U.S. military UAS groups.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/U.S._military_UAS_groups
[11] Table made by the authors based on M. Palik, *Pilóta nélküli légi jármű rendszerek légi felderítésre történő alkalmazásának lehetőségei a légierő haderőnem repülőcsapatai katonai műveleteiben.* PhD thesis. Budapest, Zrínyi Miklós National Defence University. p. 20. 2007.
[12] Table made by the authors based on Strategic Concept of Employment for Unmanned Aircraft Systems in NATO, NATO JAPCC. Online: www.japcc.org/wp-content/uploads/UAS_CONEMP.pdf
[13] Table made by the authors based on A. Halászné Tóth, Colonel, Head of the Military Aviation Department in the Hungarian MoD, lecture held at the Repüléstudományi Konferencia, 2018.
[14] Online: www.unmannedsystemstechnology.com/company/sagetech-corporation/
[15] Online: https://all3dp.com/3d-print-drone-parts/
[16] Online: www.dominos.com.au/inside-dominos/media/november-2016-pizza-by-drone-a-reality-with-world-first-customer-deliveries-in-new-zealand; https://mikeshouts.com/dominos-dru-drone-made-first-delivery/

[17] Online: https://easyhobbylondon.wordpress.com/2013/09/07/pizza-delivered-by-drone-the-next-big-thing/
[18] Online: https://qz.com/1244172/watch-a-russian-postal-drone-crash-on-it-first-flight/
[19] Aviation Voice: 'Passenger Carrying UAS Launched by Chinese Company'. 01 August 2016. Online: https://aviationvoice.com/passenger-carrying-uas-launched-by-chinese-company-201601081153/
[20] W. Diedrichs, 'The Volocopter VC200: a superb engineering achievement'. *Motorburn,* 01 July 2015. Online: http://motorburn.com/2015/07/the-volocopter-vc200-a-superb-engineering-achievement/
[21] Screenshot from www.google.hu/search?biw=1920&bih=989&tbm=isch&sa=1&ei=xv7NWsPiHoTEwAKBw7DIDA&q=swarm+uav+f-18&oq=swarm+uav+f-18&gs_l=psy-ab.3…52592.54236.0.54497.5.5.0.0.0.0.65.265.5.5.0….0…1c.1.64.psy-ab..0.1.56…0i30k1.0.mj3uHBCPW_U#imgrc=zc5KAk-59DU9QM
[22] U.S. Department of Defense, 'Department of Defense Announces Successful Micro-Drone Demonstration'. *Press Release,* 09 January 2017. Online: www.defense.gov/News/News-Releases/News-Release-View/Article/1044811/department-of-defense-announces-successful-micro-drone-demonstration/

Új komplex katonai és polgári UAV/RPA osztályozási rendszer regisztrációs és közigazgatási célú felhasználáshoz, valamint különleges műveletek előkészítéséhez

A cikkben megvizsgáljuk egy új, a jelenleg használatos (NATO JAPCC, UVSI, U.S. ARMY, EASA, CAA stb.) pilóta nélküli légi járművek osztályozási rendszerénél kifinomultabb, részletesebb egységesített osztályozási rendszer létrehozásának szükségességét és lehetőségeit, amelyet kombinálunk egy magas biztonsági fokozatú RFID alapú jelölőrendszerrel, amely lehetővé teszi a polgári és katonai UAV-k professzionális szintű regisztrációját. Az új egyedi kódrendszer alapján lehetőség kínálkozik a légi járművek legfontosabb tulajdonságainak és paramétereinek (pl. hasznos terhelhetőség, fegyverzet, függesztőpontok, szenzorok, hatósugár és hatótávolság, sebesség- és magasságtartományok, időjárási minimumok stb.), a felhasználás jellegének (pl. légi felderítő/harcászati, kutató-mentő, katasztrófavédelmi, mezőgazdasági, rendészeti, rekreációs, hobby, kereskedelmi, ipari stb.), a repülési módok, a kockázati szint (baleseti statisztikával), az egységár, azonosítószám stb. gyors meghatározására, azonosítására, valamint a központi adatbázisból ezen szempontok alapján történő leválogatásra is. E rendszer segíti az igazgatásrendészeti és hatósági munkát, a helyszíni ellenőrzések során megállapíthatóvá válik az üzemben tartás és üzemeltetés jogszerűsége (az online adatbázis tartalmaz fotót, biztosítási és egyéb fontos státuszokat stb.), valamint meggátolja az egyedi azonosítóval történő visszaélést is.

Kulcsszavak: *UAV, osztályozás, RFID, hatóság, helyszíni ellenőrzés, rendőrség, azonosítás, regisztráció, biztosítás*

Vajda András doktori hallgató Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola vajda.kmdi@gmail.com orcid.org/0000-0003-3855-9013	András Vajda PhD student University of Public Service Doctoral School of Military Engineering vajda.kmdi@gmail.com orcid.org/0000-0003-3855-9013
Szalkai István osztályvezető Fővárosi Közterület-fenntartó Zrt. Belső Ellenőrzési Osztály szalkaii@t-email.hu orcid.org/0000-0003-4667-9525	István Szalkai Head of Department Metropolitan Public Domain Maintenance Private Company Limited by Shares Department of Internal Audit szalkaii@t-email.hu orcid.org/0000-0003-4667-9525

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
34. évfolyam (2022) 3. szám 109–124. • DOI: 10.32560/rk.2022.3.8

Páll Márton, Wantuch Ferenc

Szupercellák objektív felismertetése villámadatok segítségével

Magyarország területén évente átlagosan 60–80 szupercella alakul ki, amelyek nagy része károkozó időjárási jelenséget okoz hazánkban. A szupercellák előrejelezhetőségük és felismerésük szempontjából különösen kiemelt figyelmet érdemelnek, hiszen ezekhez a zivatarokhoz köthető a szignifikáns heves események nagy része, mint például a nagy méretű jégszemeket tartalmazó jégesők, heves kifutószelek és ritka esetben a mezociklonális tornádók is. A munkánkban arra voltunk kíváncsiak, hogy milyen jellemző villámkarakterisztikákkal rendelkeznek a szupercellás zivatarok, illetve egy tapasztalati pontozási rendszert is felállítottunk arra vonatkozóan, hogy eldöntsük valós idejű villámadatok alapján, hogy az adott zivatarcella szupercella-e, vagy sem. A villámindex kidolgozásával, a nowcasting rendszerbe táplálva a mért adatokat egy-egy zivatarcellához mérőszámot lehetne illeszteni, ennek segítségével döntést lehetne hozni a zivatarok típusáról és hevességéről pusztán a villámadatokat figyelembe véve.

Kulcsszavak: *szupercella, LINET, CG villám, IC villám, CAPE, mezoléptékű konvektív rendszerek, villámparaméterek, mezociklon*

1. A konvekció és a szupercellás zivatarok jellemzése

A szupercellás zivatarok kialakulásához alapvetően 3 légköri komponens együttes meglétére van szükség:

- labilitás;
- konvergencia;
- szélnyírás.

Az első két komponens nemcsak a szupercellák, hanem a nem szupercellás zivatarok kialakulásához is szükséges. A 3. komponens az, amitől egy zivatarból szupercella tud kialakulni.

1.1. Labilitás

A zivatarok kialakulásához szükséges, hogy a légkör labilis állapotban legyen. A légköri labilitás mérőszáma a konvektív hasznosítható energia (*convective available potential energy*, CAPE), amely egy integrálként áll elő a légoszlop adott rétegében. A szinoptikus gyakorlatban azt

a légrészt vizsgáljuk, ahol az emelkedő levegő virtuális hőmérséklete (T_v') meghaladja a környezet virtuális hőmérsékletét. A réteg alsó határa a szabad konvekció szintje (*Level of Free Convection,* LFC), míg a réteg felső szintjén az emelkedő és nedves adiabatikusan hűlő levegő virtuális hőmérséklete megegyezik a környezet T_v virtuális hőmérsékletével (*Equilibrium Level,* EL). Itt válik a felhajtóerő nullává. E felett az emelkedő levegő már lassul, és hamarosan eléri az emelkedés felső határát. Az emelkedő levegő a hűlés miatt már hidegebb lesz a környezeti levegőnél (súrlódásos rezgőmozgás analógiája). A légköri labilitás mérőszáma a CAPE[1], amely integrálként áll elő:

$$\int_{LFC}^{EL} g\,\frac{T_v'-T_v}{T_v}\,dz \tag{1}$$

A CAPE a termodinamikai diagramon pozitív területként jelenik meg. Minél nagyobb az integrál értéke, annál nagyobb a labilitás értéke is. Lényeges az „alakja", ugyanis ebből több veszélyes meteorológiai paraméterre is következtethetünk, például az adott légrész jégpotenciáljára, vagy a heves kifutószél kockázatára. Magyarországon a 2500 J/kg-os kép már extrém magasnak számít. A szupercellák kialakulását megelőzően a CAPE általában igen magas (> 1000 J/kg) értékeket vesz fel.

Fontos megemlíteni, hogy a CAPE több különböző formában is előállítható, úgymint:

- SBCAPE (surface based CAPE): ekkor a CAPE értékét a felszínről elindított légrész alapján számítjuk;
- MUCAPE (most unstable CAPE): ebben az esetben a légkör legalsó 300 hPa-os szintje közül kiválasztjuk a leglabilisabbat, és így kapjuk meg a MUCAPE értékét. Az előbbiekben leírtak alapján: MUCAPE ≥ SBCAPE.

1.2. Konvergencia

A második komponens a konvergencia, amely a triggerhatást jelenti a zivatarok kialakulásánál. A konvergencia hatására a felszíni összeáramlás az anyagmegmaradás törvényének eleget téve feláramlást hoz létre, amely zivatarfelhőt generálhat. Tartós konvergencia esetén nem mezociklonális tornádók is kialakulhatnak.

1.3. Szélnyírás

A harmadik komponens a szélnyírás, amely a szélvektor vagy a szélvektor bármely komponensének adott irányú lokális változása. A függőleges szélnyírást a $\frac{\partial v}{\partial z}$ vagy a $\frac{\partial v}{\partial p}$ taggal mint vertikális koordinátával fejezhetjük ki. A v a szélvektort jelöli. Ha a szél geosztrofikus, akkor a vertikális szélnyírást a termikus szél egyenletéből számíthatjuk ki. Szupercellás esetben a 0–6 km közötti szélnyírás a fontos, ugyanis a mezociklon ebben a térrészben keletkezik. Ennek kritikus értéke 15 m/s, ha ezt eléri vagy meghaladja a szélnyírás, és az előző két komponens is rendelkezésre áll, akkor jó eséllyel számíthatunk szupercella kialakulására.

[1] CAPE: Convective Available Potential Energy – konvektív hasznosítható potenciális energia.

1.4. Zivatartípusok

Zivatarról akkor beszélünk, ha egy felhőben elektromos tevékenység nyilvánul meg, amelyhez dörgés társul. A zivataroknak három fajtáját különböztetjük meg.

Az első fajta az úgynevezett monocellás, azaz egycellás zivatar. Ennek a zivatartípusnak általában rövid az élettartama, maximum 1 órán keresztül képes fennmaradni. Létrejöttében többnyire a Nap besugárzása által keltett sűrűségkülönbség hatására elmozduló termikek játszanak szerepet. Az egycellás zivatarok olyan időjárási helyzetben jöhetnek létre, amikor a szélnyírás mértéke nem éri el a 10 m/s-ot a 0 és a 6 km-es szint között. Ennek a zivatarnak a kifutószele nem elég nagy ahhoz, hogy újabb cellák keletkezését tudja beindítani. Tipikus egycellás időjárási helyzet, amikor a nyári hónapok folyamán egy anticiklon peremén megindulnak a termikek, majd, mivel más dinamikai hatás nem éri őket, egycellás zivatarok keletkeznek belőlük.

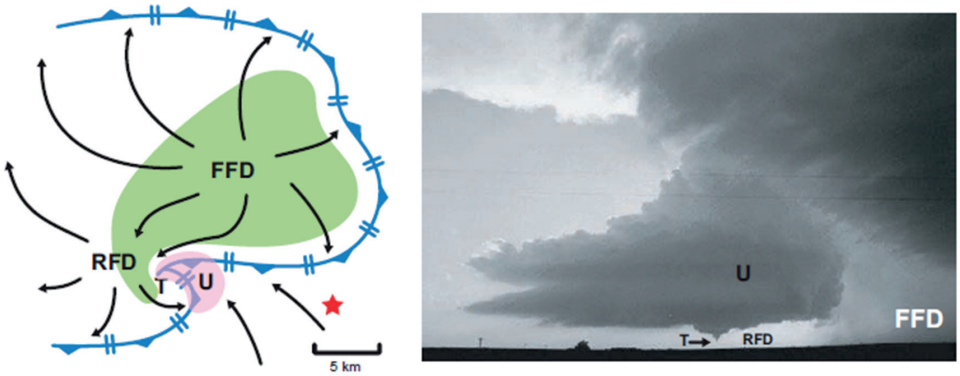
A második fajta zivatartípus a multicellás zivatar. Ezek a zivatarok akár több órán keresztül is képesek fennmaradni, és ha megfelelőek az időjárási viszonyok, akkor akár villámárvizet is létre tudnak hozni. Létrejöttéhez már szükséges a szélnyírás dinamikai hatása is, az értéke multicellás zivatarok esetén meghaladja a 10 m/s-ot de nem éri el a 15–20 m/s-ot a 0 és a 6 km-es réteg között. Valószínűleg ez a legelterjedtebb zivatartípus a középső szélességek területén, mivel ritkán adódik olyan helyzet, amikor a szélnyírás mértéke csekély, ugyanakkor még ritkább az a helyzet, amikor a szélnyírás meghaladja a szupercellák kialakulásához szükséges értéket. A multicellás zivatarok életében fontos szerepet játszik az, hogy a kifutószél olyan erejű, hogy az a szabad konvekciós szint fölé tudja emelni a termikeket, ezáltal újabb zivatarokat hozva létre [2]. A multicellás zivatarokra jellemző, hogy az új cellák mindig a cella szélnyírásvektor-állásával megegyező irányban alakulnak ki, illetve, hogy a multicellás zivatar ugyanebbe az irányba fejlődik [8].

1.5. Szupercella-karakterisztikák és a szupercellák szerkezete

Ezekre a zivatarokra jellemző, hogy hosszú, akár 11 órás élettartamot is el tudnak érni [3], ami semmilyen másik zivatartípusról nem mondható el.

A szupercellák dinamikai sajátosságaiból következően hosszú élettartamúak, ami a másik két zivatartípusra nem igaz. A szupercellák külső ismertetőjegyei közé tartoznak:

- túlnyúló csúcs, amely a rendkívül erős (akár 30 m/s-os) feláramlás miatt jön létre, ez a zivatarfelhő olyan része, amely a sztratoszférába nyúlik;
- mezociklon, ami a feláramlás hatására létrejövő, függőleges tengelyű örvény. Az örvény a szélnyírás hatására jön létre, és többek között ez biztosítja a zivatar hosszú élettartamát. A mezociklon egy ciklonálisan forgó örvény, körülbelül 2–10 km átmérőjű a konvektív zivatarban. A mezociklonhoz társuló örvényesség gyakran 10^{-2} s^{-1} vagy annál nagyobb nagyságrendű. Az USA területén gyakran adnak ki tornádófigyelmeztetést akkor, amikor a mezociklon megjelenik a radarképen;
- falfelhő, amelyből ideális esetben mezociklonális tornádó nyúlhat le.



1. ábra

Mezociklonális tornádó helye a bal oldali, sematikus ábrán, felülnézetből (T), a jobb oldali ábrán egy fényképen (Megjegyzés: Az U a feláramlást jelöli. Az RFD-t[2] [hátoldali leáramlás] és az FFD-t[3] [előoldali leáramlás] később említjük majd. A csillag azt a helyet jelöli, ahol a fotós a jobb oldali képen áll) [7]

A szupercellás zivatarokra jellemző az egy csatornából álló, csavarodó megjelenésű feláramlási torony, amelyben a feláramlási sebesség akár az 50 m/s-os értéket is elérheti. Jellemző a szupercellákra a szárnyfelhő-torony, amely a zivatar hátsó oldalán, a leáramlás és a beáramlás zónájának a peremén alakulhat ki. A falfelhő, amely a zivatar alsó részén jelenik meg, kijelöli a feláramlás legalsó részét. A falfelhőnél gyakran található egy kis csóva, amely a csapadékzónába nyúlik át, nedves levegőt szippant fel a csapadékzónából, és ez a nedves levegő pluszban biztosítja a feláramlás nedvesség-utánpótlását.

A feláramlás a radarképeken egy úgynevezett „körülhatárolt gyenge reflektivitású betüremkedésként" jelenik meg. Ez a régió azért jöhet létre, mert a fő feláramlási csatornában olyan erős vertikális szél uralkodik, amely nem engedi, hogy bármelyik hidrometeor lefele essen.

A túlnyúló csúcs jelenléte annak tudható be, hogy a zivatarban a feláramlás annyira erős, hogy magasabbra tud emelkedni a kiegyenlítődési szintnél, ahol az üllő található, majd át tudja törni a tropopauzát, ezáltal a sztratoszféra alsó szintjéig tud hatolni.

A szupercelláknak három fő fajtájuk van: a klasszikus (CL, *classic*), a kis csapadékú (LP, *Low Precipitation*), illetve a nagy csapadékú (HP, *High Precipitation*) [11]. Azt, hogy milyen fajta szupercella tud kialakulni, nagyban befolyásolják a nedvességi viszonyok, illetve a nagy magasságokban (300 hPa) fújó szelek, legalábbis az izolált cellák esetében. Ha a nagy magasságban fújó szelek gyengék (hozzávetőlegesen 18 m/s alattiak), akkor a hidrometeorok nem tudnak messzire jutni a feláramlástól, így annak környezetében hullnak le. Ezt nevezzük HP, azaz nagy csapadékú szupercellának. Ha a magasban (300 hPa) fújó szél meghaladja a 28 m/s-ot, akkor a hidrometeorok messzire elsodródhatnak a feláramlástól, így látványos szerkezetű, kis csapadékú, LP-szupercellák jöhetnek létre. Ha a szélsebesség a két érték közé esik, akkor jön létre a CL, azaz klasszikus szupercella [7].

A szupercellás zivatarokhoz két fő leáramlási régió tartozik. Az egyik leáramlási rész az RFD, azaz a hátoldali leáramlás. A másik leáramlási régió az FFD, az előoldali leáramlás.

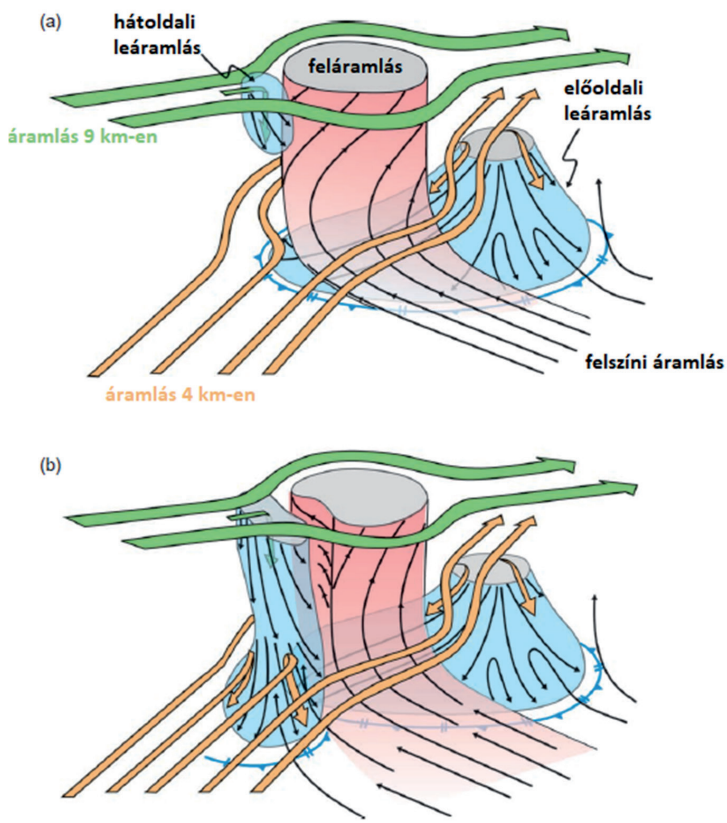
[2] Rear Flank Downdraft.
[3] Forward Flank Downdraft.

Ez előbb alakul ki, mint az RFD, amit a 1. ábra is jól mutat [12]. A 2. ábra a középszinti áramlást 4 km-en, míg a jet helyzetét a 9 km-es szinten jelöli.

A konceptuális modell egyik része, amit nagy valószínűséggel nem szabad szó szerint venni, az a nagy magasságokból a felszínre való leáramlás. A folyamat dinamikája még nem teljesen tisztázott.

Az RFD kialakulásának két különböző elmélete van. Az egyik a termodinamikai, amely szerint a középső és magas szinteken a zivatarnak, pontosabban a feláramlásba keveredő száraz szél hatására elpárolognak a feláramlásban lévő hidrometeorok. Ennek hatására hőfelszabadulás történik, amely a feláramlásnak csapódó levegőre negatív gyorsulást fejt ki, ezért ez elindul a földfelszín irányába.

Az RFD hőmérséklet-deficitje egyik szupercellától a másikig változik, 0 °C-tól egészen 10 °C-ig terjedhet, de megfigyeltek már 20 °C-os deficitet is [13]. Ez a különbség erősen függ a hidrometeorok mennyiségétől, illetve a környezet relatív nedvességétől. Ugyanakkor a magasabb értékeket a termodinamikai folyamatok önmagukban nem magyarázzák.



2. ábra

Szupercellás zivatar fel- és leáramlásainak 3D-s sematikus ábrája. (Az a) ábra a kezdeti fázisban lévő, míg a b) ábra a fejlett fázisban lévő szupercella áramlási rendszerét mutatja) [7].

2. Villámadatok

Az Országos Meteorológiai Szolgálat rendelkezésünkre bocsátotta olyan napok villámadatait, amelyeken a LINET[4]-mérőhálózat által lefedett területen egy napon fordult elő szupercellás és nem szupercellás zivatar.

2.1. A LINET-mérőrendszer

A LINET villámdetektáló hálózat 2007 májusában indult Magyarországon egy közép-európai kezdeményezés részeként, több szervezet közreműködésével. Magyarországon az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) működteti a 11 szenzorból álló LINET-rendszert, amely két központi egység segítségével alkotja a villámlokalizációs hálózatot. A 11 állomás együttesen tudja az úgynevezett beérkezésiidő-különbség módszerével meghatározni a lecsapó villámokat (CG)[5] és a felhőben keletkező kisülések (IC)[6] helyzetét. Egy adott villám helyének meghatározásához általában elegendő bármely 4 állomás regisztrátuma, hiszen matematikailag ebben az esetben lehet pontosan meghatározni a villámlás helyét időkülönbséges módszer esetén. A felhőben keletkező kisülések időben általában megelőzik a lecsapó villámokat, és jellemzően több van belőlük, bár az arányuk minden egyes zivatar esetében más és más.

A LINET főként a lecsapó villámok detektálására alkalmas. A korábban alkalmazott iránymérésen alapuló SAFIR villámlás lokalizációs rendszer esetén a felhő–felhő és a lecsapó villámok aránya 5:1, míg a LINET esetében 1:1, tehát a LINET jóval kevesebb felhőn belüli villámot detektál. A vizsgálatunkban az előbbiekben leírtakat nem vettük figyelembe a kevés esetszám miatt.

2.2. A szupercellák kiválogatása

Az általunk megjelölt napokon kialakultak szupercellák és nem szupercellás zivatarok is. Azt, hogy éppen szupercellával van-e dolgunk, több szempont alapján ellenőriztük, amelyek az 1. táblázatban láthatók.

1. táblázat
A szupercellák megkülönböztetése a többi zivatartól [14]

Típus	**Érték**
Szélnyírás	Minimum 15 m/s
Radar	Deviáns mozgás, esetleg hosszú élettartam
Műholdkép	Túlnyúló csúcs jelenléte
Fénykép	Szupercellás ismertetőjegyek

Néhány alkalommal fénykép nem állt rendelkezésre a zivatarról, ezért ilyenkor csak a másik három érték segítségével tudtunk döntést hozni az adott celláról. Miután kiválasztottuk

[4] LINET: Lightning Detection Network.
[5] CG: cloud to ground, azaz felhő–föld villám.
[6] IC: intra cloud, azaz felhő–felhő villám.

a szupercellákat, a hozzájuk tartozó villámadatokat is ki kellett válogatni, amelyet egy C nyelvben írt program segítségével tettünk meg.

2.3. Leválogató program

A villámlokalizációs rendszer mérési adatai az időpontokat, a földrajzi koordinátákat, valamint a villám fajtáját és további mért elektromos paramétereket tartalmaznak. Ez egy zivataros nyári napon hatalmas adathalmazt alkothat. Ebből az adathalmazból kell kiválogatni egy szupercellás zivatarhoz és egy nem szupercellás zivatarhoz tartozó adatokat. Mindez matematikailag azt jelenti, hogy egy tetszőleges (konvex vagy konkáv) burkológörbével látjuk el a zivatart, és el kell döntenünk, hogy egy adott villámmérés a poligonnak belső vagy külső pontja. Ennek a topológiai problémának a megoldása a Jordán-féle görbetételhez kapcsolódik. Röviden összefoglalva azt mondhatjuk, hogy az adott pontból félegyenest bocsátok ki növekvő x és rögzített y koordinátákból, és kiszámolom a burkológörbével alkotott metszéspontok számát. A metszéspontok számából eldönthető a kérdés, hogy belső vagy külső pontról van-e szó.

Természetesen ez csak a térbeli leválogatást jelenti, a vizsgálathoz szükségünk van időbeli leválogatásra is. A szakirodalomra támaszkodva az elmondottak alapján C nyelvű programot írtunk, amely megfelelően paraméterezve térbeli és időbeli leválogatást valósított meg tetszőleges zivatarra, tetszőleges időtartamra. Az említett program által leválogatott adatok alkották további vizsgálatunk adatbázisát [1], [2], [6], [9], [10].

2.4. A kialakított adatbázis

Miután a leválogató program segítségével kiválasztottuk a szupercellás zivatarok villámait egy .txt fájlba, a 2. táblázatban látható adatelrendezést kaptuk.

A kapott fájlokból aztán az R program segítségével kiválogattuk fajtánként a villámokat. Ezek után egy beépített tool segítségével alapvető leíró statisztikákat írattunk ki. A leíró statisztikákat pedig minden egyes zivatar minden villámtípusához (összes villám, IC, CG, IC+, IC–, CG+, CG–) Excel-táblákba rendeztük. Egy Excel-tábla felépítését a 3. ábrán láthatjuk.

3. Pontozási rendszer

Minden zivatarcellához kiválogattuk a villámadatait. A kiválogatott villámadatokat ezután többféle módon táblázatokba rendeztük, és elkülönüléseket kerestünk. Az egyik módszer szerint a nem szupercellás zivatarok sárga színt, míg a szupercellás zivatarok zöld színű mezőt kaptak, ezután az egyes oszlopokat növekvő sorrendbe rendeztük azért, hogy megnézzük, van-e elkülönülés a két típus között (3. ábra).

2. táblázat
A zivatarok összes villámainak karakterisztikái oszloponként növekvő sorrendben (zölddel a szupercellákat, míg sárgával a nem szupercellás zivatarokat jelöltük) [a szerzők]

elem-szám	átlag	szórás	medián	csonkolt átlag	szórás absz. értékkel	mini-mum	maxi-mum	terjede-lem	dőlés	lapult-ság	átlag standard hibája
8698	–0,19	14,02	3,10	0,52	9,27	–8,80	155,70	201,00	9,34	188,04	1,75
5827	–0,35	10,67	1,60	0,02	7,64	–11,30	116,10	160,40	7,77	116,00	0,85
3436	–0,51	8,16	–1,75	–0,63	7,41	–12,00	106,10	137,20	6,24	112,73	0,77
2165	–0,81	8,11	–1,90	–1,06	5,63	–12,70	92,80	134,90	6,04	99,29	0,56
1847	–0,9	7,38	–2,20	–1,15	5,04	–18,20	83,30	121,40	5,68	74,29	0,52
1242	–0,97	7,23	–2,20	–1,16	4,89	–21,60	72,30	108,70	2,30	32,79	0,44
1240	–1,35	6,98	–2,30	–1,53	4,82	–24,20	50,90	96,70	1,04	19,36	0,37
1034	–1,36	6,28	–2,30	–1,54	4,60	–26,90	42,00	96,50	0,98	18,54	0,32
939	–1,57	6,1	–2,40	–1,60	3,93	–28,60	31,10	94,60	0,63	14,61	0,23
558	–1,61	5,72	–2,60	–1,72	3,48	–28,80	28,90	78,30	0,63	10,12	0,21
418	–1,87	5,57	–2,65	–1,74	2,67	–39,10	24,40	68,00	0,34	6,12	0,21
250	–1,87	5,27	–2,70	–1,93	2,37	–45,30	21,50	65,60	0,11	3,40	0,19
226	–2,01	5,01	–2,70	–1,98	2,00	–45,30	20,10	65,10	–0,60	3,26	0,17
199	–2,24	4,89	–2,80	–2,07	1,93	–48,20	19,30	46,20	–0,68	2,68	0,12
162	–2,41	4,71	–3,10	–2,08	1,85	–50,40	17,40	41,70	–1,19	2,58	0,11
117	–2,7	4,07	–3,15	–2,53	1,78	–53,90	16,70	39,70	–1,31	2,11	0,11
72	–2,93	4	–3,20	–2,59	1,63	–54,70	14,70	28,70	–2,32	1,62	0,10
64	–3,02	3,72	–4,00	–2,75	1,63	–57,80	12,70	23,10	–2,43	1,59	0,08
40	–3,07	2,97	–4,20	–3,61	1,48	–106,10	10,40	21,50	–2,91	–0,39	0,07

A táblázatba rendezés után egy tapasztalati pontrendszert állítottunk fel, a pontozást sorba rendezés után alakítottuk ki. Megnéztük, hogy az egyes villámtípusoknál és a villámtípusokon belül egyes statisztikai mutatóknál milyen küszöbértékek vannak a szupercellák és a nem szupercellás zivatarok között. A kapott eredmény a 3. táblázatban olvasható.

3. táblázat
A kialakított pontrendszer (pozitív pontok) [a szerzők]

Villám típusa	Kritérium
Összes villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, **1 pont**
Összes villám	Ha legalább 2000 villám volt az adott cellában, akkor szupercella, **1 pont**
Összes villám	Ha a minimum –60 kA-nél kisebb, akkor szupercella, **1 pont**
CG villám	Ha a darabszám több, mint 1500, akkor szupercella, **1 pont**
CG villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, **1 pont**
CG villám	Ha 100 kA-nél nagyobb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor szupercella, **1 pont**
CG+ villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, **1 pont**
CG+ villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme nagyobb, mint 80 kA, akkor szupercella, **1 pont**
CG– villám	Ha a darabszám több, mint 1000, akkor szupercella, **1 pont**
IC villám	Ha a darabszám több, mint 700, akkor szupercella, **1 pont**
IC– villám	Ha a darabszám több, mint 400, akkor szupercella, **1 pont**
IC– villám	Ha a minimum 27 kA-nél kisebb, akkor szupercella, **1 pont**
Villám/perc	Ha több villám volt a cellában percenként, mint 30, akkor szupercella, **1 pont**

Miután a pozitív pontokat kialakítottuk, egy negatív pontrendszert is felállítottunk, hogy a zivatarokat a vilámkarakterisztikáik alapján jobban el tudjuk egymástól különíteni (4. táblázat).

4. táblázat
A kialakított negatív pontrendszer [a szerzők]

Villám típusa	Kritérium
Összes villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, **–1 pont**
Összes villám	Ha 40 kA-nél kisebb a villámok áramerősségeinek terjedelme: akkor nem szupercella, **–1 pont**
CG villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, **–1 pont**
CG villám	Ha 40 kA-nél kisebb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor nem szupercella, **–1 pont**
CG+ villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, **–1 pont**
CG+ villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 18 kA, akkor nem szupercella, **–1 pont**
IC villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 19 kA, akkor nem szupercella, **–1 pont**
IC villám	Ha a villámok áramerősségeinek minimuma nagyobb, mint 10 kA, akkor nem szupercella, **–1 pont**
IC– villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 10 kA, akkor nem szupercella, **–1 pont**

A pontozási rendszer eleinte csak pozitív pontokból állt, ebben az esetben homogénebb skálát kaptunk. Emiatt szükségünk volt egy negatív pontrendszer kialakítására, hogy a zivatarokat jobban el tudjuk különíteni.

A negatív pontrendszer bevezetésével a zivatarokat 3 csoportba lehet besorolni:

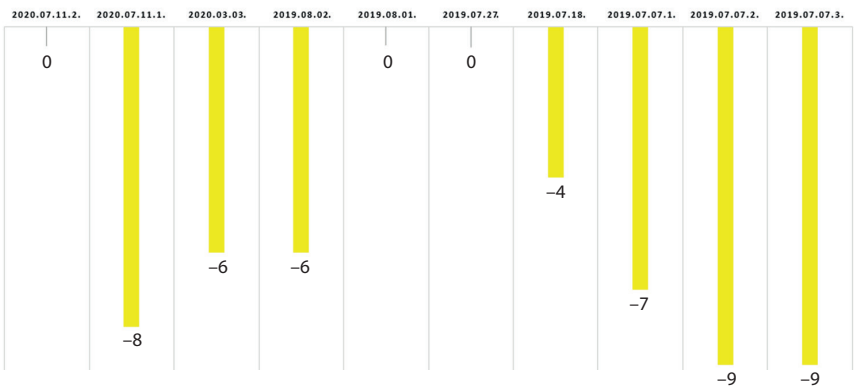
- szupercella: ha a pontozás után a cella pontjainak összege pozitív, akkor a zivatar szupercella;
- nem szupercellás zivatar: ha a pontozás után a cella pontjainak összege negatív, akkor a zivatar nem szupercella;
- nem dönthető el egyértelműen: ez az eset akkor áll fenn, amikor a pontok összege 0.

4. Eredmények

A vizsgálataink során 9 szupercellás és 10 nem szupercellás zivatart pontoztunk. A vizsgált zivatarok mind különálló, izolált cellák voltak, mivel így tudtuk elkerülni, hogy a leválogató programba ne kerüljenek más villám adatai, csak az adott celláé. A pontozás utáni értékek a 4. és 5. ábrán láthatók. Ebből az látszik, hogy egyetlen szupercella pontjai sem csúsznak át negatívba, illetve egyetlen nem szupercellás zivatar pontjai sem érnek el pozitív pontot, amit el is szerettünk volna érni. A vizsgált szupercellák közül egyik sem érte el a maximális 13 pontot, és csak egy szupercella kapott 0 pontot az összesítésben. Ennél a cellánál se negatív, se pozitív pont nem került bele az összegbe, tehát nem a negatív és pozitív pontok összege lett 0, hanem egyszerűen nem kapott pontot az adott cella. Ugyanez elmondható azokról a zivatarokról is, amelyek nem szupercellák voltak, de 0 pontot kaptak.



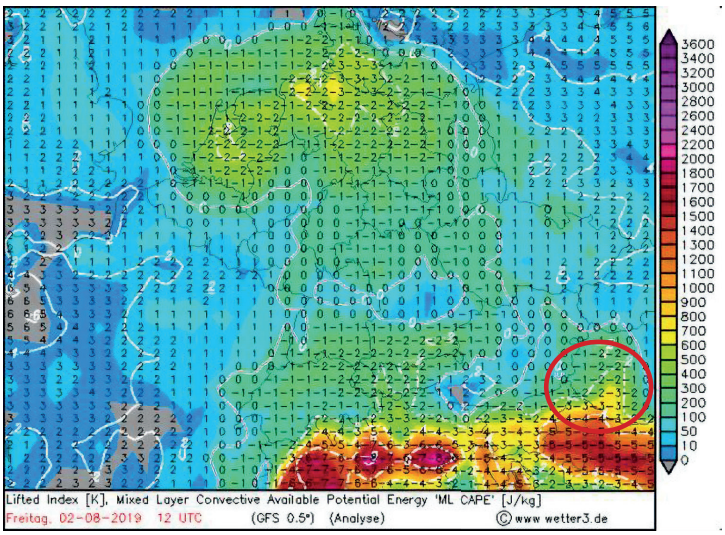
3. ábra
Az összesített pontszámok szupercellás zivatarok esetén [a szerzők]



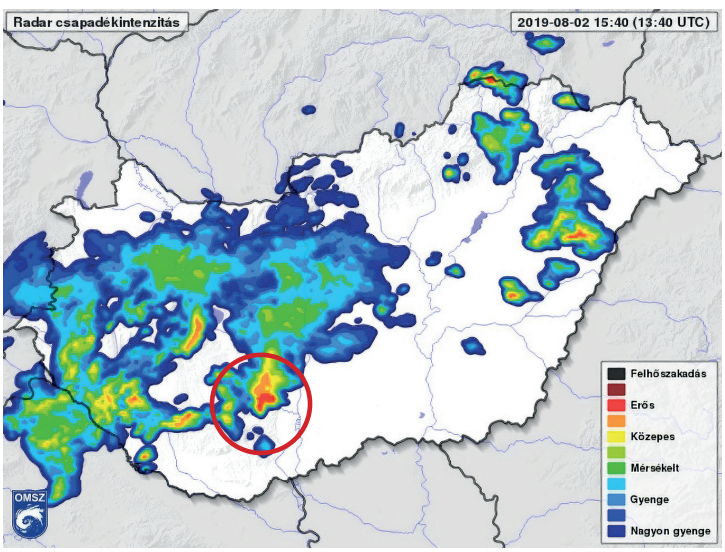
4. ábra
Az összesített pontszámok nem szupercellás zivatarok esetén [a szerzők]

5. A pontozás bemutatása egy esettanulmányon keresztül

A kialakított pontrendszerünket szerettük volna kipróbálni két zivataron. A szóban forgó két zivatar természetesen nem szerepelt az eddigi vizsgálatunkban, tehát elmondhatjuk, hogy a tesztelés független mintán történt. Az egyik szupercellás jegyeket, míg a másik nem szupercellás jegyeket mutatott. Mindkét zivatar 2019. augusztus 2-án alakult ki, mindkettő Magyarország területén. A szupercellás jegyeket mutató zivatar a Dunántúl déli részén pattant ki. Aznap azon a területen minden feltétel adott volt, hogy ez a zivatartípus kialakuljon: 15 m/s-ot meghaladó 0–6 km-es szélnyírás, emelési kényszer és labilitás (6. ábra).



5. ábra
A Dunántúl területén (pirossal bekarikázva) magas MLCAPE-értékek (1000 J/kg) körül (A Lifted Index is –3 körüli értéket vett fel.) [4]



6. ábra
A vizsgált szupercella pirossal bekarikázva [5]

A kiválasztott szupercella pontjai a 5., 6., 7. és 8. táblázatokból olvashatók ki. Láthatjuk, hogy majdnem minden esetben kapott pozitív pontot, míg negatívat egyszer sem.

5. táblázat
A szupercellás jegyeket mutató zivatar pozitív pontjai [a szerzők]

Villám típusa	Kritérium	A vizsgált cella értékei	Kapott pont
Összes villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, **1 pont**	101,4	1
Összes villám	Ha legalább 2000 villám volt az adott cellában, akkor szupercella, **1 pont**	6600	1
Összes villám	Ha a minimum –60 kA-nél kisebb, akkor szupercella, **1 pont**	–111,5	1
CG villám	Ha a darabszám több, mint 1500, akkor szupercella, **1 pont**	4798	1
CG villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, **1 pont**	101,4	1
CG villám	Ha 100 kA-nél nagyobb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor szupercella, **1 pont**	212,9	1
CG+ villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, **1 pont**	101,4	1
CG+ villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme nagyobb, mint 80 kA, akkor szupercella, **1 pont**	100	1
CG– villám	Ha a darabszám több, mint 1000, akkor szupercella, **1 pont**	2874	1
IC villám	Ha a darabszám több, mint 700, akkor szupercella, **1 pont**	1802	1
IC– villám	Ha a darabszám több, mint 400, akkor szupercella, **1 pont**	766	1
IC– villám	Ha a minimum 27 kA-nél kisebb, akkor szupercella, **1 pont**	–50,2	1
Villám/perc	Ha több villám volt a cellában percenként, mint 30, akkor szupercella, **1 pont**	23,57143	0
Pozitív pont összesen			**12**

A nem szupercellás zivatar esetében a pontozás a vártnak megfelelően alakult, hiszen egyszer sem kapott pozitív pontot, míg negatív pontot többször is.

6. táblázat
A szupercellás jegyeket mutató zivatar negatív pontjai [a szerzők]

Villám típusa	Kritérium	A vizsgált cella értékei	Kapott pont
Összes villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, **–1 pont**	101,4	0
Összes villám	Ha 40 kA-nél kisebb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor nem szupercella, **–1 pont**	212,9	0
CG villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, **–1 pont**	101,4	0
CG villám	Ha 40 kA-nél kisebb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor nem szupercella, **–1 pont**	212,9	0
CG+ villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, **–1 pont**	101,4	0
CG+ villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 18 kA, akkor nem szupercella, **–1 pont**	100,0	0
IC villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 19 kA, akkor nem szupercella, **–1 pont**	91,1	0
IC villám	Ha a villámok áramerősségeinek minimuma nagyobb, mint 10 kA, akkor nem szupercella, **–1 pont**	–50,2	0
IC– villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 10 kA, akkor nem szupercella, **–1 pont**	49,1	0
Negatív pont összesen			**0**

7. táblázat
A nem szupercellás jegyeket mutató zivatar pozitív pontjai [a szerzők]

Villám típusa	Kritérium	A vizsgált cella értékei	Kapott pont
Összes villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, **1 pont**	28,1	0
Összes villám	Ha legalább 2000 villám volt az adott cellában, akkor szupercella, **1 pont**	100,0	0
Összes villám	Ha a minimum –60 kA-nél kisebb, akkor szupercella, **1 pont**	–24,6	0
CG villám	Ha a darabszám több, mint 1500, akkor szupercella, **1 pont**	88,0	0
CG villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, **1 pont**	28,1	0
CG villám	Ha 100 kA-nél nagyobb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor szupercella, **1 pont**	52,7	0
CG+ villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 80 kA-nél nagyobb, akkor szupercella, **1 pont**	28,1	0
CG+ villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme nagyobb, mint 80 kA, akkor szupercella, **1 pont**	26,4	0
CG– villám	Ha a darabszám több, mint 1000, akkor szupercella, **1 pont**	41,0	0
IC villám	Ha a darabszám több, mint 700, akkor szupercella, **1 pont**	12,0	0
IC– villám	Ha a darabszám több, mint 400, akkor szupercella, **1 pont**	6,0	0
IC– villám	Ha a minimum 27 kA-nél kisebb, akkor szupercella, **1 pont**	–7,8	0
Villám/perc	Ha több villám volt a cellában percenként, mint 30, akkor szupercella, **1 pont**	1,75	0
Pozitív pont összesen			**0**

8. táblázat
A nem szupercellás jegyeket mutató zivatar negatív pontjai [a szerzők]

Villám típusa	Kritérium	A vizsgált cella értékei	Kapott pont
Összes villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, **–1 pont**	28,1	0
Összes villám	Ha 40 kA-nél kisebb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor nem szupercella, **–1 pont**	52,7	0
CG villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, **–1 pont**	28,1	0
CG villám	Ha 40 kA-nél kisebb a villámok áramerősségeinek terjedelme, akkor nem szupercella, **–1 pont**	52,7	0
CG+ villám	Ha a legerősebb villám áramerőssége 20 kA-nél kisebb, akkor nem szupercella, **–1 pont**	28,1	0
CG+ villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 18 kA, akkor nem szupercella, **–1 pont**	26,4	0
IC villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 19 kA, akkor nem szupercella, **–1 pont**	12,0	–1
IC villám	Ha a villámok áramerősségeinek minimuma nagyobb, mint 10 kA, akkor nem szupercella, **–1 pont**	–7,8	–1
IC– villám	Ha a villámok áramerősségeinek terjedelme kisebb, mint 10 kA, akkor nem szupercella, **–1 pont**	6,2	–1
Negatív pont összesen			**–3**

5.1. Az eredmények a két cellára nézve

9. táblázat
Összesített pontszámok [a szerzők]

Típus	Pozitív pont	Negatív pont	∑
Szupercellás jegyeket mutató zivatar	12	0	12
Szupercellás jegyeket nem mutató zivatar	0	–3	–3

A pontozási rendszer szerint a szupercellás jegyeket mutató zivatarról kijelenthetjük, hogy szupercella volt. Fordított esetben pedig az jelenthető ki, hogy nem szupercellás zivatart pontoztunk.

10. táblázat
Az adatasor felépítése [a szerzők]

2019. 08. 02.	10:12:43	CG	–3,9	0,000	47,8232	19,9474
2019. 08. 02.	10:12:43	CG	–3,8	0,000	47,8225	19,9593
2019. 08. 02.	10:17:23	CG	–3,7	0,000	47,8394	19,9328
2019. 08. 02.	10:18:25	re	3,5	8,000	47,8167	19,9803
2019. 08. 02.	10:18:25	CG	–5,7	0,000	47,8398	19,9427

Megjegyzés: az első két blokk a villám időpontja, a 3 középső oszlop a villám adatai (fajta, áramerősség kA-ben, magasság), az utolsó két oszlop pedig a villám koordinátái

6. Összegzés

Hazai, illetve nemzetközi szinten sem készítettek még vizsgálatot azzal kapcsolatban, hogy csupán villámadatok felhasználásával elkülöníthetők-e a nem szupercellás és a – gyakran kárt okozó heves eseményekkel teli – szupercellás zivatarok. Kutatásunk alapötlete szerint a két zivatartípus villámkarakterisztikái között találhatunk lényeges különbségeket, így akár egy egyszerű elkülönítési mechanizmussal felállíthatunk egy pontrendszert.

Az alapvető statisztikai mutatókban valóban jelentkezett érdemi különbség, ezeket a mutatókat az összes villámtípusra (IC, IC–, IC+, CG, CG–, CG+, összes villám) kiszámítottuk. Ezek alapján pontrendszert készítettünk, így a zivatarokat nem szupercellás és szupercellás típusba soroltuk, adott zivatar a pontrendszerben kaphatott negatív és pozitív pontot is.

Az előbbiekben leírtakat figyelembe véve – a rendelkezésünkre álló adatok alapján – a szupercellás zivatarok mindegyike 0 vagy pozitív pontot ért el, míg a nem szupercellás zivatarok 0 vagy negatív összpontszámot kaptak.

A pontrendszer helyességét ezután egy-egy független, a pontozási rendszer kialakításában részt nem vevő zivataron teszteltük, az egyik minta nem szupercellás jegyeket, míg a másik szupercellás jegyeket mutatott, és a pontozás utáni is mindkét zivatar a helyes kategóriába került.

Fontos megemlíteni, hogy ebben a cikkben olyan zivatarokat dolgoztunk fel, amelyek különálló, izolált cellák voltak. A későbbiekben érdemes lenne arra kitérni, hogy a nagyobb konvektív rendszerek, például zivatarláncok vagy mezoléptékű konvektív rendszerek milyen

villámtulajdonságokkal rendelkeznek. Az ilyen típusú meteorológiai képződményekre jó eséllyel egy újfajta pontozási rendszert kellene felállítani, ugyanis az ilyen, nagy kiterjedésű (mezo-α méretű) rendszerekben sokkal több extremitás fordul elő, mint az izolált zivatarok esetében.

Irodalomjegyzék

[1] Haines, E., *"Point in Polygon Strategies,"* in *Graphics Gems IV.* Heckbert, P. szerk., 1994. pp. 24–46. Online: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-336156-1.50013-6
[2] Horváth Á., *A légköri konvekció.* Országos Meteorológiai Szolgálat, 2007. p. 15
[3] Csonka T., Kolláth K., „Transzpannon szörnyeteg", avagy hosszú életű szupercellák 2008. július 14-én. Online : http://owww.met.hu/pages/bogacs20080714.php
[4] MetNet. Online: www.metnet.hu/radarkep?year=2019&month=8&day=02
[5] Archiv-Version des Animationstools. Online: http://www1.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html
[6] O'Rourke, J., "Point in Polygon," in *Computational Geometry in C* (2nd Edition). Cambridge, Cambridge University Press, 1998. pp. 239–244.
[7] Markowski, P., Richardson, Y., *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Vol. 2, Chichester, John Wiley & Sons, 2011. Online: https://doi.org/10.1002/9780470682104
[8] Rotunno, R., J. B. Klemp, M. L. Weisman, A Theory for Strong, Long-Lived Squall Lines. *Journal of the Atmospheric Sciences,* 1988. 45, 463–485. Online: https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<0463:ATFSLL>2.0.CO;2
[9] Akenine-Möller, T., Haines, E., Hoffman, N., "Ray/Polygon Intersection," in *Real-Time Rendering* (3rd Edition). New York, CRC Press, 2008. pp. 967. Online: https://doi.org/10.1201/9781315365459
[10] Franklin, W. R., PNPOLY – Point Inclusion in Polygon Test. *WRFranklin,* 2022. február 6. Online: https://wrfranklin.org/Research/Short_Notes/pnpoly.html
[11] Doswell III, C., Moller, A., Przybylinski, R., A Unified Set of Conceptual Models for Variations on the Supercell Theme. in *16th Conf. on Severe Local Storms,* Kananaskis Park, AB, Canada, Amer. Meteor. Soc. 1990. pp. 40–45.
[12] Bluestein, H. B., *Severe Convective Storms and Tornadoes.* Berlin–Heidelberg, Springer, 2013. pp. 978–973. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-642-05381-8
[13] Markowski, P., Straka, J. M., Rasmussen, E. N., "Direct Surface Thermodynamic Observations within the Rear-Flank Downdrafts of Nontornadic and Tornadic Supercells," *Monthly Weather Review,* 130. évf. 7. sz. pp. 1692–1721. 2002. Online: https://doi.org/10.1175/1520-0493(2002)130<1692:DSTOWT>2.0.CO;2
[14] Structure and Dynamics of Supercell Thunderstorms. Online: www.weather.gov/lmk/supercell/dynamics

Objective Identification of Supercells Using Lightning Data

An average of 60–80 supercells are formed in Hungary every year, most of them are causing harmful weather phenomena in Hungary. Supercells deserve special attention for their predictability and recognition, as these thunderstorms are associated with most significant weather events, such as significant hailstorms, downbursts, and, in rare cases, mesocyclonal tornadoes. In our work,

we were interested in the lightning characteristics of supercell thunderstorms, and we also set up an empirical scoring system to decide, based on real-time lightning data, whether a given thunderstorm cell is a supercell or not. By developing the lightning index, feeding the measured data into the nowcasting system, a metric could be fitted to each thunderstorm cell, with the help of which a decision on the type and intensity of thunderstorms could be made simply by considering the lightning data.

Keywords: *supercell, LINET, IC lightning, CG lightning, CAPE, mesoscale convective system, lightning parameters, mesocycle*

Páll Márton előrejelző meteorológus Országos Meteorológiai Szolgálat Időjárás-előrejelző Osztály pall.m@met.hu orcid.org/0000-0002-7640-6133	Márton Páll Forecaster Meteorologist Hungarian Meteorological Service Weather-forecaster Department pall.m@met.hu orcid.org/0000-0002-7640-6133
Dr. Wantuch Ferenc hatósági meteorológus Technológiai és Ipari Minisztérium Léginavigációs és Repülőtéri Hatósági Főosztály ferenc.wantuch@itm.gov.hu orcid.org/0000-0001-7618-1336	Ferenc, Wantuch, PhD Official Meteorologist Ministry of Technology and Industry State Aviation Department ferenc.wantuch@itm.gov.hu orcid.org/0000-0001-7618-1336

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
34. évfolyam (2022) 3. szám 125–144. • DOI: 10.32560/rk.2022.3.9

Ádám Fehér, Imre Kállai, Árpád Veress

Parameter Sensitivity Analysis and Structural Development of an Airliner Lavatory Unit by Means of Finite Element Method

The current lavatory blocks – which can be found on the board of different airliners – are connected to the aeroplane structure not just through their lower attachments but through their upper ones as well. This upper attachment makes their installation and rearrangement procedures difficult and time-consuming. Therefore, investigations are being carried out to ignore the mentioned attachment together with keeping the requirements.

Structural stress analyses have been completed in the present work for the lavatory block without upper attachment using some solutions for increasing the structural integrity, in order to learn the effects of various static loads. The results of the different scenarios are investigated and compared to the outcomes of the lavatory block without upper attachment. In order to get a solution that meets the related safety requirements, parameter-sensitivity analyses of the lavatory structure have been completed. Based on the results of the survey and keeping the targets, the cost-effectiveness, feasibility and possible future tests in mind, a configuration that meets the authority requirements is determined.

The advantages and disadvantages of the modifications are discussed, and suggestions are made at the end for the further steps to proceed.

Keywords: *Diehl, airliner, lavatory blocks, sandwich-structured composite, quasi-static structural strength analysis*

1. Introduction

Diehl Aviation was founded in 1957 in Germany. In the beginning, it dealt with the maintenance of its company's aeroplanes, later it was contracted to maintain the autopilot systems of the Noratlas aeroplanes. In the 1970s, Diehl was involved in the development of the cabin lights and other electric units for the A300 program.

In 2003 it started to develop onboard systems for the A380 airliner, then in 2005 Diehl participated in the development of some cabin interior systems, units and parts. Diehl took part in the A350 (Extra Wide Body) program in 13 different areas. In Hungary, Diehl Aviation built its first factory in 2011 in Nyírbátor where nowadays, around 700 employees work. They

make cabin interior covers, overhead stowage compartments and composite parts for the air conditioning systems. In December 2017, Diehl Aviation Hungary Ltd. opened an engineering and service office in Debrecen where the design and simulation of the cabin interior parts and the tools took place thus being involved in the development process. Nowadays, Diehl Aviation is responsible for the development of the whole cabin interior covers including the passenger area, the door and entrance area, the overhead stowage compartments, the sidewalls, the decorations, the lavatory units, the lightning and other stowage units which are used in the cabin [1].

The development project presented in this publication started some years ago when an aeroplane manufacturer asked Diehl Aviation to outline a concept of a future cabin interior including the lavatory units as well. One of the requirements of the aeroplane manufacturer was to make the installation process of the lavatory units simpler. The reason behind this could be to decrease the time required for assembling an aeroplane, which could satisfy the increasing demand for certain types of aeroplane. Decreasing the installation time has another useful aim. Nowadays, inspecting the market demands, there are increasing needs for rearranging the interiors of airliners on some routes. This could happen because of modernisation (retrofit) or a change in the number of passengers. The aim of the airlines is to make these changes as quickly as possible.

The rearrangement of the lavatory unit is a relatively complex and time-consuming task. Therefore, based on the initiative of the aeroplane manufacturer the attachment on the top of the lavatory would be removed, thus, the lavatory unit would be attached to the aeroplane only by its four lower attachments. Since Diehl Aviation makes the design, the mechanical simulation, the test and the production of the lavatory units, the analyses of these concepts are also the tasks of the company.

In the frame of this research and development project, some solutions have been suggested and analysed in HyperWorks software by using the finite element method for a lavatory unit of an airliner. After carrying out the parameter-sensitivity analyses, a smart solution has been proposed, which satisfies the requirements the best way. Thus, while carrying out the slightest change in the lavatory structure, the aim is to reduce the mass, the displacement, the stresses appearing in the materials and the forces acting on the aeroplane structure in order to meet the requirements of the aviation authority.

The rest of the study is organised as follows:

In section *The structure of the lavatory unit* the structural build-up of a lavatory is introduced which is connected to the aircraft structure by 5 attachments.

Section *The structural analysis of a lavatory unit* is about the related requirements and the introduction of the used finite element modelling techniques.

Section *Parameter sensitivity analyses* contains the finite element analyses and results of the lavatory without the upper attachment and another 8 structurally modified lavatories.

Conclusions is a brief summary of the path which led to a model complying with the criteria. It also includes possible future development actions.

2. The structure of the lavatory unit

The structure of the lavatory unit in question consists of a ceiling, a base, an inboard, an outboard, a forward and an aft panel (see Figures 1 and 2). The panels are made from a glass fibre reinforced composite sandwich structure, which allows light and durable structural build-up. Every individual panel is connected to each other by screwed joints in different kinds of inserts. One should note that the outboard panel is not closed fully, it is not connected to the base panel. The reason for that is the space required by the three tubes (potable water, vacuum water and wastewater) going in and out of the lavatory unit.

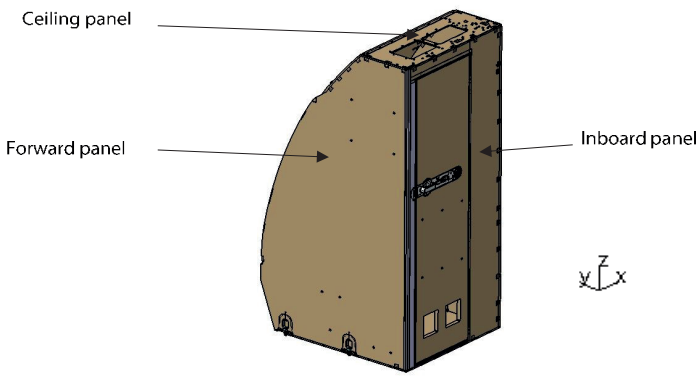


Figure 1.
Isometric view of the lavatory unit with the panel names included, looking from the inboard panel direction [2]

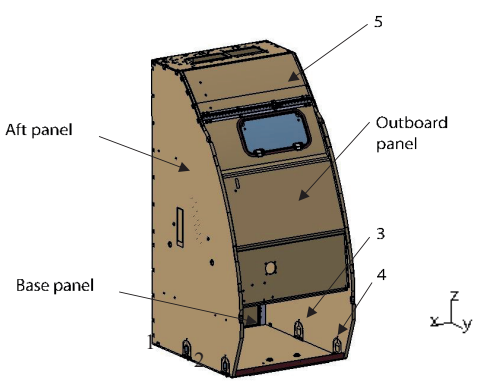


Figure 2.
Isometric view of the lavatory unit with the panel names and attachment points numbering included, looking from the outboard panel direction [2]

The panels are made from a Glass Fibre Reinforced Plastic (GFRP) sandwich structure which has different types and thicknesses of honeycomb pattern core material. Each reinforced point is strengthened by a core filler, which is also a thermosetting material and as such it solidifies after making, further increasing the strength. After machining different inserts can be placed inside of them.

The lavatory connection points to the aircraft structure can be seen in Figure 2. The unit is attached to the Seat Track (ST) at four points at the bottom. On the top, it is connected to the fuselage frame by a tie rod.

3. The structural analysis of a lavatory unit

3.1. Introduction of the authority and manufacturer requirements

The airliners in which the lavatory units are built, count as large aeroplanes powered with turbine engines according to the European Union Aviation Safety Agency (EASA) regulations [3]. For these aeroplanes the EASA Certification Specification (CS) 25 regulations are valid.

The EASA CS 25.561 paragraph applies to the circumstances of the emergency landing; therefore, this is compulsory for the lavatory unit.

These are the minimum requirements that must be taken into consideration during the design of a jet-powered large aeroplane and which applies to the lavatory unit discussed in this study. The aircraft manufacturer can prescribe stricter requirements in some cases.

According to the CS 25, the relevant inertial load requirements for the static finite element analysis are as follows: Upward (UWD) +Z direction 3.0g; Forward (FWD) –X direction 9.0g; Sideward (SWD) (both in right- and left-wing direction) +–Y direction 3.0g; Downward (DWD) –Z direction 6.0g and Rearward (RWD) +X direction 1.5g (see Figures 1 and 2). For the UWD and DWD directions, the manufacturer defines higher inertial loads than the ones in the CS 25.

The lavatory unit can deform to a certain extent towards the passenger area under the influence of the loads. Furthermore, based on test results, the maximum stresses that the panels can withstand are given.

In addition, it is important to take into consideration the magnitude and the direction of the different forces acting on each of the lavatory attachment points due to the static loads. According to CS 25.561, the structure must meet the static requirements with a safety factor of 1.33. Hereinafter during inspections, comparing the acting forces to the allowable (limit) forces reduced by 1.33 safety factor, the value of the so-called Reserve Factor (RF) has to be at least 1 or higher.

The reserve factors calculated from the resulting forces on each attachment point can be calculated by Equation (1).

$$Reserve\ factor = \frac{Allowable\ force\ reduced\ by\ safety\ factor}{Resulting\ force} \geq 1 \tag{1}$$

3.2. The Finite Element Model of a lavatory unit

The meshed model of the current lavatory unit was made in HyperMesh software at Diehl Aviation and can be seen in Figure 3.

The meshed model contains 2D elements basically, however, 3D elements are used for the modelling of the upper attachment bracket. The application of 2D elements is the most appropriate to model composite sandwich structures. Each of the panels are built up from

different types of GFRP materials. Their properties are defined according to the material database of Diehl Aviation GmbH.

The lavatory units are analysed with and without their doors. Usually, the lavatory without the door is the one that is more crucial; therefore, it serves as a basis for this investigation.

Some components, mounted on the lavatory unit, are modelled neither in Computer Aided Design (CAD) nor in the Finite Element Model (FEM). These parts are only accessories and they do not contribute to the structural stiffness of the lavatory unit, they neither take part in carrying loads. They affect the mechanical properties of the lavatory unit only by their inertia, centre of gravity position and mass. Therefore, these items are considered by their centre of gravity and mass. Such items are, for example, the baby bassinet, the toilet, the mirror and so on.

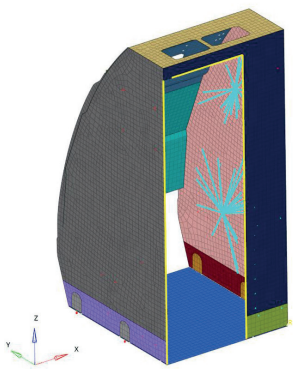


Figure 3.
The meshed geometrical model of the lavatory unit [2]

During the analyses, the results are presented relative to the maximum allowable displacements and forces given in the requirements. The allowable values are always considered as 100%. In most of the cases those load steps, which have no critical effect on the lavatory structure, are not discussed in detail regarding the scope of this study. Besides, it is important to mention that by using linear material properties the software visualises the displacement of the structure also in case of stresses which are higher than the ones the material can resist. However, this visualisation is not appropriate because such high displacements and stresses cannot be formed in reality, since the analysed part would break by then.

4. Parameter sensitivity analyses

4.1. Analysis of the lavatory unit without upper attachment

In the case of the lavatory unit in question, the upper attachment is removed, thus, it becomes less stiff than the original variant.

Regarding the simulation results, particularly big, about 1,525% displacement of the allowable appears at the outboard panel in case of FWD load case (see Figure 4). The large-scale

displacement forms due to the cut-out on the outboard panel primarily. On this part of the lavatory constantly growing displacements can be experienced by going upwards in the Z direction. After the cut-out section, the displacement is constant. The base panel deforms in a wave shape: downwards and upwards too. This can be explained mainly by the effect of the weight of the toilet.

Big displacements are formed also in the UWD and the DWD load cases but these are not significant towards the passenger area.

In the SWD cases, slight displacements can be experienced towards the passenger area. Only the base panel deforms more due to the inertia of the toilet unit. More crucial in this load case is the displacement of the base panel towards the aircraft cover.

The RWD load case results in a 294% displacement of the allowable. Regarding that, it is similar to the one in the FWD load case, i.e. constantly large displacement can be experienced from the bottom of the outboard panel.

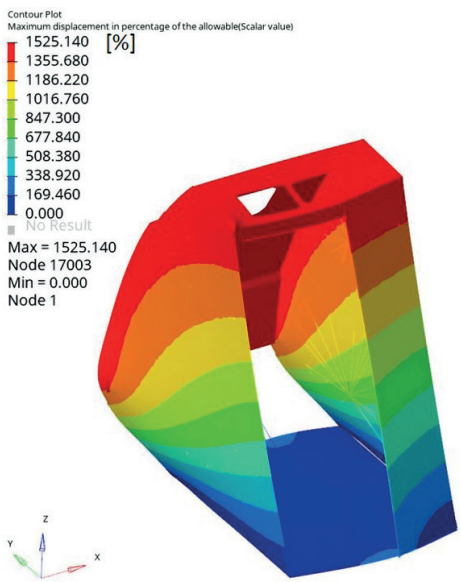


Figure 4.
The maximal relative displacement ratios (actual displacements in the percentage of the allowable displacement) in the structure of the lavatory without upper attachment under FWD load [the authors]

The structure thus formed does not have proper stiffness, it does not meet the displacement criteria and furthermore, high forces appear at the attachment points, which cause a reduction in the reserve factors.

It can be seen from the analysis of the lavatory unit without upper attachment that the structure needs to be reinforced by means of all criteria in order to meet the requirements. During the modifications, cost efficiency needs to be kept in mind. It also needs to be taken into consideration that the more complicated modifications could have a negative effect on the approval process and future tests.

4.2. The effect of the material modification

Leaving the honeycomb structure unchanged, Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP) material is used instead of glass fibre reinforced plastic. The carbon fibre is stronger and is expected to ensure a higher stiffness for the structure. However, it is more expensive and could influence future tests (e.g. flammability tests). The properties of the carbon fibre reinforced plastic layers are set according to the material database of Diehl Aviation GmbH.

Regarding the results, the appeared maximal displacement in the FWD load case is approximately 600% of the allowable (see Figure 5). Still high, 120% displacement of the allowable can be seen towards the passenger area in the RWD load case. This displacement, however, is significantly lower than the one in the previous analysis.

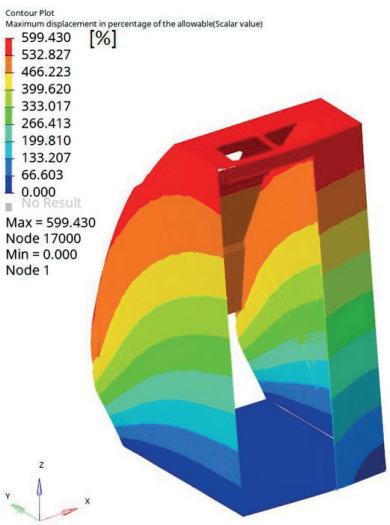


Figure 5.
The maximal relative displacement ratios (actual displacements in the percentage of the allowable displacement) in the CFRP structure lavatory unit in the FWD load case [the authors]

The forces acting on the lower attachments remained within the allowable limits. The lowest reserve factor is 1.15, which occurs on the first attachment point in the Z direction in the FWD load case just like in the former analyses.

From the analysis of the lavatory unit made of CFRP structure, it turns out that it does not meet the requirements. The displacement is reduced significantly. The forces on the attachments are high, the reserve factors are reduced but they still remain above 1. Furthermore, the advantage of this structure is that the mass of the lavatory is reduced. One of the disadvantages could be the higher price of carbon fibre.

4.3. The effect of the core material thickness

Increasing the thickness of the core material of the panel sandwich structure counts as an easier change. This is expected to result in an increase in the structural and bending stiffness until a certain point.

The effect of 2.5 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm and 25 mm honeycomb thicknesses are investigated. Every panel thickness of the lavatory unit is increased uniformly.

To make the results clearer, they are shown in a diagram (see Figures 6 and 7). To prevent the decrease of the interior area of the lavatory unit, every panel is thickened towards the passenger area except the base panel. The thickness of the latter one is increased to the inside of the lavatory unit because the aircraft floor and the lavatory attachments limit the space on the bottom.

In Figures 6 and 7 the results of the formerly analysed lavatory unit without upper attachment are represented too for comparability. These results belong to the 0 mm core material thickness increase.

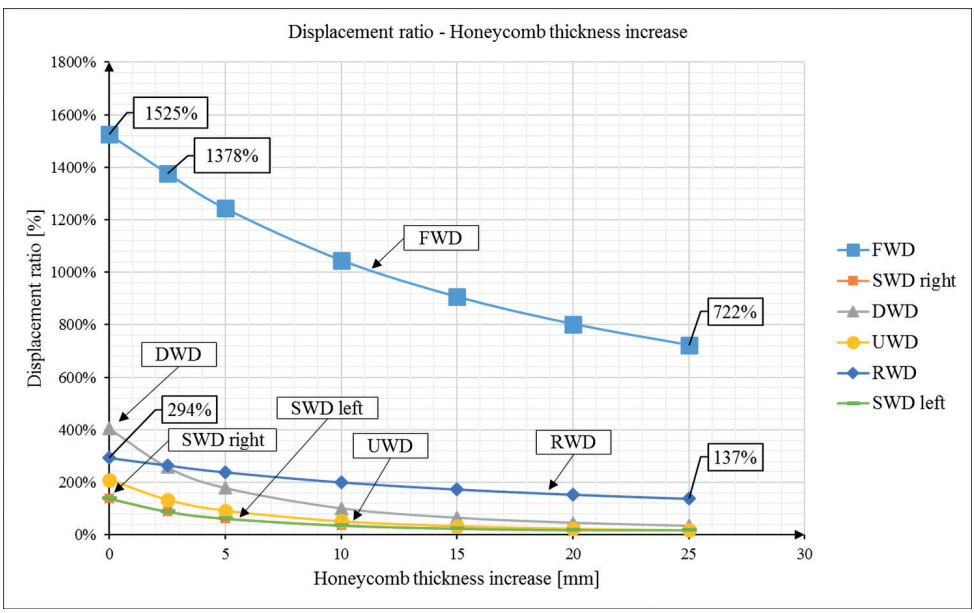


Figure 6.
The maximal displacement ratios (actual max. displacements in the percentage of the allowable displacement) of the elements of the lavatory unit in the function of the honeycomb thickening in the different load cases (the graphs of the two SWD load cases coincide with each other) [the authors]

As it can be clearly seen in Figure 6, the displacement values show a decreasing tendency. In the FWD load case, the former 1,525% displacement ratio is reduced approximately to 1,378% with the 2.5 mm core material thickness increase. Due to the 25 mm thickness increase also in the FWD load case, the displacement is only around 722% of the allowable. The value is still high, but it is less than half of the value in the initial state (without fixation at the top).

Concerning the RWD load case, the maximal displacement to the direction of the passenger area decreases to 137% from the initial 294%, which is still considered to be high.

The forces that appeared on the attachments (for attachment numbering please see Figure 2) are not uniform. Considering the most crucial FWD load case, the changes of the Z directional reserve factors are shown in Figure 7. (The reserve factors are low in the Z direction mainly.) Initially, the reserve factors on lower attachments 1 and 3 are increased, thus, the Z directional forces are decreased due to the increase of thickness. On attachments 2 and 4, the values of the reserve factor are continuously and constantly decreased.

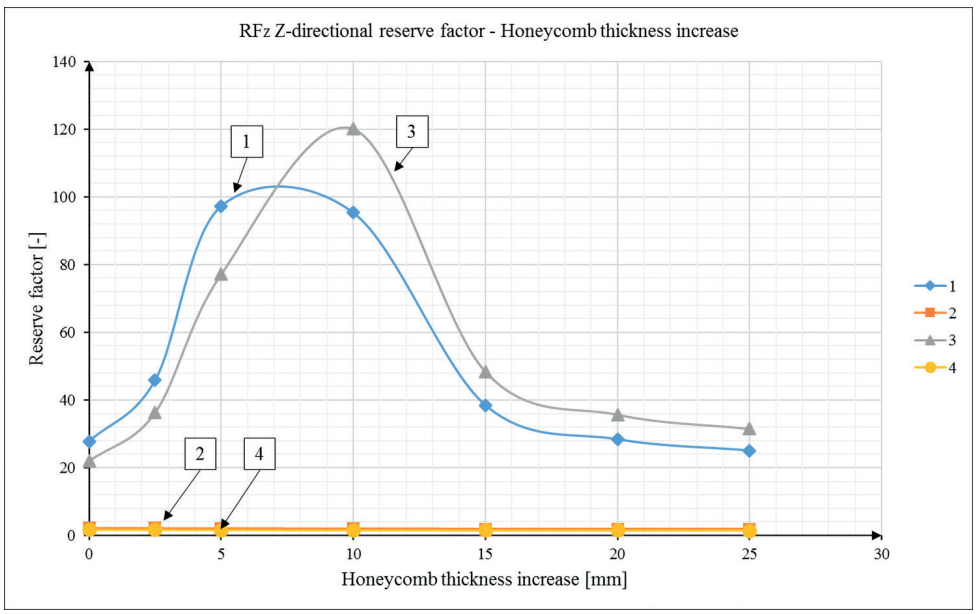


Figure 7.
The tendency of the reserve factors calculated from the Z directional forces on the lower attachments 1, 2, 3 and 4 as a function of the honeycomb thickening (the values of the 2nd and 4th attachment points coincide with each other)
[the authors]

The thickness increase of the core material resulted in a positive effect in total. However, after a certain point, it had its negative effect felt. We can say that in the case of 2.5–10 mm core material thickness increase the displacements can be reduced.

4.4. The effect of the number of the PrePreg layers

After the examination of the effect of the core material thickness, the next step is to determine how the number of the PrePreg composite layers can influence the analysed parameters. Certainly, increasing the number of the composite layers could be more expensive than the thickening of the core material; however, presumably its effect is not negligible.

The number of layers is increased in pairs in each panel, i.e. two added layers mean one layer per side. So, in total 8 layers are added step by step during the 4 analyses. The added

layers always have the same material properties as the original panel. The thickness of each added layer equals the thickness of the original layer.

The results are shown in a diagram in this case as well to make them clearer. The maximal displacement ratios as the function of the added number of layers in each case are described in Figure 8. The results of the previously analysed lavatory unit without upper attachment (which has the original layer setup) are represented too for comparability at 0 on the horizontal axis.

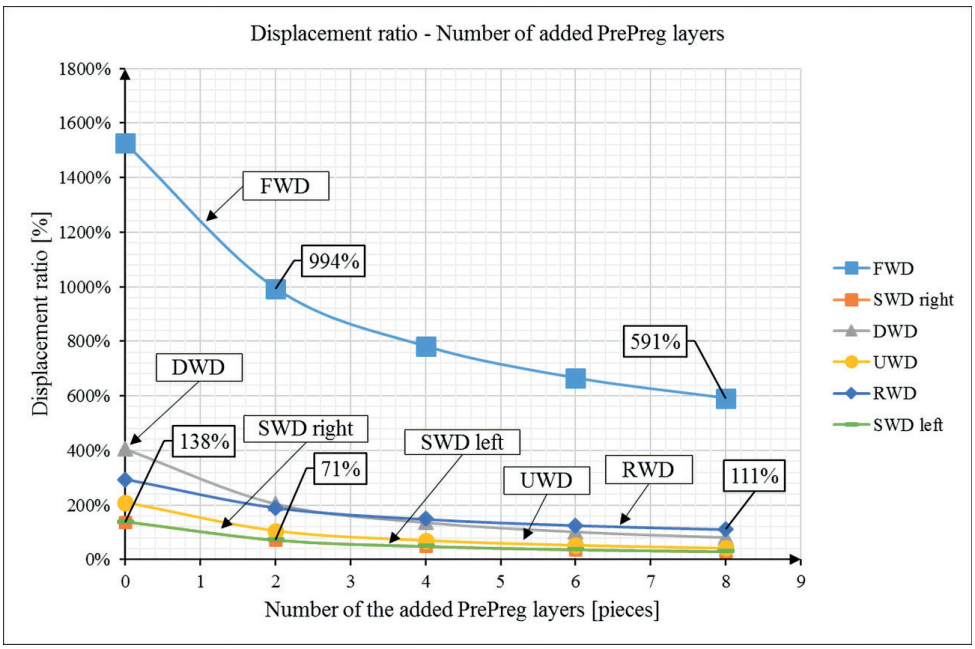


Figure 8.
The maximal displacement ratio (actual max. displacements in the percentage of the allowable displacement) of the elements of the lavatory unit as a function of the number of the added composite layers in the different load cases (the graphs of the two SWD load cases coincide with each other) [the authors]

Notice that already one added layer per side mitigates the displacement in the FWD load case to 994% of the allowable. In the case of the SWD load case, the mentioned layer increase has led to 71% displacement, almost half of the former 138% value. Similar results can be observed in the other load cases, too. Further increasing the number of the layers does not have such a significant effect on the maximal displacement but in case of 8 added layers, the maximal displacement is only 591% in the FWD load case. In the RWD load case, the maximal displacement is decreased to 111%, which presumably can reach the required value by further adding 1 or 2 layers. However, the structure would not meet the requirement in the FWD load case either, so further increasing the composite layer numbers would only have a minor effect on the maximal displacement values.

The appearing forces on the attachments remain in the allowable limits, though the reserve factors show a decreasing tendency in many cases. This is most significant on the fourth attachment in the Z direction since the reserve factor there has decreased to 1.25

from the previous 1.79 value due to the layer number increase in the FWD load case. This is the lowest value in this analysis.

Increasing the number of glass fibre reinforced composite layers has a significant effect on up to two added layers (one layer per side). In the RWD load case, the allowable displacement value is managed to be approached. The mass increase in the case of adding 8 layers is 28.5 kg. The analysed lavatory unit has not met the displacement criterion in the FWD and RWD load cases yet but the consequences could be important for future designs.

4.5. The effect of the CFRP stiffening rods

In the analyses so far, the already existing structure of the lavatory unit was modified. In the upcoming analyses, the goal of the investigations is to see what the effect of implementing different stiffeners into the structure is.

It is well visible till now that the RWD and the FWD load cases are the ones, which cannot satisfy the criteria. In these cases, the lavatory unit usually deforms forward and backward. This gives the idea to integrate some CFRP stiffening rod structure into the forward and the aft panels primarily. In order to create a joint structure, the rods are bonded in pairs along with the outboard panel. The location of the stiffeners and their connection to the lower attachments (magnified image) is shown in Figure 9.

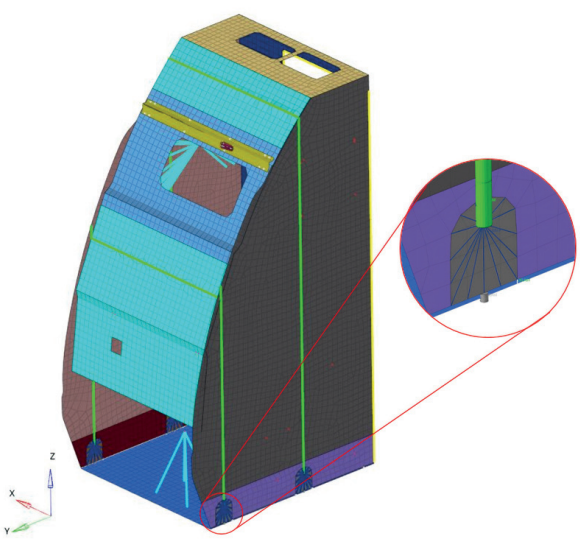


Figure 9.
The location of the stiffening rods and their connection [the authors]

In the magnified image the rod is presented in 3D to make it more visible.

The reinforcement is a composite tube with an outer diameter of 10.5 mm and an inner diameter of 9.5 mm. The two characteristic values of its material are set according to the following [4]:

Modulus of elasticity: E = 94 msi = 648 GPa

Tensile strength in fibre direction: Rm = 414 ksi = 2854.43 MPa

The mass increase of the structure is basically negligible. The reinforced structure decreases the maximal displacement by 600% in the FWD load case. In the RWD load case, the displacement is reduced by 130%, which can be considered a significant decrease. Regarding the maximal displacement in the other load cases, almost no change can be observed.

The forces acting on the lower attachments are under the limit value. The lowest reserve factor is 1.22, which is due to the Z directional force at the fourth attachment point in the FWD load case.

In total, the composite rods could have a significant effect on the displacement in the FWD and the RWD load cases. Its effect is approximately the same as adding 4 GFRP composite layers to each panel; however, its advantage is that it causes less mass increase. Some of its disadvantages can be the price and its effect on the flammability tests. Its application also raises some questions regarding the manufacturing processes. It is a fairly complicated process to integrate a carbon composite tube inside of a core material of a large panel and to glue it with its environment.

4.6. The effect of the reinforcement panel

Previously it was shown that generally, the largest displacements form above the cut-out section of the outboard panel. On these parts generally, uniform displacement can be observed. Due to the cut-out section, displacements grow to a large extent in the surrounding panels up to the top of the cut-out section.

The potable water, vacuum waste and waste water tubes are connected to the lavatory unit through the mentioned cut-out section.

However, the tubes do not require as large space as the cut-out itself is. Therefore, it is possible to close the cut-out section with a reinforcement panel (see Figure 10). In the finite element model, the reinforcement panel is connected to the surrounding panels by its nodes, so they act as one unit. Expectedly, it would not have a significant effect on the preliminary results if the connections were modelled by screwed joints. Three holes are placed on the reinforcement panel for the tubes mentioned previously. As it is observable, the panel itself is not totally plain. Folding it in two places ensures a greater stiffness and resistance to the loads. The material properties and the layer setup of the reinforcement panel are the same as the ones of the outboard panel.

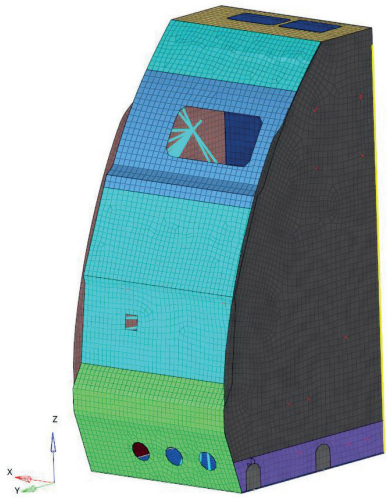


Figure 10.
The reinforcement panel design (green) [the authors]

The reinforcement panel influenced the results of the static stress simulation in a positive way in most of the cases. In the FWD load case, the maximal displacement is reduced to 252% of the allowable, which is the most significant change so far. However, it does not meet the requirements yet. It can be seen in Figure 11 that the shape of the displacement has also been changed. The lavatory unit deforms from the base panel progressively but the elements of the inboard panel still deform more than the elements of the outboard panel at the same height.

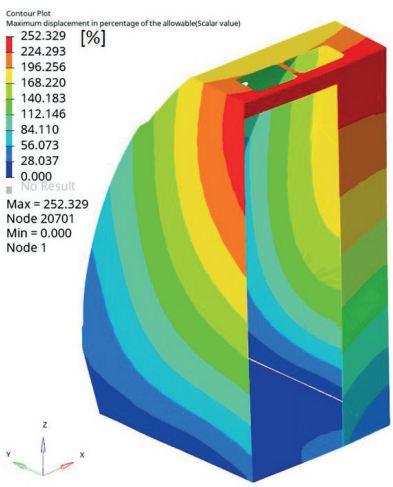


Figure 11.
The maximal relative displacement ratios (actual displacements in the percentage of the allowable displacement) in the FWD load case as an effect of the reinforcement panel [the authors]

The maximal displacement is 50% of the allowable in the SWD load case. This displacement is located on the base panel of the lavatory unit. In the UWD and DWD load cases, the lavatory unit has already met the requirements. Although the appearing displacements are big, they do not move towards the passenger area. In this case, as an effect of the DWD load case, a 70% displacement forms on the base panel in the negative Z direction and 36.7% displacement in the positive Z direction on the same panel in the UWD load case. So, the SWD, DWD and UWD displacements have met the requirements not only due to their directions but due to their magnitudes as well. In the RWD load case, the highest displacement of the upper parts of the lavatory unit is 46.9% of the allowable value and it moves towards the passenger area.

The force in the Z direction on the fourth attachment point shows an unfavourable result in the FWD load case. On this attachment, the reserve factor has been decreased to 0.83. Also, due to the FWD load, the reserve factor on the second attachment is reduced to 1.04.

It can be concluded that the reinforcement has a favourable effect on the displacement distribution and the magnitude of the maximal displacements. The mass of the reinforcement panel is 3.2 kg. The structure shows a big overload due to the FWD load on the fourth attachment where too much force is generated in the Z direction. The structure still does not meet the requirements but this solution has yielded significant results.

4.7. The effect of the door

The original lavatory unit has met the requirements without taking the door as a stiffening unit into consideration. However, recent studies have shown that in the FWD load case the elements of the inboard panel also deform significantly. Not taking the door into consideration also contributes to this result.

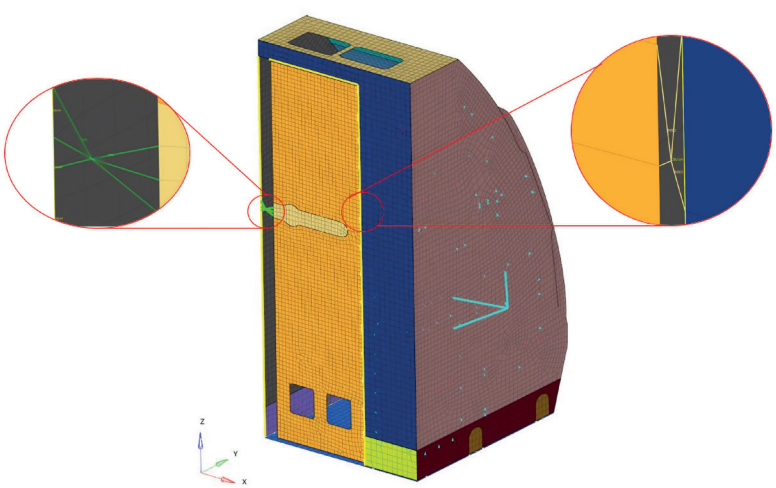


Figure 12.
The lavatory unit design with door [the authors]

The model of the simplified door of the lavatory unit together with the assembly is shown in Figure 12.

There are two bigger cut-outs on the lower part of the door panel, which are worth considering during the static stress analysis. The model of the latch is in the middle of the door which is modelled by a 10 mm-wide aluminium plate in this case. The materials and layer setup of the door are the same as the ones of the inboard panel.

Regarding the results, significant improvement is reached; however, the 538% displacement on the outboard side in the FWD load case shows that the toilet unit still has a big effect on the structure (see Figure 13).

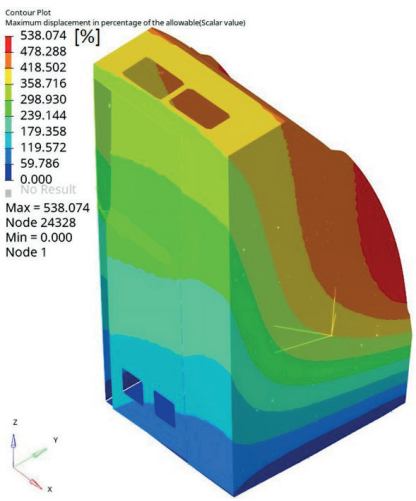


Figure 13.
The relative displacement ratios (actual displacements in percentage of the allowable displacement) as an effect of the door in the FWD load case [the authors]

Concerning the RWD load case, a displacement of 105% of the allowable is reached which is still slightly above the required value. In the SWD load case 138%, in the UWD load case 210%, in the DWD load case approximately 410% maximal displacements of the allowable have been reached. However, these values are not significant since their direction does not affect the passenger area.

Summarising the above, the door has a positive effect on the displacements of the lavatory unit without upper attachment. However, because of the calculated lower reserve factors at the attachments and because of the large displacement in the FWD and in the RWD load cases, the door itself does not have enough effect to make the lavatory without upper attachment meet the requirements.

4.8. First combined structure: the effect of the door and the reinforcement panel

Many other parameters and structure modification still could be examined but based on the experiences it is worth creating a combination of the structures examined so far.

In the first case, the combined effect of the door and the reinforcement panel is examined. The displacement of the mesh elements in the FWD load case can be observed in Figure 14. The highest displacement is 120% of the allowable, which is still high. The displacement of the aft panel directs towards the interior of the lavatory unit, meanwhile, the inboard and door panels move towards the passenger area. Regarding both the magnitude and the direction of the displacement in the other load cases, the lavatory meets the requirements.

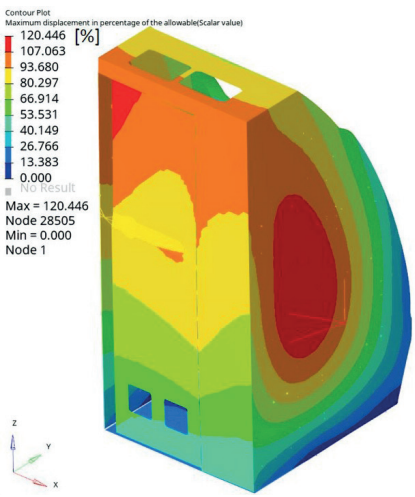


Figure 14.
The maximal relative displacement ratios (actual displacements in the percentage of the allowable displacement) of the first combined structure (door and reinforcement panel) in the FWD load case [the authors]

The forces on the attachments are smaller than the allowable. The lowest reserve factor is 1.75 which is calculated from the force in the Z direction on the fourth attachment in the FWD load case.

In the first combined structure, the combined effect of the door and the reinforcement panel is analysed. In conclusion, their effects are positive in terms of both the maximal displacement and the appearing forces on the attachments.

The resulted displacement value in the FWD load case is still above the one defined in the requirement. However, the required value is approached much better than before.

4.9. Second combined structure: the effect of panel thickness increase, door and reinforcement panel

The structure analysed in the previous subchapter has approached the required value; therefore, it serves as a good basis to create the next combined structure. The second combined structure contains the reinforcement panel and the door, furthermore the layer setup of the panels has been changed. In some panels, only the number of the glass fibre reinforced plastic layers is increased while others contain an increased core material thickness too. However, there are some panels that remained unchanged. The FWD load case has been considered as a basis during the creation of the new design because the structure has already reacted favourably in the other load cases.

The properties of the forward and the aft panel and their reinforced parts are the same in pairs. The number of the GFRP layers has been increased by one layer per side and their core material thickness is also increased by 10 mm. The inboard panel and the door as well are modified by adding one GFRP layer per side. Their honeycomb structure has remained unchanged since presumably they are exposed to little bending and twisting loads. One composite layer per side is added to the ceiling panel. In addition, in the base panel, the honeycomb structure thickness is increased by 10 mm. There is no change on the outboard panels, so the properties of the reinforcement panel have remained the same too.

As a result of the changes, the value of the greatest displacement is 87% of the allowable value in the FWD load case (see Figure 15). This complies with the criterion. The maximal displacement is 20% in the SWD and the DWD load cases, 10% in the UWD load case and approximately 16% of the allowable value in the RWD load case. All displacements are below the allowable value defined in the requirement.

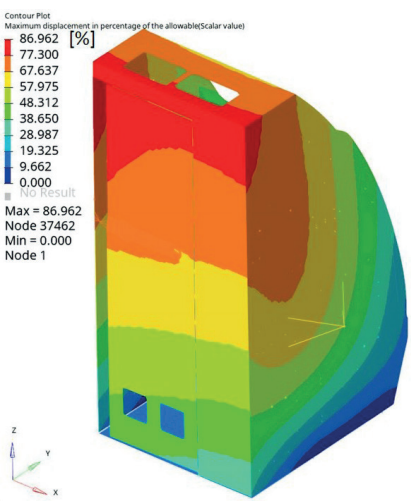


Figure 15.
The maximal relative displacement ratios (actual displacements in the percentage of the allowable displacement) of the second combined structure (increased panel thickness, door and reinforcement panel) in the FWD load case
[the authors]

After that, the tension, compression and shear stresses that appeared in each panel are also analysed. In case of the second combined structure, the formed stresses remained below the allowable values defined for each panel separately. These results are not discussed in the other scenarios due to the limited available extension.

In the FWD load case, the lowest reserve factor is 1.52 which can be calculated in the 4th attachment in Z direction. This value complies with the criterion.

In terms of the displacements, the stresses and the forces acting on the attachments, the second combined lavatory structure complies with the static stress requirements. The resulting lavatory without upper attachment is 11.36 kg heavier than the original unit.

To take the door into account as a load carrier and connecting item, the door latch needs to be redesigned expectedly.

5. Conclusions

The current airliner lavatory units have a 5th upper attachment besides their 4 lower ones. This makes their installation time consuming and more difficult. The aim of this study is to find such a lavatory design that is connected to the aeroplane only by its four lower attachments and still meets the static load requirements set by the aviation safety authorities and the aeroplane manufacturer. As it is shown at the beginning, removing the upper attachment led to a 1,525% maximal displacement compared to the allowable values in the requirement. Therefore, the lavatory unit without upper attachment would fail to comply with the requirements. Hence, parameter sensitivity analyses were carried out to see which modification provides suitable solutions. It can be seen that changing the parameters uniformly meant an advantage in terms of certain requirements while from other requirements point of view it was neutral or it had disadvantages. As investigations progressed, the complexity of the problem became obvious. So, with the possibly simplest change in structure, with minimising the mass-increase and cost, with thinking about the future tests and design changes and taking the regulations and the requirements into account, it was necessary to change the structure of the lavatory unit in several fields, i.e. it was necessary to carry out combined analyses.

The results of the previous parameter sensitivity analyses and the conclusions drawn from them have contributed to the first presented combined structure modifications with significant improvements. Although they gave a great stiffness to the structure, the door and the reinforcement panel installation were not enough to meet the requirements.

The second combined structure – which contains a reinforced panel layup additionally to the door and reinforcement panel – has such a design, by which the lavatory unit without upper attachment meets the applicable displacement, tension, compression, shear stress and reserve factor requirements. As a result of the design, the highest displacement is 87% of the allowable value given in the requirement. The lowest reserve factor is 1.52. Compared to the lavatory unit without upper attachment, the biggest displacement is reduced by 94.3%. The lowest reserve factor (which is formed on the 4th attachment in both cases) is reduced by 15.1%.

Such a design of the lavatory unit without upper attachment might require changes in the door latch and in the static test implementations to some extent.

The model could be more specific by modelling the door latch and the hinges in a more detailed way. After that dynamic, vibration, safety and other investigations need to be made. The validation of the results by tests is necessary in every case.

There are mechanical simulations of the further configurations and designs in progress which could lead either on their own or with the results of this current study to solutions, which comply with the requirements.

Notations

- E Modulus of elasticity (Young modulus) [N/mm^2]
- g Gravitational acceleration [m/s^2]
- R_m Tensile strength [N/mm^2]

References

[1] Diehl Aviation. Online: https://www.diehl.com/aviation/en/company/history/#incorporation
[2] Diehl Comfort Modules GmbH database.
[3] European Union Aviation Safety Agency, 'Certification Specification and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes CS-25', 2011. Online: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/agency-measures-docs-certification-specifications-CS-25-CS-25-Amendment-11.pdf
[4] High Modulus Carbon Tubing, Rock West Composites. Online: https://www.rockwestcomposites.com/45558-uhm

Repülőgép-mosdóblokk továbbfejlesztése véges elemes szilárdságtani analízis és paraméterérzékenységi vizsgálatok segítségével

Az utasszállító repülőgépekben található jelenlegi mosdóblokkok alsó rögzítéseik mellett felül is csatlakoznak a repülőgép törzskereteihez. A felső rögzítés beszerelésüket és átrendezésüket megnehezíti és időigényessé teszi, ezért vizsgálatok folynak az említett rögzítés elhagyására az előírások betartása mellett. Ezért, a jelen munka célja, hogy megvizsgáljuk a felső rögzítés nélküli, továbbfejlesztett mosdóblokkok viselkedését különböző statikai igénybevételek hatására, és összehasonlítsuk ezt az egyszerű, felső rögzítés nélküli mosdóblokk esetén kialakult szilárdságtani számítások eredményeivel. A biztonsági előírásoknak megfelelő kialakítás elérése érdekében paraméterérzékenységi vizsgálatokat végeztünk. A számítások eredményei alapján kitűzött célokat, a költséghatékonyságot, a kivitelezhetőséget és az esetleges későbbi teszteket szem előtt tartva meghatároztunk egy olyan konfigurációt, amelyben a felső rögzítés nélküli mosdóblokk megfelel a hatósági előírásoknak. A munka következő részeiben bemutatjuk a változtatások előnyeit és hátrányait, majd javaslatot teszünk a további fejlesztési lépésekre.

Kulcsszavak: *Diehl, utasszállító repülőgép, mosdóblokk, kompozit szendvicsszerkezet, kvázi-statikus szerkezetanalízis*

Fehér Ádám Diehl Aviation Hungary Kft. fadam1026@gmail.com orcid.org/0000-0003-2445-814X	Ádám Fehér Diehl Aviation Hungary Kft. fadam1026@gmail.com orcid.org/0000-0003-2445-814X
Kállai Imre Diehl Aviation Hungary Kft. imre.kallai@diehl.com orcid.org/0000-0002-3078-6492	Imre Kállai Diehl Aviation Hungary Kft. imre.kallai@diehl.com orcid.org/0000-0002-3078-6492
Dr. Veress Árpád egyetemi docens Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Repüléstudományi és Hajózási Tanszék veress.arpad@kjk.bme.hu orcid.org/0000-0002-1983-2494	Árpád Veress, PhD Associate Professor Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation and Vehicle Engineering Department of Aeronautics and Naval Architecture veress.arpad@kjk.bme.hu orcid.org/0000-0002-1983-2494

This study was supported by EFOP-3.6.1-16-2016-00014 and the national research project called "Diszruptív technológiák kutatás-fejlesztése az e-mobility területén és integrálásuk a mérnökképzésbe". The European Union also supported the project with the co-financing of the European Social Fund.

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
34. évfolyam (2022) 3. szám 145–166. • DOI: 10.32560/rk.2022.3.10

Vas Tímea, Halászné Tóth Alexandra, Bali Tamás,
Dudás Zoltán, Bottyán Zsolt, Gajdos Máté, Fekete Csaba

A pilóta nélküli légi jármű-rendszerek integrálása a repülőtér forgalmába

Az UAS[1]-ek polgári és egyéb légterekbe való integrálása már elkezdődött. Beillesztésük a légi forgalomban és a műveleti környezetben beazonosítható kockázatok csökkentésével történik. A repülőterek környezetében általában veszélyforrásként tekintenek rájuk, azonban az egyre szélesebb körű alkalmazási lehetőségeik miatt, számos feladatra költséghatékonyabb és olcsóbb megoldást jelenthetnek. Az, hogy milyen feltételek mentén integrálhatók a repülőtéri forgalomba, számos tényezőtől függ. Kutatási tervünkben olyan döntéstámogató megoldások fejlesztésén dolgozunk, amelyek VR[2]- AR[3]-eszközökkel, kockázatértékelő és -csökkentő megoldásokkal, illetve speciális ATC-eljárások[4] alkalmazásával modellezik a munkadrónok és hagyományos légi járművek közös légtérben és repülőtereken való alkalmazását. Mintarepülőterünk az állami repülések célját szolgáló modellt használja kiindulási alapul.

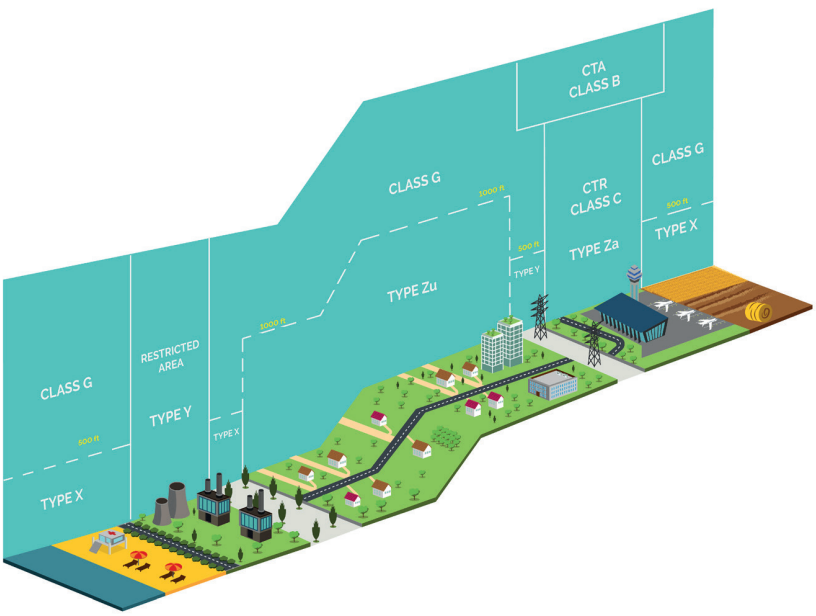
Kulcsszavak: *repülőtér, munkadrónok, légi forgalmi irányítói eljárások, döntéstámogató rendszer, repülésbiztonság*

1. Bevezetés

A légi közlekedésben a pilóta nélküli légi járművek (UA[5]), ismertebb nevükön drónok, megjelenésével kritikus forgalomnövekedés várható. Jelenlétük a légtérben egyelőre, az integráció első lépéseként, olyan magasságtartományra terjed ki, amelyet az általános légi forgalom (GAT[6]) csak minimális mértékben használ. Ez egyfajta elfogadható biztonságot nyújt a többi légtérfelhasználónak, de számolni kell azzal, hogy az egyre szélesebb körben való alkalmazás miatt olyan légtérrészekben is megjelennek, ahol repüléseikkel növelhetik a légi kockázatok előfordulásának valószínűségét. A repülőtér légterében való alkalmazásuk egy ilyen magas légi kockázatokat jelentő helyszín. Az *U-space*-koncepció [1] többek között a drónok

[1] UAS: Unmanned Aircraft System.
[2] VR: Virtual Reality.
[3] AR: Augmented Reality.
[4] ATC: Air Traffic Control.
[5] UA: Unmanned Aircraft.
[6] GAT: General Air Traffic.

VLL[7]-magasságokon {a magyar légtér esetében 40 m AGL[8] maximális magasságig [2, 4/C. § (2)]} az ellenőrzött légterekbe való integrációjának lépéseit vázolja fel, egy négyszintű, U1-től U4-ig definiált, bővülő szolgáltatási szinteket biztosító digitális légi forgalom-szervezési rendszer keretei között. Az egyre bővülő szolgáltatási szintek, az UAS-rendszerek üzemeltetőitől is egyre komolyabb felszereltségi követelményeket és teljesítményszinteket követelnek meg. Az ellenőrzött légterekben való működéshez, mint ahogy az *U-space Z*a légtér esetén is (1. ábra) a legmagasabb szintű légi kockázatok jelennek meg, így a drónrepülések számára ennek megfelelő autentikáció és valós repülési adatokat biztosító felszereltség szükséges. Ebben a légtérrészben való működéshez engedélyezett műveleti tervvel kell rendelkeznie az üzemeltetőnek, valamint a helyzetjelentések és nyomon követés adatainak folyamatos továbbításához elegendő teljesítménnyel kell rendelkezni.



1. ábra
U-space-koncepció [1]

Az üzemeltetőnek ehhez kötelező bizonyos képességeket biztosító felszereltségi követelményekkel ellátni az UAS-t, annak érdekében, hogy a legmagasabb szintű szolgáltatást és biztonságot nyújtsa számukra az U-space-szolgáltató.

[7] VLL: Very Low Level, amely a SERA rendelet 5005 pontban leírt minimum VFR-magasságok alatti magasságtartomány.
[8] AGL: Above Ground Level – földfeletti magasság.

2. U-space-kutatások Európában

Az USEPE[9] feltáró kutatási projekt keretein belül a hatékony és biztonságos *U-space*-rendszer kidolgozásáért felelős kutatócsoportok célja, hogy feltárják a lehetséges elkülönítési módszereket elsősorban a drónok városi környezetben való biztonságos működése érdekében, különös tekintettel a sűrűn lakott területek feletti üzemelés során. Az USEPE javaslatokat és működési koncepciókat fogalmaz meg, dolgoz ki, tesztel és értékel, és egy sor olyan alaptechnológiát, amely biztosítja a pilóta nélküli légi járművek biztonságos elkülönítését egymástól és a pilótás/hagyományos repüléstől egyaránt. Ez a koncepció előremutató abban a tekintetben, hogy a légi forgalom-szervezés egészét már jól láthatóan nem csak UTM[10]- és ATM[11]-rendszerekként kezeli, hanem integrált egészként tekint rá. A fejlesztések sikerre vitele érdekében a következő három lépést javasolja végrehajtani:

- A döntéshozói szintek meghatározása, azok felelőssége a stratégiai és taktikai tervezési szakaszban. Azon szereplők hozzárendelése, akik az adott szinteken döntéseket hozhatnak: az *U-space* kialakítása, ezen belül a repülési prioritások, milyen irányítási módozatok és milyen repülési pályák/profilok azonosíthatók, valamint ezekhez megtervezik a várható repülési útvonalakat azok aktiválása előtt.
- Fogalomkészlet meghatározása és szimulációja, vagyis különböző típusú drónok biztonságos elkülönítésének biztosítása minden tervezési fázisban. A koncepció közé tartozik a sűrűségalapú elkülönítés (zsúfoltság esetén) és a geo-vektorozás (a forgalom összetettségének csökkentésével növeli a kapacitást az U-Space és az UTM számára). A kutatás olyan gépi tanulási algoritmusokra is kiterjed, amelyek ezeket a koncepciókat továbbfejleszthetik.
- A javasolt koncepciók hatásának értékelése a különböző kulcsfontosságú teljesítményterületeken (KPA[12]). Ilyen a biztonság, a kapacitás és a hatékonyság, annak érdekében, hogy ajánlásokat fogalmazhassanak meg az egyes működési környezetek legmegfelelőbb kialakításához [3].

A projekt fő eredményeként várhatóan egy kezdeti működési koncepciót fognak kidolgozni, amely elsősorban a városi elkülönítési rendszerre tesz javaslatokat. A javasolt megoldások validációs kísérleteinek sorozata a meghatározott módszertanban előírtak E-OCVM[13] által meghatározott V1 fázis befejezéséhez és a következő készenléti szint (TRL2[14]) eléréséhez fog elvezetni. Ezek a legfontosabb készültségi szintek a projektek (SJU[15]) összefogásához.

A pilóta nélküli légi jármű-rendszerek alkalmazása vezető üzletágnak számít Európában, mivel minden környezetben szolgáltatásokat nyújtanak velük, beleértve a városi területeket is. A térképezés, az infrastruktúra ellenőrzése, a precíziós mezőgazdaság, az áruszállítás és az e-kereskedelem mind-mind olyan szolgáltatások, amelyekhez a jövőben elsődlegesen UA-rendszereket használnak. Megjelenésükkel együtt járó új kihívásokkal szembesítik

[9] U-Space Separation in Europe – U-Space elkülönítési eljárások Európában.
[10] UTM: Unmanned Traffic Management.
[11] ATM: Air Traffic Management.
[12] Key Performance Areas.
[13] European Operational Concept Validation Methodology.
[14] Technology Readiness Level.
[15] Sesar Joint Undertaking.

az érintetteket a stratégiai tervezés, szabályozás és működési kérdések kontextusában. Az egyik ilyen akadály a drónok biztonságos mozgatása az adott terület feletti légtérben. Az *U-space* meghatározott szolgáltatások és eljárások halmaza, amelynek célja a biztonságos és hatékony hozzáférés biztosítása a légtérhez egy nagy műveletszámú drónrepülés esetén is, és amelynek alapján a digitalizáció és az automatizálás magas szinten megvalósulhat. Mindez olyan módon, hogy harmonizálható legyen a jelenlegi ATM-környezettel. Az új rendszer bevezetése megköveteli, hogy az államok először határozzák meg és jelöljék ki, hogy a *U-space* légterei hol lesznek, és milyen biztonságossági vagy auditálási feltételek mentén, hogyan kívánják azokat üzemelni. Az alábbi négy kötelező *U-space*-szolgáltatást kell majd biztosítani minden államban:

- hálózatazonosító szolgáltatás: biztosítja az UAS-operátorok azonosítását, valamint megjelöli a drónok földrajzi pont feletti helyét és repülési pályáját a műveletek során;
- geo-tudatosság: tájékoztatást ad a működési feltételekről, légtérkorlátozásokról vagy a meglévő időbeni korlátozásokról;
- repülésengedélyezési szolgáltatás: biztosítja konfliktusmentes műveletek lebonyolítását más felhasználókkal együtt;
- forgalmi tájékoztató szolgáltatás: riasztások esetleges forgalmakról, amelyek a saját drón közelében találhatók.

Ezenkívül van még két további *U-space*-szolgáltatás, amelyek opcionálisak lesznek. Ezek kialakítása az állam döntése, hogy mely légterek vonatkozásában teszi azokat kötelezővé. Ilyenek lehetnek a következők:

- időjárási tájékoztató szolgáltatás: támogatja a repüléstervezési és -végrehajtási fázisokat és javítja az egyéb *U-space*-szolgáltatások minőségét;
- megfelelőségfigyelő szolgáltatás: figyelmeztet a repülési engedélyek megszegésére, és tájékoztat bármilyen eltérés esetén.

A fenti követelmények biztosítására kötelező, központi *(core)* szolgáltatások jönnek majd létre. Az *U-Space*-rendszeren belül a CISP[16] lesz a felelős minden releváns információ terjesztéséért. Ezáltal minden közös információ egyetlen, megbízható és visszakövethető forrásaként működik majd. Az *U-space*-szolgáltatásokat különböző tanúsított USSP[17]-k fogják nyújtani az *U-Space* légtereiben és minden működési fázisban. Mindezeken túl aktívan együttműködnek majd a légi forgalmi szolgálatokkal (ATS),[18] más országok USSP-ivel és a CISP-jeivel az információcsere és az összes művelet megfelelő működtetése érdekében [4].

3. Repülőtér-üzemeltetők szempontjai és feladatai

A mintarepülőtér üzemeltetőjének felelősségei és feladatai lesznek a pilóta nélküli légi járművek repülőtéri alkalmazása kapcsán. Az új technológia megjelenése nemcsak a repülőtér egyébként dinamikusan fejlődő infrastruktúrájának használója, de a repülőtéri légi forgalom új elemének is tekinthető. A mintarepülőtérként szolgáló katonai/állami repülések célját

[16] Common Information Service Provider.
[17] U-Space Service Provider.
[18] ATS: Air Traffic Service.

szolgáló repülőterek üzemeltetője, eltérően a polgári gyakorlattól, a repülőtér működtetése mellett, a légi forgalmi szolgálatának működéséért és a repülőtéren települő állami légi járművek üzemeltetéséért is felel. A repülésbiztonság teljes spektrumában vezetőként tevékenykedik, ezért minden helyi működési szabály kidolgozásában és engedélyeztetésben részt vesz a drónok integrálási folyamatát tekintve, legyen az infrastruktúra használata, a légi forgalmi szolgálat működési eljárásai vagy a repülőteret igénybe vevő forgalom szervezése és engedélyeztetése. Az érvényben lévő jogszabályok helyesen és pontosan határozzák meg azt, hogy mely légterekben engedélyezett és melyekben tilos pilóta nélküli eszközöket reptetni. Az érvényben lévő előírások betartására úgynevezett „Geofencing" technológia áll rendelkezésre, amely biztosítja azt, hogy az akár akaratlagosan is előírást sértő módon gondolkozó kezelők se tudjanak levegőbe emelni ilyen eszközöket. Rádiófrekvenciás és/vagy műholdas jeleket felhasználva (az eszköz helyadatai alapján) a légi járművek hajtóművének beindítását is lehetséges szoftveresen korlátozni. Figyelembe véve a jelenlegi trendeket és a pilóta nélküli repülő/légi eszközök felhasználási lehetőségeit felmerülnek a kérdések: „Vajon jól van-e ez így? Ki lehet-e, vagy egyáltalán érdemes-e kizárni ezeket a modern eszközöket egy légi és földi forgalommal terhelt repülőtér életéből? Hogyan lehet ezen eszközöket beilleszteni a légi forgalom rendszerébe?"

Áttekintve a drónok lehetséges alkalmazási körét, több előnyt és hátrányt is meg lehet fogalmazni:

- A repülési útvonalukon valós idejű, nagy felbontású videókat képes közvetíteni egyrészről a drón kezelőjének, másrészről a légi forgalmi irányító központba, illetve a repülőtér karbantartásáért felelős szolgálatnak. Fontos ez, mivel nagy jelentősége van a repülőtér üzemeltetésének szempontjából annak, hogy a légi forgalmi irányítás milyen ismeretekkel rendelkezik a munkaterület (leginkább a futópálya és gurulóutak) felületének állapotáról.
- A repülőtéren illetékes légi forgalmi irányító szolgálatnak információkkal kell rendelkeznie arról, hogy van-e olyan felületi sérülés, amely akadályozza a biztonságos fel- és leszállások végrehajtását a repülőtér munkaterületén. De ugyanígy a felületi sérülések azonnali karbantartása is lehetséges az úgynevezett „*real-time*" adatok igénybevételével és értékelésével. Az e célú alkalmazással a futópálya kihasználtsági tényezője és ezzel együtt a repülőtér névleges üzemi kapacitása növekszik.
- A megfelelő szenzorokkal való felszereltséggel képesek az aktuális időjárási körülményeket (látástávolság, felhőalap, páratartalom, felületi jegesedések stb.) felderíteni, sőt ezekről – az információ továbbításán túl – riasztást is adhat a meteorológiai szolgálat vagy egyéb felhasználók számára.
- A légi forgalmi irányításnak ugyanígy tudnia kell, hogy van-e eltávolítást igénylő FOD[19] a munkaterületén. A fedélzeti 4K felbontású kamerák képesek mindezen információk költséghatékony biztosítására napszaktól és időjárási körülményektől függetlenül.
- Drónok alkalmazásával a repülő-műszaki kiszolgáló szakemberek munkáját is meg lehet könnyíteni és gyorsítani. Lehetőség nyílik különböző eszközök, szerszámok karbantartási helyekre történő kiszállítására vagy azok közötti mozgatásra.

[19] Foreign Object Debris.

- A fel- és leszállások időszakában madárral való ütközések nagy veszélyt jelentenek a repülőtér környezetében. A repülőtér üzemeltetőinek mindent meg kell tenniük ezek kivédésére, amihez a drónok segítséget nyújthatnak. Felderíthetik a madarakat, illetve elriaszthatják azokat pusztán a megjelenésükkel vagy az általuk keltett zavaró hangokkal.

Sajnos azonban a fenti előnyök mellett több, a repülőtér üzemeltetésének szempontjából hátrányos tényezőt is meg kell említeni, amelyek a következők:

- A repülőtéri UA-ra vonatkozó légtérzár feloldásával megnyílik a lehetősége annak, hogy a spotterek eszközei is megjelenjenek a repülőterek körzeteiben, légtereiben. Ezek a fotósok ott vannak a repülőterek körül, mindent látni és képileg rögzíteni akarnak. Egy jó kép elkészítéséért mindent megtesznek, hiszen abból – a hírnéven túl – komoly bevételhez jutnak.
- Számolni kell azzal is, hogy a katonai repülőterek körzetében olyan ellenséges, hírszerző pilóta nélküli eszközök jelenhetnek meg, amelyekkel készített képi és hanganyagok rögzítése nemzetbiztonsági szempontból kockázatot jelent.
- A pilóta nélküli légi járművek döntően kis súlyú és méretű eszközök, amelyek relatíve közel repülnek a repülőgépekhez és/vagy helikopterekhez a földi mozgásuk (légi/gurulások) idején. Fennáll annak a veszélye, hogy egy szélbefúvás vagy akár a forgószárny által keltett turbulencia miatt nekiütköznek egy légi járműnek, vagy rosszabb esetben a hajtóműbe kerülnek.
- Katonai, védelmi szempontokat figyelembe véve nem lehet eltekinteni a szándékos cselekmények elkövetésétől sem, így a drónok, habár látszólag kis tömegűek, mégis képesek végzetes kimenetelű eseményt elkövetni velük. Használatukkal akaratlagos légi ütközések idézhetők elő a légtérben repülő más légi járművekkel, vagy akár robbanószerek szállítóeszközeként is használhatók a repülőtér munkaterületén.
- Amennyiben az előző eset nem is történik meg, „csupán" bármely oknál fogva a drón a földnek csapódik, akkor FOD keletkezik a munkaterületen, amely a guruló légi járművek, illetve a légi közlekedés kiszolgálásában részt vevő földi járművek közlekedési fennakadásához vezet.

A fentiekben leírt negatívumok a fő okai annak, hogy a repülőterek üzemeltetői továbbra is óvatossággal tekintenek a drónok alkalmazására a működési területükön.

Ennek ellenére több szempontból kifejezetten hasznos eszközök, ha azokat a megfelelő eljárásrendek betartásával, képzett kezelők végzik, olyan személyek, akik képesek aktívan bekapcsolódni a repülőtéri légi forgalom áramlásába, és biztonságtudatosan üzemeltetnek. A jövőt tekintve az egyik legfontosabb tényező, hogy a drónok más légi járművekkel vagy a repülőtér építményeivel való összeütközésének elkerülésére szolgáló fedélzeti és egyéb rendszerének optimalizálása megtörténjen. A technológiai fejlesztésnek meg kell nyitnia a lehetőséget a radar és/vagy ADS-B[20] jelek, valamint a kameraképek alapján megjelenített veszélyforrások időbeni jelzésére, a kezelői helyzettudatosság fokozására.

[20] ADS-B: Automatic Dependent Surveillance – Broadcast.

A kismagasságú légtérrész drónok számára való felszabadításával a repülőterek üzemeltetői nemcsak költségeket takaríthatnak meg, hanem a helyzettudatosságuk növelésével biztonságosabbá is tehetik légi forgalmukat [5].

4. A drónok okozta kockázatok, azok becslése és csökkentése

A kis méretű pilóta nélküli repülőgépek gyakran működnek a földfelszíni objektumok és emberek közelében. Nincs ez másként a repülőtéri alkalmazás esetében sem. Ancel, Capristan, Foster és Condotta [6] a drónok felhasználása kapcsán sajátos kockázatbecslési modellt javasol *(UTM Risk Assessment Framework).* A modell a Bayes-féle hálózatot *(Bayesian Belief Networks)* a kockázatos szituációk valószínűségi összefüggéseinek, a földön tartózkodó embereket fenyegető veszélyforrások valószínűségének és azok következményeinek felmérésére használja. A kockázatok ilyetén meghatározása és kijelzése segítheti mind a pilótát, mind az irányítót a repülés pontos és biztonságos megtervezésében és végrehajtásában.

4.1. A drónok okozta kockázatok becslése

Liliana [7] a kockázatok előzetes meghatározásához más metódust, az Isikava-diagram használatát javasolja. Az egyes folyamatok minőségének (biztonságának) elemzésére szolgáló eszköz a technikai rendszerek diagramalapú vizsgálatát négy lépésben valósítja meg:

- a probléma meghatározása;
- a főbb oki tényezők megállapítása;
- a lehetséges okok azonosítása;
- az elemzés elvégzése (diagram formájában).

A probléma körülírását és a befolyásoló tényezők körének meghatározását a repülésbiztonság vonatkozásában például az SMS[21] metodikája biztosíthatja. Ezt követően az oki tényezők akár a SHEL(L) modellel, akár ezeknél egyszerűbb modellekkel behatárolhatók. Az Isikava-módszer a SHEL(L) modellhez hasonlóan, bár kissé más megközelítésben dolgozza fel az okokat (eltéréseket). A főbb kategóriák a következők:

- emberek: bárki, aki részt vesz a folyamatban;
- módszerek: a folyamat végrehajtásának módja és a végrehajtás konkrét követelményei (irányelvek, eljárások, szabályok, rendeletek és törvények);
- gépek: bármilyen berendezés, amely szükséges a munka elvégzéséhez;
- anyagok: nyersanyagok, alkatrészek, amelyeket a végtermék előállításához használnak;
- mérések: a folyamatból előállított adatok, amelyek a minőség értékelésére szolgálnak;
- környezet: azok a körülmények, mint például a hely, az idő, a hőmérséklet és a kultúra, amelyben a folyamat működik.

[21] Safety Management System.

Mindezek alapján minden oki kategória M betűvel jelölhető (gépek, módszerek, ember, anyagok, karbantartás, anyatermészet, környezet, menedzsment), így az azonosított okok számának megfelelően többféle Isikava-diagram is felvehető (4M, 5M, 6M, 7M).

Burin [8] megállapítása szerint a lassú és retrográd reaktív repülésbiztonsági módszertannal szemben, amely alapvetően a megtörtént esetek tanulságaira alapozza a prevenciót, a következő két előrejelzésre, lehetőségre helyezi a hangsúlyt:

- minél több adattal rendelkezni a kockázatértékeléshez és -kezeléshez annak bizonyítása érdekében, hogy a kockázat szintje kritikus, tehát érdemes foglalkozni az adott problémával;
- érdemes rendelkezni a kockázatkezelési döntéshozók támogatásával, akik a kockázatkezelési eszközök felett rendelkeznek.

Mindkettőhöz a repülésekről szóló adatokban rejlik a kulcs. Az adatok lehetővé teszik a hagyományos biztonsági dilemma megoldását, vagyis annak mikéntjét, ahogy igazolni lehet a kockázat kritikus szintjét anélkül, hogy bekövetkezett volna. Az UTM területén a repülőeszközzel fennálló folyamatos adatkapcsolat biztosítja mindezt. A repülés végrehajtását, valamint az irányítást az azt támogató, széles körű valós adatbázison alapuló gépi előrejelző rendszerek biztosítják. Ezek bejósló metódust alkalmaznak és a reaktív és a proaktív módszertan ötvözésével teszik lehetővé a kockázatos helyzetek kivédését.

Kopardekar, Rios, Prevot, Johnson, Jung és Robinson [9] a drónok kis magasságú légtérben folyó biztonságos működése érdekében a következő működési elveket rögzítik:

- csak hitelesített UAV és üzemeltetők működhetnek a légtérben;
- az UAS-t[22] szükséges elkülöníteni az UAV-tól;
- az UAS-t szükséges elkülöníteni a hagyományos légi járművektől;
- az UAS az összes releváns tényező ismeretében, a földön lévő élőlényektől és építményektől biztonságos távolságban üzemeljen;
- a közfeladatot ellátó UAV-t előnyben kell részesíteni a többi UAV-val és a hagyományos légi járművekkel szemben;
- mindennek elérése érdekében nagyobb rugalmasságot szükséges érvényesíteni, ami két alapvető feltételen alapul:
  - rugalmasság, ahol lehetséges és ahol szükséges azokban az esetekben, amikor több UAS szándékozik egyazon légtérben működni. Olyan intézkedések bevezetése szükséges, mint a folyosók, útvonalak kijelölése, az iránymagasságok alkalmazása és egyéb korlátozások foganatosítása;
  - kockázatalapú megközelítés alkalmazása, ahol a légtérigények és a felhasználási feltételek határozzák meg az alkalmazás mikéntjét, a felszínen vagy a levegőben fennálló kockázatok alapján.

A nagy forgalomsűrűségű légterekben, a hatékonyság és a biztonság egyensúlyának fenntartása érdekében valós idejű konfliktuselhárításra van szükség, olyanokra, mint az eljárásos megoldási módok alkalmazása, vagy az érkezési sorrendről való értesítés, valamint közszolgálati és vészhelyzeti műveletek előnyben részesítése.

[22] UAS: Unmanned Aircraft Systems.

Az UAV repülőtéri alkalmazásához kötődő kockázatok megállapítására számtalan szoftveres megoldás kínálkozik:

- A Safety Assessment Software egy átfogó biztonsági eszköz, amely megvalósítja a SAE ARP4761, MIL-STD-882 és más szabványok követelményeit és feladatait. Ez az ALD RAM Commander megbízhatósági és biztonsági eszközkészletének szerves része. Az Airbus ügyfeleinkkel együttműködve definiált és kifejlesztett FHA (Functional Hazard Analysis), PHA (Preliminary Hazard Analysis), SSA (System Safety Assessment), PSA (Probabilistic Safety Assessment) elvégzését teszi lehetővé.
- Kvantitatív kockázatértékelési rendszer, vagyis az ITEM Kvantitatív Kockázatértékelési Rendszer (iQRAS) segíthet azonosítani a kockázatokat, megtalálni a főbb hozzájáruló tényezőket. Hatékony módszereket kínál a kockázatok csökkentésére. A kezdő eseményintegráció idővonalakkal, eseménysorozatokkal, meghibásodási valószínűségi jellemzéssel, kockázati rangsorolással és érzékenységi elemzéssel hatékony, integrált kockázatelemzési környezetet biztosít.
- A Risk.Net kockázatkezelési szoftver megkönnyíti az összes létező FMEA[23] (konstrukció, folyamat, termék vagy rendszer FMEA) alkalmazását. Az intuitív hibafastruktúra biztosítja a rendszer könnyű alkalmazását. A program azt is lehetővé teszi, hogy bármilyen típusú kockázatértékelés elvégezhető legyen.

4.2. A drón okozta kockázatok kezelése

Tomić, Čokorilo és Macura [10] SWOT-analízist végzett a drónok repülőtéri alkalmazása kapcsán. Az alábbi fontos kihívásokat azonosították:

- az eszköz feletti irányítás elvesztése;
- hiba a drón aktuális helyzetének észlelésekor;
- drón általi futópályasértés az aktív kifutópályán;
- a drónok más felhasználók általi hatalomba vétele;
- emberi sérülés okozása.

A drónok jelentette kockázat csökkentésére a következőket javasolják:

- fedélzeti válaszadó telepítése a drón fedélzetére;
- TCAS-rendszer[24] telepítése a drón fedélzetére;
- egyértelmű eljárások és biztonsági rendszabályok előírása a drónpilóta számára biztonságkritikus helyzetekben;
- repülési tervek adatbázisának elkészítése, amely tartalmazza a drón tervezett mozgási útvonalait a repülőtér területe felett;
- a drón működési magasságának korlátozása a futópálya-ellenőrzési folyamat során, az összeütközési kockázat csökkentése érdekében;
- a drón jobb megvilágítása az észlelhetőség növelése érdekében;
- a légi járművek fülkeüvegezésének keménységével kapcsolatos légi jármű-tanúsítási kritériumok szigorítása;

[23] FMEA: Failure Modes and Effects Analysis.
[24] TCAS: Traffic Collision Avoidance System.

- a drónok harmadik fél általi használatának korlátozása a repülőtér körzetében;
- olyan repülőgép-fedélzeti radarnézet előállítása, amellyel a drónok megfigyelhetők.

Konkrét technikai megoldást javasol Shvetsova és Shvetsov [11] a drónok repülőtéri környezetben való biztonságos repülésének garantálására. A javasolt műszaki megoldások több csoportra oszthatók. Az első csoportba a passzív rendszerek tartoznak, amelyek a drónrepülések figyelését és követését jelentik beavatkozás nélkül. A második csoport az aktív rendszerek, amelyek már befolyásolják a drónok repülési pályáját.

Az ilyen típusú rendszereket főként kulcsfontosságú létesítmények jogosulatlan drónrepülések elleni védelmeként alkalmazzák. Az aktívak több alcsoportra oszthatók:

- kezelőt vagy drónvezérlést aktívan befolyásoló rendszerek;
- közvetlen befolyásolásra szolgáló rendszerek, amelyek károsíthatják az eszközt, aminek következtében a drón elveszíti repülési képességét (Boeing lézeres repülőterek védelmi rendszer);
- a repülési pályának megváltoztatása egy másik drón segítségével (drónvadászként emlegetett speciális drónok);
- biotechnikai rendszerek, vagyis olyan megoldások, mint például speciálisan kiképzett sólymok bevetése a drónok ellen.

A Shvetsova és Shvetsov [11] által javasolt megoldások mindegyike képes lehet az UAV ellenőrzött és biztonságos használatának biztosítására a repülőtereken és azok környékén, de a hatályos szabályozások alapján bizonyos aktív rendszerek nem használhatók repülőterek közelében, mivel zavarhatják a navigációs berendezések és egyéb elemek működését. Az eszközök mozgásának kezelésére a cikk szerzői sajátos módszert dolgoztak ki, amelyet RMS-nek *(Route Management System)* neveztek el. A rendszer növelheti a drónok repülőtereken való mozgásának biztonságát, azokat szigorúan egy kijelölt légi folyosóra korlátozva. A lényege, hogy a drón nem hagyhatja el a számára kijelölt légi folyosót, és ezt az eszköz földön felállított speciális földi mobil platformhoz tartókábellel való rögzítése biztosítja. Az UAV repülésképességét ez nem korlátozza, ugyanakkor, a tartókábel hossza és a tartóplatform helye behatárolja a drón mozgási zónáját. Repülés közben az eszköz meghúzza a tartókábelt, így akár mozgathatja a mobil platformot a drón után, de mivel a platform egy sínrendszeren mozog, a pálya továbbra is a földi berendezések által behatárolt területen belül marad.

5. A drón okozta kockázatok észlelésének és kezelésének gépi támogatása

A kockázatos szituációkban meghozott biztonsági következményekkel járó emberi döntések gépi támogatásának kidolgozásához szükséges megvizsgálni, hogy milyen típusú döntéshozatal esetében, mekkora mértékben és pontosan milyen gépi támogatás szükséges. Korábbi kutatások alapján [12] ismert, hogy bonyolult és újszerű, dinamikusan változó környezetben a nehéz feladatok végrehajtói a döntés meghozatalakor csupán 5%-ban hasonlították össze a lehetséges megoldási alternatívákat. Átlagosan 2,68 alternatívára gondoltak az egyes döntési helyzetekben, a végleges alternatíva mellett pedig végül azért döntöttek a leggyakrabban (44%), mert az tűnt a legcélravezetőbbnek. A mérlegelésben szerepet játszott az is (24%), hogy

az alternatíva biztonságos volt-e. Radnóti és Faragó kutatása rámutat, hogy abban az esetben, amikor a kockázatos következménnyel járó döntések meghozatalára rendelkezésre álló idő átlagosan 3,75 perc, a résztvevők többsége elégedett volt ezzel az időmennyiséggel, ám kevésnek ítélték a rendelkezésre álló információ mennyiségét. A vizsgálat azt is kimutatta, hogy a megfigyelt több száz döntés igen nagy hányadát kevesebb mint egy perc alatt hozták meg.

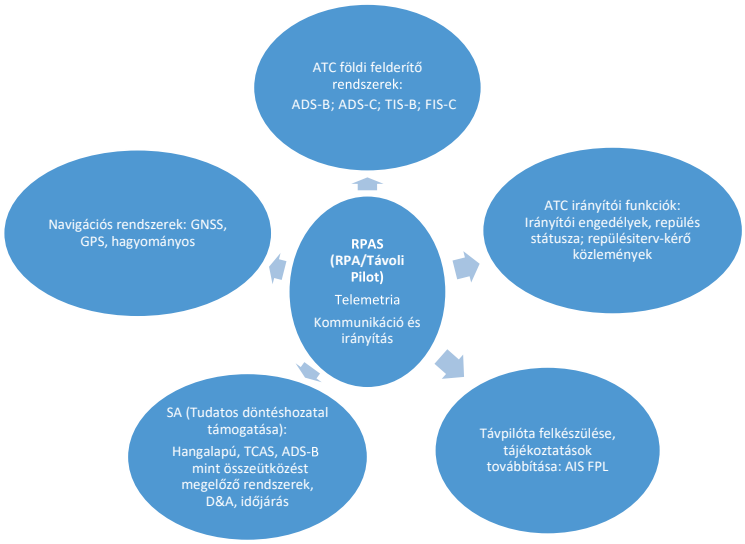
A fenti megállapítások alapján a repülőtéri irányítók esetében a következő gépi támogatási módok rajzolódnak ki:

- a repülőtéri irányító támogatása többletinformációval (forgalmi, meteorológiai, helyzeti);
- lehetséges kockázatos szituációk gépi előrejelzése aktuális adatok és statisztikai háttéradatok alapján;
- a repülőtéri irányító döntésének támogatása korábbi konfliktusok megoldási módjainak elérhetővé tételével;
- a repülőtéri irányító döntésének támogatása konkrét kockázatkezelési javaslattal;
- a drón irányítását végző személyzet repülés előtti kockázatértékelésének támogatása.

6. A repülőtéri irányítás irányítási eljárásai és felelőssége

A drónok ATM-rendszerbe való teljes körű integrációja azzal jár együtt, hogy a légi forgalmi szolgálatok ugyanúgy légi járműként kívánják kezelni őket, mint a többi hagyományos légi járművet és légtérfelhasználót. Az ATCA[25] és az Eurocontrol[26] még a 2013-as szemináriumán rögzítette azokat az alapvető elvárásokat, amelyek elengedhetetlenek számukra ahhoz, hogy a drónok és hagyományos légi járművek közös és egyidejű repüléseinek biztonságos feltételeit biztosítsák a légtérben. Ilyen volt, hogy az új légtérfelhasználók teljes spektrumát azonosítsa, a légi navigációs szolgáltatók és ezen belül a légi forgalmi szolgálatok ismerjék ennek a spektrumnak a sajátosságait, légi járműként kezeljék őket, hiszen nem is lehet másként. A pilóta nélküli légi járművek jelenléte a légtérben legyen ismert a többi légtérfelhasználó számára is. A jelenlegi ATM-rendszereket, kommunikációs és navigációs eljárásokat nem kívánják módosítani a drónok megjelenése miatt, ezért legyenek képesek azokat használni a repüléseik tervezése és végrehajtása során. Röviden összefoglalva az alábbi ábrán az látható, hogy mindazokat a funkciókat várják el a drónoktól az adott környezetben, mint amit eddig megszoktak a hagyományos légi járművek kezelése során (2. ábra).

[25] Air Traffic Control Association.
[26] European Air Navigation Organization.



2. ábra
RPAS integrálásának feltételei a meglévő ATM-rendszerbe (a szerző [18] alapján)

Ez azt jelenti, hogy a drónok:

- repülése legyen ismert és előre megtervezett még a felszállás megkezdése előtt, vagyis repülési terveiket előzetesen ismerje a légi forgalmi szolgáltató és biztosíthassa a neki járó szolgáltatásokat;
- a repülés tervezéséhez, az arra felkészüléshez használják és ismerjék a légi forgalmi tájékoztató szolgálatok által publikált információkat, a rájuk vonatkozó veszélyek, korlátozások előzetes megismerésével, és legyenek tisztában a repüléseikre veszélyt jelentő időjárási jelenségekkel, azok jelenlétével a repülés ideje alatt;
- legyenek képesek eleget tenni a légi forgalmi irányítás által adott engedélyeknek és utasításoknak;
- a légtérben elfoglalt pozíciójukról folyamatosan adatot továbbítsanak a légi forgalmi szolgálatok felé, történjen az valamilyen földi felderítő egység igénybevételével, vagy más, a légi közlekedésben használt rendszer segítségével;
- azokat a navigációs rendszereket és eljárásokat alkalmazzák, amelyeket a hagyományos repülés is alkalmaz, és rendelkezzenek azokkal a döntéstámogató megoldásokkal, mint az észlelés és elkerülés, vagy a levegőben való összeütközés megelőzésére szolgáló előrejelző rendszer, amelyek képessé teszik őket a repülésük biztonságos és tudatos lebonyolítására.

Korábbi kutatásaink során már foglalkoztunk a pilóta nélküli légi járművek repülőtéri forgalomba való integrálásának lehetőségeivel [13], [14], és több olyan megállapítást is tettünk, amelyek jelenlegi kutatási elképzeléseink megtervezése során jó kiinduló alapként szolgáltak. Ezek között szerepelt a drónok repülőtéren belüli üzemeltetési helyének kiválasztása, a forgalomszervezési és biztonságos földön való elkülönítési eljárások kivitelezése. Kitértünk

a rádiólevelezéssel kapcsolatos eljárások sajátosságaira, külön figyelmet szentelve annak, hogy a többi légtérfelhasználó számára is ismert legyen az új légtérfelhasználó jelenléte a repülőtéren. Foglalkoztunk az érkezési és indulási eljárások alkalmazásával, és adott dróntípusokra repülőtér-specifikusan megterveztük azokat. Elemeztük, hogy mely forgalmi szituációkban élvezhetnek elsőbbséget a pilóta nélküli légi járművek a hagyományos forgalommal szemben, és kitértünk a légi forgalmi szolgálatok közötti koordinációs eljárások sajátosságaira is.

Folyamatosan nyomon követve az uniós szabályozást és az integrációt elősegítő koncepció kidolgozásáért felelős munkacsoportok munkáját, világossá vált, hogy nem lehet a hagyományos légi forgalom-irányítási eljárások mindegyikét alkalmazni különösen az ellenőrzött légterekben biztosított szolgáltatások során. Ennek egyik oka például az, hogy a drónok által alkalmazott repülési szabályok nem feleltethetők meg a VFR[27]-, illetve IFR[28]-repülésnek, definiálták a VLL-t mint a drónok ellenőrzött légtérben alkalmazott repülési szabályát. Jogszabályban rögzítették, hogy a drónpilóta, a légi jármű parancsnoka, aki közvetlenül vezeti a drónt, ellátja a légi jármű-parancsnok felelősségét és feladatait. Emellett kizárólag ő felelős az elkülönítés létrehozásáért és fenntartásáért.[29] Új megközelítést hoz a drónműveletek kockázatalapú besorolása és ezzel a nyílt, speciális és engedélyköteles kategóriák megjelenése. Az első két kategória szabályozási keretrendszere és alapelvei ismertek. A harmadik engedélyköteles kategória foglalja majd magában a nagy méretű, 3 m-nél nagyobb, embertömegek felett végrehajtott és bizonyos veszélyes áruk szállítására is alkalmas drónokat. Továbbá azok is ebbe a kategóriába tartoznak majd, amelyek embereket is szállíthatnak fedélzetükön, és végül azok a műveletek, amelyek nem automatizált, hanem autonóm repülést végeznek. A napjainkban egyre fejlődő és már rendelkezésre álló technológia valóban képessé teszi a drónokat a precíz, emberi beavatkozás nélküli műveletek végrehajtására, ami azonban újabb kihívást jelent az eddig alkalmazott légi forgalom-irányítási eljárások alkalmazásában.

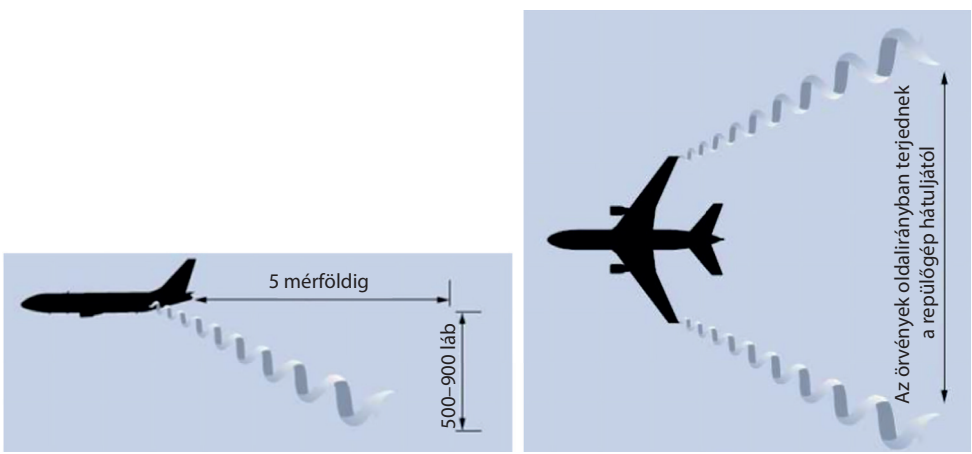
Ennek oka abban áll, hogy az ellenőrzött légterekben, köztük kutatásunk szempontjából érdekes ellenőrzött repülőtéren, a légi járművek levegőben való összeütközésének megelőzése légi forgalom-irányítói feladat és felelősség. Ez a fentiekben leírt szabályt, miszerint a hagyományos légi járművektől való elkülönítés létrehozása kizárólag a távpilóta feladata, felülírja. A repülőtér munkaterületén az összeütközések megelőzésére irányítói eljárások, irányítói engedélyek és hasznos tájékoztatások szolgálnak, de a légi jármű-parancsnok feladata, hogy biztonságos elkülönítést hozzon létre egy másik légi járműtől. A távpilótának és a légi forgalmi irányítónak is szüksége van olyan tudásra, támogatásra, amely ezeknek a biztonságos távolságoknak a létrehozását szolgálja. Kutatásunk célkitűzése egy olyan döntéstámogató megoldás létrehozása, amely tartalmazza az integrált UTM–ATM-megjelenítést, különböző adatforrásokból származó repülési adatok integrálásával, figyelembe veszi a repülőtér légtérszerkezetének és munkaterületének specifikumait, valamint a légi járművek/pilóta nélküli légi járművek sajátosságait. Ilyen a sebesség, magasság, gurulási eljárások, méret, meghajtás stb., az időjárási adatok és azok hatása különösen a drónok teljesítményére és feladataira, a légi járművek által keltett turbulencia hatásait is figyelembe veszi, és támogatja az irányítói döntések meghozatalát az egyes drónműveletek engedélyezése előtt. A megvalósítást virtuális (VR-) környezetben kívánjuk megjeleníteni, amelynek 3 dimenziós megoldásai még inkább

[27] Visual Flight Rules.
[28] Instrument Flight Rules.
[29] Lt. 60/A.

átláthatóvá teszik az irányító számára a repülőtér munkaterületének és légterének forgalmát. A kevert valóság (MR)[30] lehetőséget biztosít 3 dimenziós időjárási jelenségek (például zivatarláncok) megjelenítésére a repülőtér környezetében, végül a kiterjesztett (AR-) valóság elemeivel különböző forgatókönyvek és kísérletek is elvégezhetővé válnak majd.

7. A légi járművek keltette turbulencia és annak hatásai a drónokra

Az UA-k repülőtéri forgalomba való integrálásának egyik kiemelt figyelmet igénylő szegmense, hogy a repülőtéri környezetben időn alapuló hosszirányú turbulencia elkülönítési minimumokat hogyan lehet alkalmazni a drónok és hagyományos légi járművek elkülönítésére. A biztonságos távolság létrehozása nemcsak a légi forgalmi irányítás eljárásainak kidolgozásában és alkalmazásában kulcskérdés, de a drónpilóták számára is. A légi járművek által keltett turbulencia nem más, mint a légi jármű szárnyvégeiről leváló áramlás, amely egyrészt minden esetben fellép, másrészt pedig veszélyes is lehet más repülőeszközök számára. Tekintettel arra, hogy a szárnyvégi örvények jelentős energiát megmozgató légköri képződmények, amelyek turbulens jellege miatt nagyon nehezen prognosztizálhatók, alapvető feladat egy repülőtéren, hogy találjunk olyan mechanizmusokat, amelyek segítségével megakadályozhatunk minden olyan konfliktust, amelynek során egy repülőgép rá veszélyes örvénnyel kerül konfliktusba. A szárnyvégi örvények vertikális és horizontális kiterjedését a 3. ábra mutatja be.



3. ábra
A szárnyvégi örvények vertikális és horizontális kiterjedése [15]

Jól látható, hogy ezeknek az örvényeknek a kiterjedése (természetesen a későbbiekben leírt paraméterektől függően) akár a repülőgép után 7–10 km-re is elnyúlhat, és a repülőgép magassága alatt akár 300 m-rel is még aktívak lehetnek. A légi jármű-balesetek bekövetkezésének

[30] MR: Mixed Reality.

okai között külön kategóriaként szerepelnek a WTC[31] okozta balesetek, amelyek megelőzésére a pilóták és légi forgalmi irányítók számára is külön tréninget szerveznek.

7.1. A drónok turbulenciaelkülönítéséhez szükséges alapelvek és kutatási feladatok meghatározása

A korábbi vizsgálatok alapján a drónok repülőtéren való biztonságos alkalmazása megköveteli ezeknek az eszközöknek az elkülönítését is. Itt meg kell jegyeznünk, hogy jelen tanulmányban a merev szárnyú drónokkal kapcsolatos elképzeléseket vizsgáljuk, hiszen ezek az eszközök gyakran igénylik a repülőtéri infrastruktúrát a működésükhöz.

Hasonlóan a korábbi gyakorlathoz célszerűnek mutatkozik egy drónadatbázis összeállítása, amelyben az eszközök – turbulencia szempontjából fontos – adatait összegezzük. Ezek az alapvető adatok: maximális felszálló súly, fesztávolság, maximális/átlagos/átesési sebesség értékei. Az ismert adatok és korábbi fizikai összefüggések alapján meghatározható a kialakuló szárnyvégi örvény kezdeti cirkulációja, amely szintén rögzíthető a szóban forgó adatbázisban.

A szakirodalomból ismert, hogy a szárnyvégi örvénykeresztezés okozta hatás erősségének mérésére felhasználható RMC-összefüggésből[32] levezethető egy olyan – viszonylag egyszerű – horizontális, időbeni elkülönítési eljárás, amely alkalmas lehet egy repülőtéren a drónok biztonságos üzemeltetéséhez [16].

Az RMC-határértékek drónokra érvényes meghatározása további feladatot jelent, de tekintettel arra, hogy a hagyományos repülésben ezek már léteznek, ebben az esetben is elvégezhető a feladat. Ugyanakkor mindenképpen megfontolandónak tartjuk, hogy a repülőtéren – lehetőleg a futópálya mentén több helyen – legyen elhelyezve egy-egy szélmérést lehetővé tevő automata, amely minimálisan 10 másodpercenként szolgáltasson adatot. Ezekből az adatokból horizontális szélnyírás számolható, amely fontos indikátor a turbulenciaképződés vizsgálatakor.

Szintén célszerűnek mutatkozik legalább kettő, a futópálya végeinél elhelyezett *wind-profiler* alkalmazása is, amely segít mérni a vertikális szélnyírást és a hőmérsékleti/nedvességi profilt is az adott helyen. Szükséges egy megfelelő felbontású időjárás-előrejelző modell *domain* konfigurálása is a korábban említett elvárások mentén, amely képes a turbulencia-mérőszámok időben és térben való *előrejelzésére* (is). A *modell-domain* kialakítása majd tesztelése további kutatást igényel.

Végül, de nem utolsósorban az itt leírt feladatok elvégzése után lehetőség nyílik egy komplex turbulenciaveszély-jelző rendszer kialakítására, amelyben az alfejezetben felsorolt elemek mindegyike szerepet játszik. Ennek a rendszernek a riasztásait figyelembe véve lehet tervezni a drónok repülését.

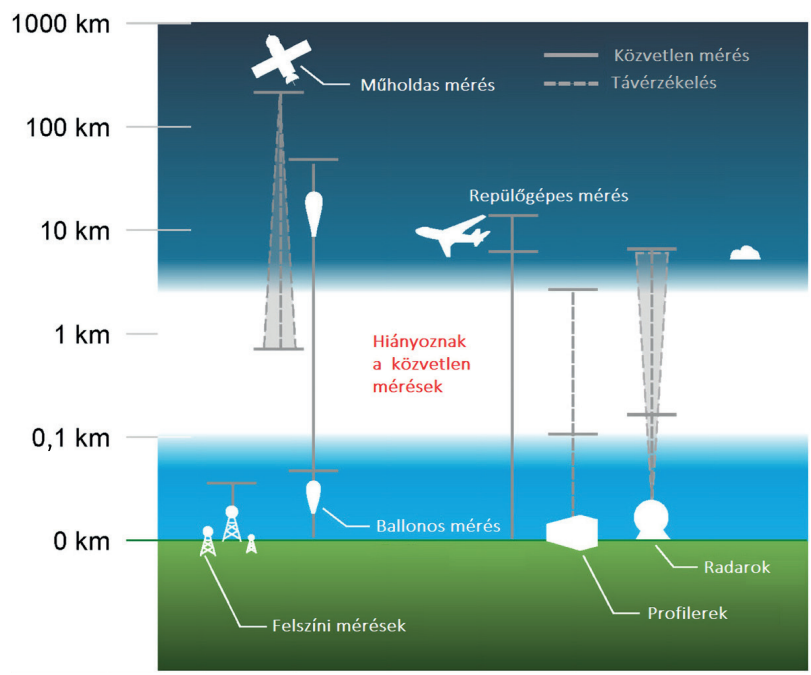
[31] Wake Turbulence Category.
[32] Rolling Moment Coefficient.

7.2. A drónok lehetséges alkalmazása a turbulencia kezelésében

Planetáris határrétegnek (PHR) a légkörnek azt a felszínközeli, maximum néhány kilométer vastag rétegét tekintjük, ahol a felszín és a légkör közötti kölcsönhatás közvetlenül kimutatható. A PHR szerepe az időjárás alakításában kulcsfontosságú (és nagyrészt ismert is), hiszen ebben a tartományban zajlanak azok a folyamatok, amelyek a légkör-felszín kölcsönhatáson át, alapvetően meghatározzák a légkör mindenkori állapotát. A PHR aktuális állapotának ismerete különösen a mikro- és mezoskálájú folyamatok fejlődésének megértésében és előrejelzésében lényeges, hiszen a nagyobb skálák dinamizmusát már a szabad légkör folyamatai determinálják. A mikroskálájú folyamatok közé tartozik a légköri turbulencia is.

Sajnos azonban minél kisebb léptékű folyamatot akarunk előrejelezni, annál nagyobb térbeli és időbeli felbontású bemeneti adatra van szükségünk a modellszámításokhoz. Általános probléma, hogy a légköri határrétegből nem állnak rendelkezésre ezek az adatok (4. ábra).

A meglévő adathiány a hagyományosnak mondható eszközrendszerrel észszerű keretek között nem elégíthető ki, újszerű, költséghatékony megoldást kell keresni, amely időben és térben is megfelelő mérési felbontást tud garantálni. A megoldást a WMO[33] iránymutatása szerint is a drónos vertikális profilozó mérések jelenthetik. Hangsúlyozni kell, hogy ezek a mérődrónok egyrészt adatokat szolgáltatnak a pontosabb turbulencia előrejelzéséhez, másrészt verifikálni is lehet az általuk mért adatokkal a korábbi előrejelzéseket.



4. ábra
Hiányzó mérési adatok a planetáris határrétegből [17]

[33] WMO: World Meteorological Organization.

A mérőrendszer legfontosabb elemeit maga a mérési feladat végrehajtására alkalmas drón, a meteorológiai paramétereket mérő szenzorok, valamint a hozzájuk tartozó adatgyűjtő, adattovábbító és adatfeldolgozó infrastruktúra jelentik [17]. A mérőhálózat legfontosabb eleme egy olyan drón (5. ábra), amely akár néhány óránként képes a PHR vertikális szondázására. Egy ilyen feladat ellátásánál pedig elengedhetetlen a magas hatásfok és a megbízható működés.



5. ábra
Meteorológiai méréseket végző drón kísérleti prototípusa [17]

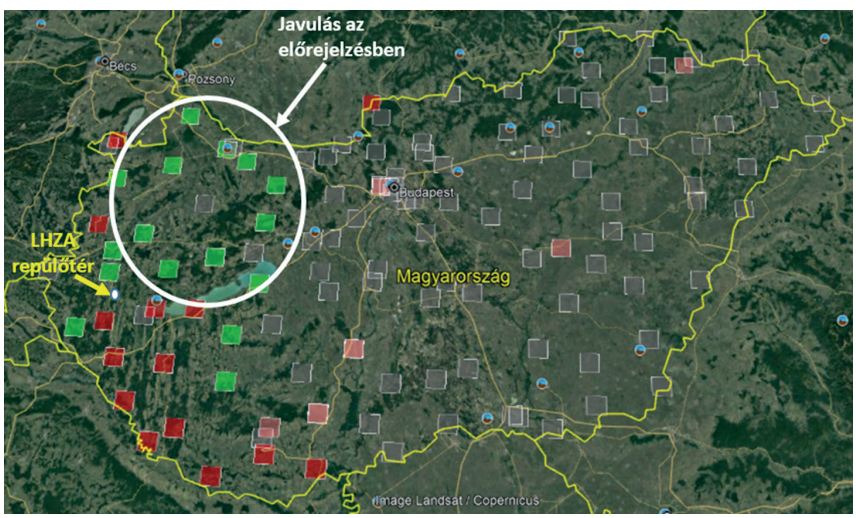
A szenzorrendszer kialakításánál a hagyományos rádiószondás profilozó mérésekkel szemben támasztott elvárásokat vettük irányadónak. Ez nemcsak a vizsgált állapothatározók kiválasztását, azaz egyben a szenzorok meghatározását, hanem a mérésekkel szemben elvárt pontosságot is alapjaiban determinálta. Ennek megfelelően olyan szenzorrendszer összeállítását végeztük el, amely alkalmas a levegő hőmérsékletének, nedvességének és nyomásának mérésére. Tekintettel arra, hogy még egy szónikus anemométer drónra való fizikai illesztése sem egyszerű feladat, nem is beszélve a drón mozgása és a légcsavarok okozta áramlás figyelembevételéről, úgy döntöttünk, hogy a rádiószondás mérésekhez hasonlóan mérőeszköz nélkül oldjuk meg a levegő mozgási karakterisztikáinak (szélsebesség, szélirány, széllökés) számítását. Az eredményeket egy egyszerűsített ábrán mutatjuk be, amelyen a jelzett állomások helyén különböző színű négyzettel reprezentáljuk, hogy a vertikális méréssel támogatott modell futtatása esetén javult (zöld), romlott (piros) vagy lényegileg nem változott (szürke) az említett paraméterek tekintetében az összesített eredmény (6. ábra). Itt tehát valójában arról van szó, hogy azt tudjuk elemezni, hogy pusztán egy szélprofil milyen változásokat indukál a komplex modell eredményében a felszínen, és ennek a hatásnak a horizontális kiterjedésére is kapunk információt. A 6. ábráról leolvasható néhány nagyon fontos megállapítás:

- a szélprofil felhasználása a mérés helyszínéhez csak egy adott távolságon belül hozott szignifikáns változást az előrejelzésben (ez körülbelül maximum 150 km-nek adódott), ami alátámasztotta az előzetes várakozásunkat;

- a vertikális mérési adatok alkalmazása az előbb említett területen belül kettő jól elkülönülő zónát jelöl ki: LHZA repülőtértől északra egyértelműen javultak, míg délre inkább romlottak az eredmények. Ez szintén várható volt, hiszen a korábban említett déli szélirány miatt a mérési ponttól északra lévő terület irányába tudta a modell figyelembe venni pontosan a légmozgást;
- ez nem csak magának a szélkarakterisztikáknak a pontosítását, hanem az északi irányba való hőmérséklet és nedvesség advekciójának (szállításának) precízebben történő figyelembevételét tette lehetővé, aminek eredménye az ábrán fehér körrel jelzett területen az egyértelmű javulást mutatja.

Az alkalmazott vizsgálati módszer alapján világossá vált, hogy időjárási helyzettől függően egy-egy mérőállomás horizontálisan várható hatása – adott modellkonfiguráció mellett – mintegy 80–100 km-es távolságig várható. Természetesen ezek még csak előzetes eredmények, így további vizsgálatokat igényel a szóban forgó probléma megoldása, hiszen tesztelnünk szükséges a teljes profil esetén (hőmérséklet, relatív nedvesség, szélirány és szélsebesség együttesen) és különböző időjárási helyzetekben is az adatokra vonatkozó modellérzékenységet.

A fentiek ismeretében a turbulencia előrejelzésében/megfigyelésében a repülőtéren célszerűnek mutatkozik egy olyan meteorológiai mérődrón-rendszer alkalmazása, amely pontosabb adatokkal látja el a kialakítandó turbulenciaveszélyre figyelmeztető rendszert, és így hozzájárulhat a repülésbiztonság magas szinten tartásához a drónrepülések során is.



6. ábra

Egy vertikális szélmérés hozzáadott értékének vizsgálata az előrejelzés pontossága szempontjából, LHZA repülőtér, 2021. november 3-án

(Megjegyzés: A zöld szín a javuló, a piros a romló, a szürke az indifferens hatást mutatja az adott felszíni mérőállomás esetében) [Kardos Péter és Bottyán Zsolt által szerkesztett ábra]

8. Befejezés

A drónok és a velük megjelenő új technológiák folyamatosan formálják és bővítik alkalmazási területeiket. Ezért a repülőtereken való hagyományos légi járművekkel való egyidejű alkalmazásukra is előbb utóbb igény mutatkozik, ezért szükséges egy olyan közös UTM–ATM-környezet létrehozása, amely a közös forgalom kezelését biztonságossá teszi. Ennek részét képezi az előre tervezett repülési adatok és az aktív adatok biztosítása egy közös felületen, de a drónrepülések egyéb specifikumait, azok hatásait is figyelembe kell venni a forgalomkezelés során. Kutatásunk következő két évében az elméleti kutatási eredményeink gyakorlati megvalósításával olyan megoldásokat szeretnénk kidolgozni, amelyek mind a drónpilóták, mind a hagyományos légi járművek pilótái, a repülőterek és légi forgalmi szolgálatok számára is hasznos tudást biztosítanak.

Irodalomjegyzék

[1] Eurocontrol Corus, *U-space Concept of Operations.* SESAR 4/9/2019

[2] 4/1998 (I. 16.) Korm. rendelet a magyar légtér igénybevételéről

[3] SESAR, *Delivering Drone Solutions for Smart and Sustainable Air Mobility, U-space Research and Innovation Portfolio.* Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2021. Online: www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/reports/U-space%20RandI%20portfolio.pdf

[4] SESAR, Concept of Operations for European UTM Systems, Final Version, CORUS, 2019. Online: www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS%20ConOps%20vol2.pdf

[5] Bali T., „Ajánlások az UAV-k biztonságos légi és földi üzemeléséhez szükséges (repülési) szabályokra," *Repüléstudományi Közlemények,* 26. évf. 3. sz. pp. 7–12. 2013. Online: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2013_3/2013-3-01-Bali_Tamas.pdf

[6] Ancel, Ersin et al., *Real-time Risk Assessment Framework for Unmanned Aircraft System (UAS) Traffic Management (UTM).* AIAA AVIATION Forum, Denver, Colorado 2017. Online: https://doi.org/10.2514/6.2017-3273

[7] Liliana, L., "A New Model of Ishikawa Diagram for Quality Assessment," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 161. évf. pp. 012099. Online: https://doi.org/10.1088/1757-899X/161/1/012099

[8] Burin, J., "Being Predictive in a Reactive World," *ISASI Journal,* 46. évf. 1. sz. 2013. Online: https://isasi.org/Documents/library/technical-papers/2012/1-Making-Safety-Predictive-in-a-Reactive-World-Jim-Buren.pdf

[9] Kopardekar, P. et al., "Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) Concept of Operations to Safely Enable Low Altitude Flight Operations," *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operation Conference,* Washington, D.C., 2016. június 13–17. Online: https://doi.org/10.2514/6.2016-3292

[10] Tomić, L., Čokorilo, O., Macura, D., "Runway Pavement Inspections Using Drone – Safety Issues and Associated Risks," *International Journal for Traffic and Transport Engineering,* 10. évf. 3. sz. pp. 278–285. 2020. Online: https://doi.org/10.7708/ijtte.2020.10(3).02

[11] S. V. Shvetsova, A. V. Shvetsov, "Ensuring Safety and Security in Employing Drones at Airports," *Journal of Transportation Security,* 14. évf. 1–2. sz. pp. 41–53. 2021. Online: https://doi.org/10.1007/s12198-020-00225-z
[12] Radnóti I., Faragó K., „A kockázatpercepció és a kockázatvállalás vizsgálata egy fegyveres testületnél," *Magyar Pszichológiai Szemle,* 60. évf. 1–2. sz. pp. 29–50. Online: https://doi.org/10.1556/mpszle.60.2005.1-2.3
[13] Vas T., Fekete Cs. Z., „UAV az ellenőrzött repülőtér forgalmában, avagy egy szimuláció tapasztalatai," *Repüléstudományi Közlemények,* 25. évf. 2. sz. pp. 371–383. 2013. Online: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2013_cikkek/2013-2-28-Vas_Timea-Fekete_Csaba.pdf
[14] Vas T., Fekete Cs. Z., Palik M. (szerk.), *Kutatási jelentés a 3D TWR, és a LETVIS radar szimulátor berendezéseken végrehajtott légi forgalmi irányítói gyakorlatok kutatási eredményeiről.* 2013.
[15] Alonso, C. M., *UAS Sensitivity to Wake Turbulence for Establishing Safety Distance Requirements.* Universitat Politècnica de Catalunya Master in Aerospace Science & Technology. 2014. szeptember.
[16] I. De Visscher, G. Winckelmans, V. Treve, *A Simple Wake Vortex Encounter Severity Metric.* Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015).
[17] Bottyán Zs. et. al., „Rutinszerű légköri vertikális profilmérések végrehajtására alkalmas drón mérőhálózat kialakítása," *Közlekedés és Mobilitás,* 1. évf. 1. sz. pp. 1–11. 2022. Online: https://doi.org/10.55348/KM.16
[18] European RPAS Steering Group, *Roadmap for the Integration of Civil Remotely-Piloted Aircraft Systems into the European Aviation System.* Final Report Annex 2. 2013. június. Online: www.sesarju.eu/sites/default/files/European-RPAS-Roadmap_Annex-2_130620.pdf

Integration of UAS into Traffic of the Aerodrome

The integration of UASs (Unmanned Aircraft Systems) into civil and any special use of airspace have already started. Their integration into the air traffic management system is being done by reducing the risks that can be identified in the operational environment. UASs are seen as a threat in the airport environment, but their increasingly wide range of applications as work drones make them a more cost-effective and cheaper solution for many tasks. The conditions under which they can be integrated into airport traffic depend on many factors. In our research plan, we are working on the development of decision support solutions that model the use of UAS work drones and conventional aircraft in joint airspace and airports using VR, AR tools, risk assessment and mitigation solutions and specific ATC procedures. Our model airport uses the model for state flights as a starting point.

Keywords: *aerodrome, UAS, conventional aircraft, integrated operation, flight safety*

Dr. Vas Tímea alezredes, egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék vas.timea@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-0082-0370	Tímea Vas, PhD Lieutenant Colonel, Associate Professor University of Public Service Faculty of Military Sciences and Officer Training Aerospace Controller and Pilot Training Department vas.timea@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-0082-0370
Halászné dr. Tóth Alexandra légi közlekedési jogász, főosztályvezető Honvédelmi Minisztérium Állami Légügyi Főosztály h.toth.alexandra@gmail.com orcid.org/0000-0002-5410-621X	Alexandra Halászné dr. Tóth Aviation Lawyer, Head of Department Ministry of Defence State Aviation Department h.toth.alexandra@gmail.com orcid.org/0000-0002-5410-621X
Dr. Bali Tamás ezredes, parancsnok MH Kiss József 86. Helikopterdandár bali.tamas@hm.gov.hu orcid.org/0000-0001-6098-8602	Tamás Bali, PhD Colonel, Commander Hungarian Defence Forces Kiss József 86th Helicopter Brigade bali.tamas@hm.gov.hu orcid.org/0000-0001-6098-8602
Dr. Dudás Zoltán alezredes, egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék dudas.zoltan@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-8682-884X	Zoltán Dudás, PhD Lieutenant Colonel, Associate Professor University of Public Service Faculty of Military Sciences and Officer Training Aerospace Controller and Pilot Training Department dudas.zoltan@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-8682-884X
Dr. Bottyán Zsolt vezető kutató-fejlesztő munkatárs Mould Tech Systems zsolt.bottyan@mouldtech.hu orcid.org/0000-0003-0729-2774	Zsolt Bottyán, PhD Senior Research and Development Associate Mould Tech Systems zsolt.bottyan@mouldtech.hu orcid.org/0000-0003-0729-2774

Gajdos Máté százados, tanársegéd Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék gajdos.mate@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-3572-4637	Máté Gajdos Captain, Assistant Lecturer University of Public Service Faculty of Military Sciences and Officer Training Aerospace Controller and Pilot Training Department gajdos.mate@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-3572-4637
Fekete Csaba alezredes, tanársegéd Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék fekete.csaba@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-1181-8276	Csaba Fekete Lieutenant Colonel, Assistant Lecturer University of Public Service Faculty of Military Sciences and Officer Training Aerospace Controller and Pilot Training Department fekete.csaba@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-1181-8276

„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
34. évfolyam (2022) 3. szám 167–180. • DOI: 10.32560/rk.2022.3.11

László Szilvássy

Why Does the Attack Helicopter Have More Survival Ability than the Armed Utility Helicopter?

The author highlights the difference between attack and armed utility helicopters and supports this with professional arguments. He also presents the most common weapon systems of combat helicopters. Points out that an armed transport helicopter or multipurpose helicopter cannot substitute attack helicopters at all.

Keywords: *attack, utility, helicopter, multipurpose helicopter, weapon systems, active, passive defence*

1. Introduction

I have been following the modernisation of combat helicopters for years [12], [18], [20]. I have been and will be dealing with onboard weapons in several of my writings [13], [15], [16], [31]. I have expressed my opinion, my research results, and I have even written my doctoral dissertation [1], [2] on this topic. In my previous studies and articles, I examined several combat helicopters, including the Mi-24 [3], [4], the AH-64 [5], the Mi-28 [7], the Ka-50/52 [17] and A129 [14]. I wrote about their development [8], their applicability [6]. I ranked their efficiency requirements [10], evaluated their weapons on board [13], [15], [16], [19], [21].



Figure 1.
An armed transport helicopter [40] *is not an attack helicopter* [11]

In my doctoral dissertation [1], I developed a parameterised comparative procedure with which I compared the combat helicopters objectively in terms of onboard weapons. I have also published this outside my dissertation [9], [11]. I have not stopped my research on aircraft

weapons since then. I regularly follow published writings in this regard, among which, combat helicopters will always be my first priority.

2. Helicopters

With the helicopters, the function dictates capability. Helicopters in the armed forces perform a variety of roles, for example:

- attack;
- search and rescue;
- transport;
- observation;
- utility.

In this very paper, I intend to introduce and highlight the differences between utility and attack helicopters.

3. Attack helicopter

To understand the differences, we need to define the two helicopter versions.

Definition from Wikipedia: "An attack helicopter is an armed helicopter with the primary role of an attack aircraft, with the capability of engaging targets on the ground, such as enemy infantry and armoured fighting vehicles. Due to their heavy armament, they are sometimes called helicopter gunships" [41].

Lt. Col. János Juhász – who was Head of Operations and Training of the Hungarian Defence Forces 87th Bakony Helicopter Regiment (Szentkirályszabadja) – said:

> A high-speed, highly manoeuvrable, versatile, highly-destructive, weapon-carrying (anti-tank) device, or "aerial artillery" [9] (translation of the author).

The way I stated in my thesis:

> Attack helicopter: is an aerodynamic, rotary-wing, highly manoeuvrable aircraft equipped with guided and unguided missiles to break up enemy armoured formations. With its development, its tasks can include the escort of unarmed transport and search and rescue helicopter, direct attacks against ground-based forces, air combat, primarily against low-speed air targets but occasionally against fighter jets. It has adequate fire, missile and bombing armament, active and passive defence systems, armour, and a high degree of survival capability reserve to perform all of these tasks [1], [41] (translation of the author).

Through the research, I found the following evidence for the ability to fight air combat: in 1968, the Americans conducted a pilot exercise to execute the air combat mentioned in the definition, involving an AH-1G "Cobra", an F-4 "Phantom" and an F-8 "Crusader". Both air combats ended with "Cobra's" victory. At another practice, a combat helicopter fired a target

aircraft flying at 800 km/h using a "Sidewinder" missile. We also found examples of real air combat when a Mi-24P helicopter defeated a "Phantom" in the Iraq–Iran war. The above-mentioned cases are good examples of the ability of combat helicopters fighting against air target, that does not necessarily require the construction of special fighter helicopters, only the existing weaponry is to be upgraded with modern air-to-air missiles [1]. These air-to-air missiles have already appeared on combat helicopters.

3.1. Requirements for attack helicopters

Throughout the wars and armed conflicts of the last century, weapon manufacturers gained such experience that cannot be obtained within laboratory environment without additional difficulties. The development of combat helicopters is dated to the second half of the 20th century. Based on the experience from the Korean and Vietnam war, a set of standardised requirements for combat helicopters had been developed.

Based on the experience of wars and armed conflicts, the requirements of advanced combat helicopters include:

- manoeuvrability, including air combat capability, predominantly against a combat helicopter and, if necessary, a fixed-wing combat aircraft;
- the ability to use well-variable different weapon systems to perform a wide range of tasks;
- advanced avionics features such as navigation, targeting-navigation, communication, self-defence systems):
  - complex self-defence properties;
  - passive armour protection;
  - stealth properties:
    - special painting;
    - special design:
      - concealed weapons;
      - retractable landing gear [Based on the experience of the Vietnam War, a retractable landing gear appeared as a requirement. Today, mostly fixed landing gear is used on most combat helicopters, although there is an exception here as well [27]. The RAH-66 was designed with a retractable chassis in the LHX[1] program, but it was cleared. Only Mi-24 has retractable landing gear (author's note).];
  - active protection:
    - flare (countermeasure);
    - intercept receiver;
    - radar jamming equipment.

From the listed design features one or even quite a few of them forming a complex system are not yet sufficient for a combat helicopter to fully meet the highest requirements. It is also essential that the built-in active and passive defences, armaments, and all other systems

[1] Light Helicopter Experimental.

reliably serve the purpose for what the combat helicopter is designed. Even if a helicopter has high-precision weapons, if its other systems, equipment, or structural design, e.g. the impact resistance of the rotor blades or the armour protection of the equipment are not suitable, they do not allow it to remain in the air for an extended period of time.

As stated above, we can write the general efficiency criteria for a combat helicopter:

$$W = \prod_{i=1}^{n} P_i \tag{1}$$

where:

- W – efficiency indicator of a combat helicopter;
- P_i – elementary conditional probabilities, which determine the reliability of individual equipment, systems, task execution, target detection.

If we replace the elementary conditional probability (P_i) in the above context with the most critical indicators for the successful task execution, we get the following relation:

$$W = P_{im} \cdot P_s \cdot P_{tr} \tag{2}$$

where:

- P_{im} – impact ability (probability of destroying an enemy target);
- P_s – survival ability (probability of effective self-defence);
- P_{tr} – technical reliability (probability of fault-free operation).

The *impact ability* depends on the probability of target reconnaissance, eliminate surface targets and successful air combat with enemy helicopters, as well as the tactical characteristics of the onboard weapons, the effectiveness of the weapon control system, and the training and psychological–physical condition of the crew.

Survival ability (probability of effective self-defence) depends on the effectiveness of passive and active self-defence systems, stealth characteristics and aeronautical tactical procedures.

Technical reliability "the ability of the structure (system, equipment, component) or even the entire operating system of a military equipment to perform the required function while maintaining the values of specified performance characteristics during operation, maintenance, repair, storage and within the prescribed limits, in accordance with the conditions of the pre-defined modes of transport" 0 (translation of the author) depends on operability, technology, diagnostics, repairability, MTTR (Mean Time To Repair) and MTBF (Mean Time Between Failure).

The listed three probability values can be broken down further, but this does not affect the fact that the efficiency of the combat helicopter is directly proportional to the probability of technical reliability, survival and destruction of the target. By highlighting any of the features and increasing the value with a significant investment, the overall efficiency ratio will not increase to such an extent that it is decisive. It is more important to raise all three to a sufficiently high level.

Many of these features may be available to multi-task helicopters, e.g. Mi-172, MD-500/530, BO-105/108, SA-542M/L, NH-90. However, with active and passive defence features, only combat helicopters are designed and built specifically for the combat task, e.g. AH-1, Mi-24,

Mi-28, A129 (T129), AH-64, Ka-50, Ka-52, Tiger, AH-2. The necessity of the complex self-defence features were highlighted by the experience of local wars in the 1970s.

Using a practical calculation, we examine how much a change in any of the above three probability values affects a helicopter's efficiency index. The following values are substituted in Equation (2) for illustration only.

Table 1.
Probability parameters of two types of helicopter (compiled by the author)

	Attack helicopter	**Utility helicopter**
P_i	0.85	0.85
P_s	**0.85**	**0.65**
P_{tr}	0.85	0.85

In our example there is no significant difference regarding the Ps – survival ability in favour of combat helicopter. In reality, there are much more significant differences. For example, according to a previous analysis, the combat potential of the AH-64 "Apache" compared to the AH-1 "Cobra" is "1.8" in troop air support and "3" in combat against tanks [34]. If I want to express this in numbers, the Pi strike capability must be quantified. Assume the following: with air defence countermeasures, assume the impact measurement capability of AH-1 to be 0.2, in which case the same parameter of AH-64 is 0.6. This difference means that at one point there is a 20% chance that the helicopter will destroy the target, in the other case there is a 60% chance.

Back to our example. There is a 85% probability that the combat helicopter will destroy the target, survive the mission and there is no malfunction. In this regard, the efficiency indicator of a combat helicopter is:

$$W_{ah} = P_i \cdot P_s \cdot P_{tr} = 0.85 \cdot 0.85 \cdot 0.85 = 0.614$$

the same for a utility helicopter:

$$W_{uh} = P_i \cdot P_s \cdot P_{tr} = 0.85 \cdot 0.65 \cdot 0.85 = 0.470$$

This is a significant difference.

The LHX program, established in 1983, was the most comprehensive and detailed research to develop the requirements for combat helicopters in the 1990s. All U.S. combat helicopter companies participated in the program. The results of the LHX program were used in the development of the Eurocopter and the A129. In addition to that, it is not difficult to discover the same segment criteria in relation with the Mi-28 and also the Kamov Ka-50 helicopters [29].

If we assume that we examine the research results and development directions of the United States and Russia, we can conclude that the combat helicopters to be commissioned after the turn of the millennium must have the characteristics listed in the following points (these properties are undergoing a significant reassessment today, especially in terms of flight speed) 0.

3.2. Manoeuvre features

Flight in the very low altitude:

- $v_{y,max} \approx 10$ m/s vertical speed ability;
- $v_{cs} = 260–280$ km/h cruising speed;
- $v_{max} = 300–310$ km/h maximum speed;
- $v_{h,max} = 40–60$ km/h backward speed;
- $v_{s,max} = 30–50$ km/h sideway speed.

The maximum altitude available should be around 4,500–6,000 m. The helicopter must be capable of performing all aerobatic elements in the overload range ny = (+3) – (–0.5) and for intensive pedal turns. Reach 700 to 800 km with regular refuelling, 1,200 to 1,500 km with the spare tank(s), with a flight time of 2.5 to 3.5 hours. Mid-air refuelling capability is desirable but not yet a general requirement [26].

3.3. Weapon characteristics

The helicopter must have a permanent, turret-mounted cannon. The use of a machine gun against today's modern armoured devices is not effective enough. (The comparative calculation of the armour penetration of machine guns and aircraft cannon can be found in [15].) The rotation of the weapon turret should be between ±90° horizontally and between +10 and –40° vertically. The ammunition of the machine gun or cannon is at least 500 pieces, but it is more desirable to have 1,000 rounds, for machine guns this amount is to be doubled.

Regarding the unguided missiles against the various ground targets, a relatively large amount of 70–80 mm rockets are required for appropriate suppression, which can usually be fired from 20–30 pieces blocks [30], [32].

Against ground targets the use of guided missiles (AGM), varying a wide range of passive and active systems (such as: passive infrared, semi-active laser, semi-active radio, and active self-guidance) is also recommended. It is important because, depending on the task and the particular combat circumstances, it should be possible to select the most appropriate weapon. For example, when using camouflage smoke, a semi-active radio, or an active radio self-guided missile is best suited to destroy the target. However, it cannot be used in case of broadband, active radio interference. With regard of guided-missile weapons, the application of air combat missiles is necessary. In this case, just "Fire and Forget!" instruments should be taken into consideration. It is an essential feature because the detection and identification time of enemy helicopters is approximately 56 s at a 6 km (Figure 2) distance. The flight time of a near-air combat missile is 6–12 s at this distance, which means that in the case of a semi-active approach, the detection probability of the carrier/launch helicopter is close to one. The probability of destruction is close to the probability of the destruction capability of the used device [18], [31].

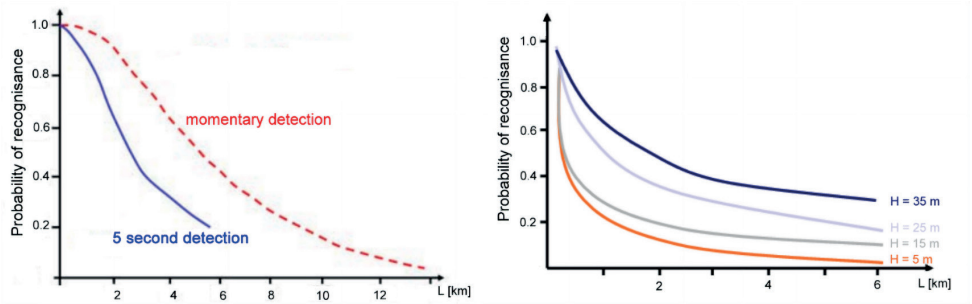


Figure 2.
Probability of visual detection as a function of distance [14], [18]

It is vital, that the helicopter's onboard aiming-navigation complex ensures the usability of the helicopter itself and the applicability of the onboard weapons within all weather conditions and 24 hours per day. For this reason, it is required to have such a radar which operates in a millimetre waveband, of course with a mapping mode, a passive sensor in the infrared range – a thermal retractor and/or a thermal imaging camera – and a laser rangefinder target marker. It is not necessary to have a TV camera operating in the visible EMH range. The location of the optical systems is most expedient on the top of the cockpit or rotor mast because this way the helicopter can perform reconnaissance and guidance from the cover. The helicopter has to cooperate with other helicopters in bond. It means that in case of efficient target distribution or the use of semi-active missiles, the helicopters in the same formation must communicate with each other via an automatic radio channel to achieve mutual targeting. It should not be ignored that regularisation of one so-called air control point per combat helicopter section can significantly increase the efficiency of helicopters. It is not closely related to the modernisation of combat helicopters, but air-to-ground integration and interoperability – for example with a ground laser marker – requires the aircraft's compatibility with other instruments. As it was previously stated, it is useful if the helicopter is suitable for bombing as well.

3.4. Passive and active self-defence

Combat helicopters perform their flight during combat operations at low altitudes, depending on the task, usually at the highest possible speed. It is necessary for several reasons. On the one hand, the higher the horizontal velocity of the helicopter is, the more accurately the unguided weapons can be used, as they are not affected to such an extent by the vibration of the helicopter. On the other hand, a helicopter is more difficult to detect when flying at low altitudes and high speed. Radars detect low flying helicopters only with difficulties. In addition to that, enemy air defence could spot and target swift moving, pop-up and disappearing helicopters only with low success rates.

Practical experience shows that 2 km to 3 km is the distance at which the probability of detecting a helicopter is sufficiently low. However, onboard unguided weapons and machine guns are used effectively from a distance between 1.5 km to 2 km. Therefore, the existence

of guided armament is essential; due to their launching distance, it is usually about 6–7 km, and in some cases it can be up to 8 km to 10 km. The helicopter shall be detected by visual, acoustic, infrared and radio wave reconnaissance means. That is why, while designing a modern combat helicopter, efforts must be made to reduce detectability and to increase the so-called stealth properties. It can be achieved with the following design and structural solutions, thus reducing the detectability of the helicopter:

- the exhaust gases of the engines must be effectively mixed with the surrounding colder air, thereby reducing the infrared radiation of the helicopter, which dramatically affects the detection distance;
- the helicopter airframe must comply with the stealth technology requirements, using a lot of composite materials, coatings and special paint that absorbs and scatters radio waves. To improve the overall stealth performance, the engine air intakes also need special design, the rotor blades should be made of composite, the rotor head should have a special coating or casing. Electromagnetic radiation of electrical equipment must be minimised;
- to reduce acoustic detectability, it would be very practical to use a design with a larger number of blades and a low-speed rotor, in case of the tail rotor a larger number of blades – often four blades, X arrangement – or "fenestron" (NOTAR cannot be considered in this case due to its operation, because in the event of a projectile hit, its efficiency may significantly be reduced, which may even lead to loss of controllability).
- targeting-navigation and communication equipment should emit electromagnetic waves only for the required period and with necessary energy;
- to minimise visual visibility, the use of camouflage paint appropriate to the geographical area and the season should be the most suitable, as well as cockpit glazing, minimal reflectivity and matt colouring; the silhouette of the machine must have the smallest geometric size and less sharp contours 0.

The survival of a helicopter – primarily combat survival – depends mainly on the design of the entire aircraft structure, mainly the airframe. It requires the duplication or shielding of vital elements as well as adequate armour protection. The location of the different built-in equipment should be well-planned and taken into a careful consideration. It is advisable that sensitive items and vital mechanical and avionics equipment should be placed toward the centre of the fuselage, and all the rest should be implemented, creating layers, starting with the important ones in the inner layer and the less important or duplicated ones in the outer layer. It is necessary, because it is impossible to armour the entire helicopter due to mass and efficiency reasons. However, in areas where armour protection is provided, the level of protection must meet the following general requirements:

- in protected zones, the armour must withstand the direct impact of a 23 mm aircraft cannon ammunition;
- cockpit armour glazing must withstand handguns, the direct impact of a 12.7 mm to 14.5 mm projectiles and shreds of 23 mm aircraft cannon projectiles;
- the positioning (mutual position) of the engines must be such that they cannot be rendered inoperable by a single hit;

- the rotor blades should also have high impact resistance (see Figure 3), which is best matched by fibre-reinforced composite materials (it is also beneficial regarding the reflection of radio waves, reducing the effective reflecting surface of the helicopter).

The active and passive self-defence of today's state-of-the-art helicopters – not just combat helicopters – ensures the jamming immunity of avionics devices, especially those belonging to the communication and aiming-navigation complex. It requires various irradiation signalling devices, the more advanced ones can alert the helicopter to the level of danger of the device, depending on the wavelength and nature of the EMF emitted by the enemy's devices. For example, a locator in a reconnaissance mode is a less dangerous level than the same locator in a target tracking or rocket launch mode. If necessary, it must be possible to carry out some countermeasures, e.g. infrared traps or dipoles.

Survival ability also includes fire and explosion prevention. The helicopter must have an automatic fire extinguisher installed in the engine bay. It is advisable if the overpressure system of the fuel tanks is operated with inert gas (CO2) to avoid an explosion, or if the tanks made of some flexible, possibly "sel-sealing" material, which minimises fuel leakage in case of a hit.



Figure 3.
The two titanium-headed rotor blades of the AH-64 remained operational for five hours after the hit [14]

Both the engine and the avionics equipment of the helicopter shall be prepared structurally for operation in different geographical locations and in all weather conditions. Accordingly, its engine must have dust protection and capability to provide enough power to continue flying and land safely if one of the engines becomes inoperable. It follows that, from a safety point of view, the two-engine version is preferred. For the survival of both the helicopter and the crew, the helicopter cabin must be pressurised to protect against ABC (Atom, Biological and Chemical weapons) weapons, which of course goes hand in hand with the design and air conditioning of the pressurised cockpit, which increases staff comfort and thus significantly affects combat effectiveness.

Passive protection of a combat helicopter also includes enduring forced landings. Although in many cases, we cannot talk about landing, but rather about reducing the consequences of an impact. The helicopter landing gear shall be designed to withstand a collision at a speed of 5 m/s to 6 m/s without destruction. The long-stroke, levered, non-retractable chassis is best suited for this. In addition to the special design of the chassis, it is also important for the staff to have special energy-absorbing seats and to provide the lower part of the fuselage with energy-absorbing zones, ensuring the survival of the crew in the event of a helicopter impact at speeds up to 12 m/s.

Passive protection defends the helicopter in case of a hit and ensures survival of the crew. It also reduces helicopter detectability. Moreover, it influences the geometry and other design elements of the helicopter. Figure 4 shows the detectability of certain types of helicopters with different reconnaissance devices, including human senses 0.

Figure 4 demonstrates the objective of the American LHX program. The creation of a modern, hard-to-detect helicopter that surpasses the previous ones in terms of parameters and thus gaining a potential advantage over them. In the overall comparison, the RAH-66 "Comanche" helicopter represents the detectability base unit regarding the types of reconnaissance listed below:

- radar: 10 GHz frequency range, the helicopter approaches directly;
- infrared radar: based on the infrared target coordinator of the Stinger missile, examining the side view silhouette of the helicopter and neglecting the radiation of the Sun;
- acoustic: with moderate ambient noise, the helicopter approaches directly;
- visual: with the naked eye, terrain background, the helicopter approaches directly.

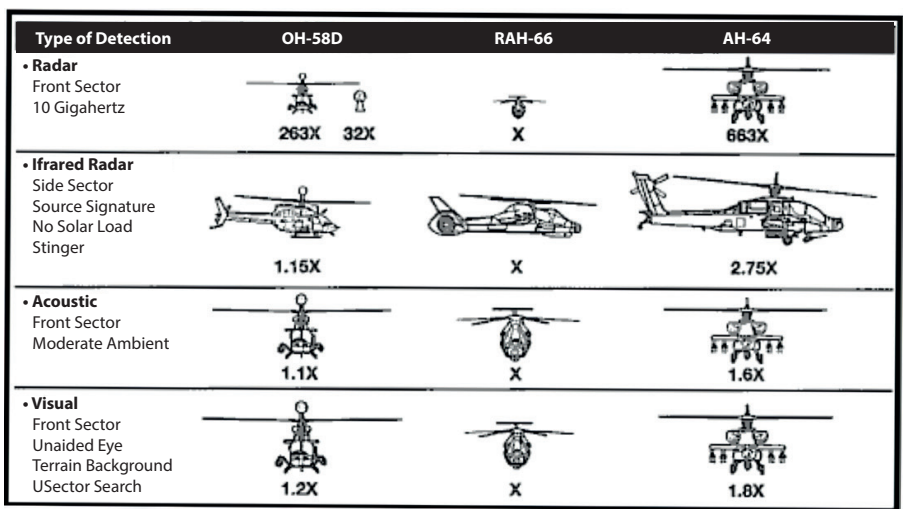


Figure 4.
The capability of RAH-66 [7], [18]

According to Figure 4, the RAH-66 helicopter far surpassed the types currently in operation. No similar comparison can be found for other types of helicopters. There may be several reasons for this. On the one hand, it is a closely guarded secret of the manufacturers, because, for example, they would not want to reveal the potentially worse values, on the other hand, they have not performed similar experiments and thus have no information. Knowing the geometric size of the Mi-28 and Mi-24 combat helicopters and the camouflage paints used during manufacture, it is likely that the reference numbers would be similar or even higher than e.g. of the AH-64 [1].

4. Conclusion

Based on the performed analyses, my conclusion is that the presence of onboard weapon system of combat helicopters is essential because it can effectively attack both ground and air targets and can be used throughout self-defence as well. It can also be stated that their armour-piercing capability is limited, so it is necessary to use unguided or guided missiles with higher armour-piercing capabilities.

Given the requirements of the age, a combat helicopter must be able to defend itself effectively, and for this, the availability of close range, air-to-air missiles are essential. Besides, a combat helicopter can have the benefit of being able to use an air-to-ground missile against medium or long-range surface targets.

The analyses also highlight that armed utility helicopters cannot replace attack helicopters, due to the fact that they do not have the necessary armour protection and they are not able to effectively fight air combat against other aircraft.

References

[1] L. W. Grau and J. H. Adams III, 'Air Defense with an Attitude: Helicopter v. Helicopter. Combat'. *Military Review,* January–February 2003. Online: https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a435109.pdf

[2] T. Husseini, 'Advanced Military Helicopters: How Function Dictates Capability'. *Airforce Technology,* 17 April 2019. Online: www.airforce-technology.com/features/advanced-military-helicopters/

[3] B. Békési and L. Szilvássy, 'Üzemeltethetőség'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 13, no 2. pp. 115–122. 2001.

[4] Global Security.org, AGM-114 Hellfire. Online: www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/agm-114.htm

[5] Global Security.org, Hydra-70 Rocket System. Online: www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/hydra-70.htm

[6] Global Security.org, RAH-66 Comanche. Online: www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/rah-66.htm

[7] Global Security.org, RAH-66 Comanche capabilities. Online: www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/rah-66-capabilities.htm

[8] Helicopter Warfare. Online: www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/fs32bishelicopter.pdf
[9] J. Juhász, 'A harci helikopterek feladatrendszere és a velük szemben támasztott követelmények a NATO-ban, „A Mi-24 harci helikopterek korszerűsítése" tudományos konferencia előadása'. *Katonai Logisztika,* Vol. 8, no 2. pp. 133–147. 2000.
[10] L. Kormos, 'A helikopterek katonai alkalmazásának tapasztalatai'. *Hadtudomány,* Vol. 8, no 3. 1998. Online: www.zmne.hu/kulso/mhtt/hadtudomany/1998/ht-1998-3-7.html
[11] Live Journal, Боевой Российский вертолет Ми-35М 'летающий танк' дебютирует в Сирийской войне. Online: https://vseneobichnoe.livejournal.com/4144843.html
[12] Gy. Óvári, 'A Stealth repülőgépek szerkezeti kialakításának néhány kérdése'. *Haditechnika,* Vol. 25, no 4. pp. 3–7. 1991.
[13] Gy. Óvári, 'Autorotálni, katapultálni vagy lezuhanni?' *Haditechnika,* Vol. 26, no 4. pp. 2–9. 1992.
[14] Gy. Óvári, 'Biztonság- és repüléstechnikai megoldások katonai helikopterek harci túlélőképességének javítására'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 17, no 2. pp. 1–14. 2005. Online: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2005_cikkek/ovari_gyula.pdf
[15] Gy. Óvári, 'Korszerű csapásmérő helikopterek harcászat-technikai jellemzői, alkalmazási lehetőségei'. *Katonai Logisztika,* Vol. 8, no 2. pp. 147–180. 2000.
[16] Rafael – Lockheed Martin, Python 4 Short Range Air-to-air missile (CD2000).
[17] L. Szilvássy, A harci helikopterek fegyverrendszerének modernizációs lehetőségei a Magyar Honvédségben. *MTA DAB Műszaki Szakbizottsága, Elektronikus Műszaki Füzetek,* no 10. 2011. Online: http://store1.digitalcity.eu.com/store/clients/release/musz_fuz_jo_04.pdf
[18] L. Szilvássy, *A harci helikopterek fegyverrendszerének modernizációs lehetőségei a Magyar Honvédségben.* Budapest, ZMNE, 2008. Online: http://ludita.uni-nke.hu/repozitorium/bitstream/handle/11410/9912/Teljes%20szöveg%21?sequence=1&isAllowed=y
[19] L. Szilvássy, 'A harci helikopterek fejlődése a hőskortól napjainkig'. *Szolnoki Tudományos Közlemények,* Vol. 11. 2007. Online: www.sziszilaci.hu/pub/2007-23_A_HH_fejlodese.pdf
[20] L. Szilvássy, 'A harci helikopterek kiválasztása során alkalmazott paraméterezett összehasonlító eljárás'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 19, no 2. 2007. Online: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2007_cikkek/szilvassy_laszlo_parmeterezett.pdf
[21] L. Szilvássy, 'AH-64 Apache harci helikopter'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 18, no 2. p. 8. 2006. Online: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2006_cikkek/szilvassy_laszlo_ah64.pdf
[22] L. Szilvássy, 'Aviation Antitank Missile AT-16 "Scallion" (9A4172 "Vikhr")'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 26, no 3. pp. 28–33. 2014. Online: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2014_3/2014-3-03-0178_Szilvassy_Laszlo.pdf
[23] L. Szilvássy, 'Az A129 (T129) harci helikopter'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 21, no 2. 2009. Online: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2009_cikkek/Szilvassy_Laszlo.pdf

[24] L. Szilvássy, 'Az Airbus H145M helikopter fegyverei I – Nemirányítható rakéta rendszer'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 31, no 2. pp. 15–29. 2019. Online: https://doi.org/10.32560/rk.2019.2.2
[25] L. Szilvássy, 'Harci helikopterek modernizációs kérdései'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 25, no 1. pp. 236–262. 2013. Online: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2013_1/2013-1-20-Szilvassy_Laszlo.pdf
[26] L. Szilvássy, 'Harci helikopterek fedélzeti tüzér fegyverei'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 20, no 2. 2008. Online: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2008_cikkek/Szilvassy_Laszlo.pdf
[27] L. Szilvássy, 'Harci helikopterek fegyverei I. – Tűzfegyverek és nemirányítható rakéták'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 21, no 4. 2009. Online: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2009_4/2009_4_Szilvassy_Laszlo.html
[28] L. Szilvássy, 'Harci helikopterek fegyverei II. – Irányítható rakétafegyverzet'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 22, no 1. 2010. Online: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2010_1/2010_1_Szilvassy_Laszlo.html
[29] L. Szilvássy, 'Harci helikopterek hatékonysági követelményeinek rangsorolása'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 19, no 2. 2007. Online: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2007_cikkek/szilvassy_laszlo_hatekonysagi_rangsor.pdf
[30] L. Szilvássy, 'Harci helikopterek modernizációs lehetőségei a magyar honvédségben'. *Szolnoki Tudományos Közlemények,* Vol. 12. 2008. Online: www.sziszilaci.hu/pub/2008-29_HH_modernizacios_lehetosegei.pdf
[31] L. Szilvássy, 'Harci vs. felfegyverzett szállító helikopter'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 29, no 3. pp. 203–216. 2017. Online: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_3/2017-3-16-0444_Szilvassy_Laszlo.pdf
[32] L. Szilvássy, 'Helikopterek összehasonlítása – Paraméterezett összehasonlító eljárás'. *Nemzetvédelmi Egyetemi Közlemények,* Vol. 11, no 1. pp. 44–53. 2007. Online: www.sziszilaci.hu/pub/2007-27_HH_osszehasonlitasa.pdf
[33] L. Szilvássy, 'Ka-52 harci helikopter'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 24, no 1. pp. 87–92. 2012. Online: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2012_1/Szilvassy_Laszlo_Ka-52.pdf
[34] L. Szilvássy, 'Katonai helikopterek alkalmazási lehetőségei'. *Szolnoki Tudományos Közlemények,* Vol. 10, Cd publication. 2006. Online: www.sziszilaci.hu/pub/2006-20_Kat_hel_alkalm_lehet.pdf
[35] L. Szilvássy, 'Mi-24VM'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 15, no 2. 2003. Online: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2003_cikkek/szilvassy_laszlo.pdf
[36] L. Szilvássy, 'Mi-28 Havoc harci helikopter'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 18, no 2. 2006. Online: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2006_cikkek/szilvassy_laszlo_mi28.pdf
[37] L. Szilvássy and I. Papp, 'A Magyar Honvédség helikoptereinek modernizációs kérdései'. *Economica,* Vol. 8, no 4/2. pp. 295–304. 2015. Online: www.sziszilaci.hu/pub/2015-44-economica_VIII_2015_4_per_2_rovid.pdf
[38] L. Szilvássy, 'Repülőfedélzeti irányítható páncéltörő rakéták és azok összehasonlítása'. *Repüléstudományi Szemelvények,* pp. 151–176. 2016. Online: www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem-2016.pdf

[39] L. Szilvássy and L. Szabó, 'A Mi-24VM harci helikopter'. *Repüléstudományi Közlemények,* Vol. 18, no 1. pp. 73–78. 2006. Online: www.sziszilaci.hu/pub/2006-18-SzL-SzL-A_Mi-24VM_HH.pdf
[40] L. Szilvássy, *Hadtudományi Lexikon Új kötet*: célkoordinátor; gépágyú; géppuska (repülőfedélzeti); harci helikopter; HMD; HMS; HUD; időzíthető gyújtó; irányítható rakéta; kaliber; kollimátoros célzókészülék; közelségi gyújtó; kumulatív hatás; légibomba; légiharc; lőfegyver; lökéshullám; nemirányítható rakéta; optikai célzókészülék; optikai gyújtó; óraműves gyújtó; önirányítás; piezoelektromos gyújtó, piezogyújtó; rádiógyújtó; rakéta; rakéta harcirész; rakétafegyver; rakétavető; reflexüveg; robbanóanyag; sisakmegjelenítő; sisakcélzó; távirányítás; tüzérségi gyújtó. pp. 115–1112. Budapest, Dialóg Campus, 2019.
[41] Wikipedia, Attack helicopter. Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Attack_helicopter
[42] Wikipedia, Mil Mi-17: A Mi-171E helicopter of the Iraqi Army Aviation Command. Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Mil_Mi-17#/media/File:Iraqi_Mi-171E_helicopter.jpg
[43] Wikipedia, S-8 rocket. Online: https://en.wikipedia.org/wiki/S-8_rocket
[44] Wikipedia, Utility helicopter. Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Utility_helicopter

Miért rendelkezik a támadó helikopter nagyobb túlélési képességgel, mint a felfegyverzett szállító/többfeladatú helikopter?

A szerző kiemeli a különbséget a harci és a felfegyverzett segédhelikopterek között, és ezt szakmai érvekkel támasztja alá. Bemutatja a harci helikopterek leggyakoribb fegyverrendszerét is. Rámutat, hogy egy felfegyverzett szállítóhelikopter vagy többcélú helikopter egyáltalán nem helyettesítheti a harci helikoptereket.

Kulcsszavak: *harci, támadó-, szállító-, többfeladatú helikopter, fegyverrendszer, aktív, passzív védelem*

Dr. Szilvássy László
ezredes, 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
Colonel, 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
34. évfolyam (2022) 3. szám 181–202. • DOI: 10.32560/rk.2022.3.12

Csurgai József

Drónra szerelhető radiológiai modul fejlesztési koncepció, hardveres felépítés és nukleáris méréstechnikai alapok

Különböző célú és rendeltetésű, merev- vagy forgószárnyú drónokra kialakított szenzoros felépítmények széles skálája valósult már meg, vagy áll megvalósítás alatt. A szerző egy cikk keretében ízelítőt szeretne nyújtani a jelen TKP2021-NVA-16 pályázat keretében kialakítandó légi sugárfelderítő, drónra szerelhető szenzormodul fejlesztéséről.

Jelen cikk röviden áttekinti az alkalmazás műveleti kritériumait, a szenzormodul fejlesztésének előzményeit, a K&F méréstechnikai alapjait, kialakítás alatt álló radioszenzoros és általános rendeltetésű érzékelő rendszerét, a hordozóeszköz lehetséges repülési magasságának és sebességének tervezési alapjait.

Kulcsszavak: *légi sugárfelderítés, radioszenzoros modul, sugárhelyzet-felmérés*

1. Bevezetés

A környezetünk radioaktív sugárzásának mérése többcélú, szerteágazó feladat. Általában arra gondolunk, amit leggyakrabban látunk, hogy telepített monitoringrendszer földközeli meteorológiai adatokat mér, és mellesleg a környezeti gamma-háttérsugárzás adatait is gyűjti és továbbítja. Esetleg az is eszünkbe jut, hogy voltak a világban olyan nukleáris balesetek, amelyek kapcsán a környezetbe jutott radioaktív szennyeződés mértékét is mérésekkel határozták meg. Valójában a környezeti radioaktív sugárzás mérése bonyolult feladatrendszer, összetett monitoring, amely kiterjed a mindenfajta radioaktív sugárzás mérésére, magában foglalja az in situ pontmérésektől kezdve a folyamatos mintavételes méréseken keresztül a különböző környezeti mintavételi eljárásokat (dörzsminta, térfogati minta: levegő, víz, talaj, növényzet, iszap stb.) és a laboratóriumi mintafeldolgozást, valamint energia-, vagyis izotópszelektív spektrometriás méréseket is. Ezenkívül a mérések, vagyis ezek monitoringrendszerbe foglalása történhet környezet-ellenőrzési, katasztrófavédelmi (nukleárisbaleset-elhárítási), sőt kimondottan katonai célból is. Az in situ mérések lehetnek helyszíni, lokális jellegűek (általában ezt gyalogos felderítésnek hívjuk, mivel leggyakrabban kézi műszerrel, gyalogos módszerrel végzik), vagy valamilyen járművel útvonal- vagy területfelderítés érdekében végeznek. A járművel végzett területfelderítésnek az utóbbi három-négy évtizedben legperspektivikusabb formája, ha ezt a levegőből végzik, vagyis légi sugárfelderítést végeznek.

Nos, eljutottunk ahhoz a ponthoz, amellyel ebben a cikkben a szerző szeretne foglalkozni. Mondjuk úgy, hogy alapvetően a légi sugárfelderítéssel mint felderítési módszerrel, de ezt speciálisan repülő, pontosabban forgószárnyú, kopter típusú drónra szerelt mérőrendszerrel kívánja megvalósítani. Igen, a drónra szerelt szenzorokkal való megfigyelés, mérés az utóbbi két évtized slágertémája, és most a szerző is akar ezen a csonton rágódni egy kicsit.

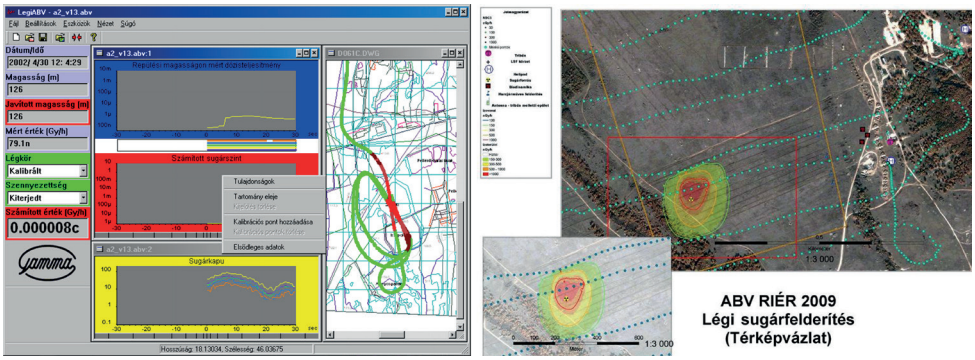
Elsősorban röviden a légi sugárfelderítés technikájára szánunk néhány szót, majd megnézzük, hogyan lehet ezt a méréstechnikát egy repülő drónra felrakni. Végül, persze, kíváncsiak vagyunk rá, vajon milyen lesz a várható eredmény, milyen tartalommal kerül emészthető formában az asztalra.

Még egy fontos megjegyzés: a szerző fenn tartja magának a jogot, hogy a cikk tárgyát képező, drónra szerelhető radiológiai modult helyenként radioszenzoros modulnak, radioszenzor-modulnak, radiomodulnak, esetleg radiológiai modulnak hívja. Ez ne tévessze meg a kedves Olvasót, minden esetben ugyanarról lesz szó.

2. Szakirodalmi áttekintés

A légi sugárfelderítés módszertanával, ahogyan a bevezetőben is említettük, az utóbbi évtizedekben is behatóan foglalkoztak. A teljesség igénye nélkül, néhány állomást említünk csak, amelyet a szerző fontosnak ítélt. Az első, tudományos értékű alapdokumentumnak tekinthető műnek a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség gondozásában megjelent ajánlásokat tekinthetjük [1], [2]. Ez felöleli a légi sugárfelderítés teljes feladat- és műszaki-tudományos problémarendszerét, három évtized távlatából is nagyon jól alkalmazható módszertant és méréstechnikai sajátosságokat tartalmaz. Máig aktuális például a különböző magasságból mért dózisteljesítménynek a földi, 1 m-es referenciaértékhez való átszámítási módszere, a magasságkorrekciója, illetve a kozmikus háttér-kompenzációs kalibrációs technikája.

Természetesen a hazai fejlesztések sem maradtak el. Sőt, a kétezres évek legelején, konkrétan 2001–2002-ben fejlesztették ki a Magyar Honvédségben majd két évtizedig szolgálatot teljesítő 2 db légi sugárfelderítő konténert (LSF-konténer), amelynek műszaki fejlesztésében, kalibrációjában, tesztjeiben a szerző tevékeny részt vállalt [3], [4]. Itt a hordozó repülőeszköz a MI-24D harci helikopter volt, amely szárnyalatti tartóin hordozta a felderítő konténert. Bár a konténer műszerezettsége korszerű volt, a NATO más fejlett tagállamaiban alkalmazott hasonló rendeltetésű eszközök műszerezettségénél semmiben nem volt jobb. Világszínvonalúvá az eszközt az adatfeldolgozási technikája tette. A konténer mérési adatait megjelenítő szoftver mind offline, mind online adatforgalom esetén teljeskörűen használta a DTA-50 térképészeti adatbázist, a dinamikus magasságkorrekciót GPS, barometrikus magasságmérő műszerek adataival és a DDM-50 digitális domborzati modell használatával végezte. Az ehhez alkalmazott eljárásokat és szoftveres kódokat egy, akkoriban párhuzamosan futó kutatással kapcsolatban fejlesztette ki a szerző, amit szennyező anyagok levegőben való terjedésének numerikus szimulációjához alkalmaztak [5], [6]. Ezenkívül, a valós sugárhelyzetet az ArcInfo/ArcView rendszerébe konvertálta a fejlesztők által írt szoftver.



1. ábra
Az LSF-konténer mérési adatokat megjelenítő szoftvere a DTA-50 adatbázist használó modullal, illetve adatfeldolgozás után a valós sugárhelyzet megjelenítése ArcInfo rendszerben [a szerző]

A konténertesztek során kikristályosodott az a módszertan, amely lehetőséget adott három fő pontban megfogalmazott képesség elérésére:

- a terepszennyezés felderítése. A nagy kiterjedésű sugárszennyezés feltérképezése során számítással meg lehet határozni az egyes területek sugárszintjét a repülési magasság, a légköri és talajviszonyok figyelembevételével;
- pontszerű radioaktív források behatárolása, forró pont bemérése. A környezet dózis-teljesítmény-viszonyaitól szignifikánsan eltérő pontok alapján meg lehet határozni pontszerű források, illetve forró pontok földrajzi koordinátáit;
- radioaktív izotópok azonosítása. Energiaszelektív mérésekkel támpontot lehet nyújtani a radioaktív szennyezettség összetételének becsléséhez.

Hát, a harmadik pont valójában tényleg csak becslést nyújthatott a szennyezettség, illetve a talaj izotópleltárára, hiszen a konténerben lévő üreges szcintillációs detektor spektruma négy csatornára lett kiosztva. Ez szükségmegoldás volt, mivel a konténer alapvetően harcászati-hadműveleti követelményekben megfogalmazott kritériumok szerint működött, a hordozóhelikopter pásztázó repülést végzett 100–180 km/h sebességgel, az adatlekérdezés 2–4 s gyakoriságú volt, ami egyszerűen nem tette lehetővé spektrum felvételét, így a szcintillációs detektor „csak" egy nagy hatásfokú „fotonvadász" volt, a Compton-tartomány ugyanolyan értékes információt képviselt, mint a spektrumban lévő teljesenergia-csúcsok.

A levegőből való energia-, vagyis izotópszelektív gamma-spektrometriás mérésekre valós igény van, nemcsak nukleárisbaleset-elhárítási feladatok szempontjából, hanem ez a fajta technika igen értékes információt nyújthat a talajkutatásban, talajmorfológiai vizsgálatoknál is. Természetesen ez az alkalmazási forma némi magyarázatra szorul. A talaj szerkezete a fő befolyásoló paraméter számos fizikai, kémiai és biológiai folyamatban. Az üledékek szemcsemérete befolyásolja a talajban lejátszódó transzport-, lerakódási és eróziós folyamatokat [7], [8], valamint az ásványi összetételnek a szerves anyagokat, tápanyagokat és szennyező anyagokat adszorbeáló tulajdonságát. A talaj szerkezete döntő mértékben befolyásolja a hidraulikai vezetőképességet és ezáltal a felszíni víz beszivárgását is [9], ami nagymértékben befolyásolja a talajvíz elérhetőségét és az áramló víz útját. A jelenleg megfigyelt anyagszerkezeti jellemzők értékes bizonyítékai a folyók elmozdulási folyamataiból eredő, elhagyott

csatornák feltöltődésével járó fejlődési folyamatoknak, mint például a meanderek és a holtágak kialakulása. A talajban lévő homok-, iszap- és agyagkomponensek mennyiségi analízise hagyományosan közvetlen módszerekkel (például szitálás, üledékképzés, lézerdiffrakciós elemzés) történik, az ezekből eredő hátrányokkal együtt, mint például a vizsgált térfogat korlátozott mérete, esetlegesen időigényes és roncsolásos műveletek [10], [11]. A talajszerkezet közvetett mérései távérzékeléses felmérésekkel áthidalhatják ezeket a korlátokat, nagy felbontású térképeket szolgáltatva a talaj tulajdonságairól. Emellett a műholdak fedélzetére szerelt multispektrális és radarérzékelőkkel végzett talajvisszaverődési mérések [12], valamint a közeli felmérések során szerzett gamma-sugárzási adatok hasznos és ígéretes lehetőségnek bizonyultak a talajszerkezet közelítő becslésére [13]. Az agyag- és iszapszemcsék általában kolloidként viselkednek, és megnövekedett fajlagos felületük felelős a kationok [pl. K(I), U(IV), U(VI) és Th(IV)] adszorpciójáért [14]. Összességében, ásványi szerkezetre összpontosítva, általános szabályként elmondható, hogy a természetes radioizotópok nagyobb mennyiségben fordulnak elő az agyagásványokban (a finom frakcióra jellemző), mint a kvarcban (a homok fő alkotóeleme), ami gamma-spektroszkópiás analízissel vizsgálható.

Itt meg kell jegyeznünk, hogy amikor olyan gamma-spektroszkópiás mérésről beszélünk, amelyet repülőeszközről végzünk, ezt alapvetően alacsony felbontású szcintillációs technikával feltételezzük, mivel nagy felbontású félvezető (HPGe) technika alkalmazására, főleg, ha kis teherbírású drónról van szó, egyelőre nincs lehetőség, a germánium detektor nitrogénhűtése és a detektor összehasonlíthatatlanul magasabb ára miatt. Persze, manapság már a dinamikus hűtést megvalósító termoelektromos hűtés ki tudja váltani a kriosztátban tárolt folyékony nitrogénnel való statikus hűtést, de számunkra ez sem megoldás, mivel ez még szintén jelentős tömegtöbbletet eredményez, és nagy teljesítményű tápegységet követel. Így hát marad a jó öreg, nagy hatásfokú szcintillációs detektor, amelynek a környezeti mérésekhez csak a hőmérséklet változása okozta spektrumtorzulását kell kompenzálni [15].

Valójában, az LSF-konténer repülései, a rengeteg mérés, teszt inspirálta a szerzőt, hogy kialakítsa a drónra szerelhető radiológiai konténer, röviden radioszenzoros modul fejlesztési koncepcióját, ami főként arra épül, hogy mit tudott, vagy tud a helikopterre, esetleg merev szárnyú repülőeszközre szerelt légi sugárfelderítő rendszer, illetve mi az, amit nem, vagy csak korlátozottan. Ehhez járul hozzá a légi sugárfelderítő szenzorszett felépítésére, illetve működésére vonatkozó információ, amely szintén az LSF-konténer tapasztalataira épül.

Szóval, tekintsük át azt a koncepciót, amelynek szellemében (és persze a lehetőségek függvényében) a radioszenzor-modul prototípusa lesz kifejlesztve. A pályázat, amely a fejlesztést lehetővé teszi, a TKP2021-NVA-16 megnevezést viseli, maga a radioszenzor-modul a jelen cikk szerzőjétől a „RadiShell" fantomnevet kapta. A prototípus alapverzió „ZERO", a tervezett, továbbfejlesztett változat „MAX", két könnyített, kisebb hordozóra tervezett változat a „MINI" és „MICRO" kódneveket viselik.

3. A radioszenzor-modul tervezési kritériumai, felépítése, főbb elemei

A modul hardverének tervezése néhány alapvető szempont, illetve követelmény szerint történt. Ezeket felsorolásszerűen az alábbiakban lehet megfogalmazni:

- vezérlő elv a modul teljes körű autonóm működése, vagyis független volta a repülőeszköz fedélzeti rendszereitől. Ez azt is jelenti, hogy a modulnak önálló tápegységgel,

pozíciómeghatározási képességgel, illetve, online adatforgalom esetén, adattovábbítási kommunikációs rendszerrel kell rendelkeznie. Az offline adatgyűjtés minden esetben a kontroller alaplapi kommunikációjában biztosított;
- a szenzormodulnak rendelkeznie kell olyan sugárzásmérő műszerezettséggel, amely egyrészt biztosítja a repülési magasságból történő dózisteljesítmény-mérést és gammaspektrum felvételét, másrészt minimális teljesítményigényű és elegendően kis tömeggel rendelkezik. Ezek a paraméterek egymással „versengők", vagyis itt mindenképpen szükség van optimalizálásra;
- a modulnak rendelkeznie kell olyan általános rendeltetésű szenzorokkal, amelyek a pozíciómeghatározáshoz és a levegőállapot méréséhez szükségesek;
- a központi adatgyűjtő egységnek, mikrokontrollernek biztosítani kell a perifériák (műszerek, szenzorok, adatkommunikációs egység) kezelését, legyen robosztus, megbízható;
- a mikrokontroller és perifériák legyenek nyílt kódúak, könnyen és megbízhatóan programozhatók C/C++ nyelven. Ez a szempont szubjektív, mivel a fejlesztő szempontjából fontos követelmény;
- a tápegységnek biztosítani kell a modul hardverének teljesítményigényét jelentősen hosszabb ideig, mint a repülőeszköz maximális repülési ideje. Ezt az időt önkényesen határozzák meg, mivel a tápegység a modul belsejében lesz elhelyezve, itt ugyan az akkumulátorok feltöltése kívülről megoldható, de ha egyszer használatos elemekkel történik a táp biztosítása, akkor azok cseréje miatt meg kell bontani a burkot. Alapvetően kívülről, USB-csatlakozással szerelt módon tölthető táp van tervezve, a mikrokontroller és a perifériák 5, illetve 3,3 V feszültségigényű eszközök lesznek;
- a radioszenzoros modul kifelé való adatkommunikációja teljes mértékben nyílt lesz, semmilyen titkosítással vagy védelemmel nem fog rendelkezni. Ez szokatlannak tűnhet, de most egy prototípus áll kialakítás alatt, és kizárólag tudományos-műszaki szempontok szerint történik a fejlesztés. Majd, ha műszaki szempontból sikeres lesz a prototípus (valamelyik változata), és fellép ilyen igény, akkor a protokoll is ki fogja elégíteni azokat a követelményeket, amelyeket majd támasztanak felé.

Az alapvető komponensekről az alábbiakban ejtünk néhány szót. Nagyon fontos és alapvető körülmény, hogy az egész fejlesztés „Arduino" rendszerben és azzal kompatibilis környezetben valósul meg. Miért? Erre a kérdésre néhány pontban ki lehet fejteni a választ:
- legfontosabb, hogy az Arduino és azzal kompatibilis hardverkomponensekből összeállított rendszer tökéletesen és maximálisan kielégíti a levegőből végzett mérések mind nukleáris, mind általános méréstechnikai követelményeit, mind az adatkommunikációra vonatkozó műszaki követelményeket;
- az Arduino rendszer komponenseinek ár/érték aránya a legkedvezőbb. Teljesen szükségtelen felesleges kiadásokkal terhelni a fejlesztési projektet, ha a fenti tudományos műszaki követelményeket töredék anyagi ráfordítással is ki lehet elégíteni;
- az Arduino nemzetközi projekt teljesen nyílt kódú, könnyen programozható, ingyenes és megbízható fejlesztőkörnyezettel rendelkezik. Minden hardverkomponenst teljes körű dokumentációval, megbízható, nyílt kódú driverrel látnak el, nincsenek elhallgatások, ipari titkok, egyszóval, ideális környezet biztosított a fejlesztéshez;

- minden hardver- és szoftverkomponens gyorsan, zökkenőmentesen beszerezhető, letölthető;
- alapvetően a szerző által preferált C/C++ környezetben programozható (ahogy már fentebb említve volt), de más (Python, Java stb.) környezetben is könnyen kezelhető, multiplatformos rendszer.

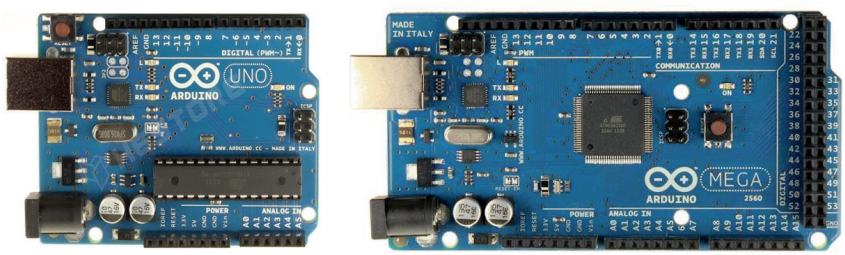
3.1. A radioszenzoros modul hardverkomponensei, perifériái

Itt röviden áttekintjük a tervezett radioszenzor-család változataiban alkalmazott hardverkomponenseket. Egyelőre csak felsorolás módszerével, később a család tagjainak felépítésében specifikáljuk az egyes verziókban alkalmazott egyedi szettek összetételét.

3.1.1. Mikrokontroller

A radiomodul központi „agya" a mikrokontroller. Főbb részei az alaplap, CPU, memória, tápegység, analóg, digitális adatportok és 5/3,3 V-os tápkimenetek.

Az alkalmazott típusok az Arduino UNO és MEGA kontrollerek.



2. ábra
Arduino UNO és MEGA alaplapok [16]

Az UNO alaplap 14 digitális (D0-D13) és 6 analóg (A0-A5) porttal rendelkezik, valamint stabilizált 3,3/5 V tápfeszültséget szolgáltat a perifériák felé. A MEGA alaplap 54 digitális és 16 analóg porttal rendelkezik. Mindkét alaplap USB I/O csatlakozóval és 9 V-os tápbemenettel van ellátva. A tápfeszültséget az USB-n keresztül is fel tudják venni. A prototípusban az alaplap önálló, nagy kapacitású 9 V-os tápegységgel lesz ellátva. Az offline adatgyűjtés az alaplapi USB-portról történik, memóriakártyára vagy memóriamodulra.

3.1.2. Általános rendeltetésű szenzorok

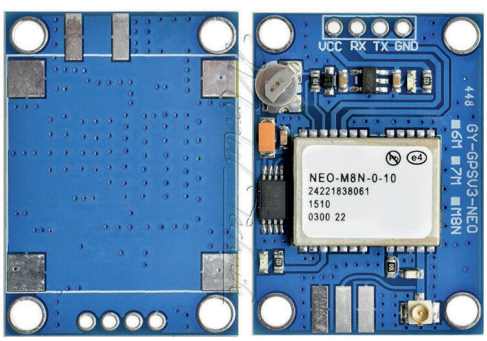
A pozíció meghatározásához, illetve a levegőállapot méréséhez szükséges szenzorok bármilyen méretű és műszerezettségű típusváltozatnak „kötelező" alkotóelemei.

3.1.2.1. GPS-vevő

A pozíció meghatározásához az u-blox® gyártmányú NEO-M8N GPS-vevő bizonyult a legalkalmasabbnak, rendkívül felhasználóbarát, az adatkimenete Adafruit_GPS.h meghajtón keresztül, egész-, illetve lebegőpontos számokban kerül ki egy Adafruit_GPS megnevezésű adatstruktúrába rendezve, ezek közül a legáltalánosabban használtak az 1. táblázatban találhatók:

1. táblázat
A leggyakrabban használt változói az Adafruit_GPS struktúrának [a szerző]

Változó megnevezése	Jelentés	Változó típusa	Megjegyzés
hour	óra	8 bites egész	GMT – greenwichi középidő
minute	perc	8 bites egész	GMT – greenwichi középidő
seconds	másodperc	8 bites egész	GMT – greenwichi középidő
milliseconds	ezred mp.	16 bites egész	GMT – greenwichi középidő
year	év	8 bites egész	GMT – greenwichi középidő
month	hónap	8 bites egész	GMT – greenwichi középidő
day	nap	8 bites egész	GMT – greenwichi középidő
latitude	szélesség fok/perc	lebegőpontos	DDMM.MMMM
longitude	hosszúság fok/perc	lebegőpontos	DDDMM.MMMM
latitudeDegrees	szélesség fok.tizedfok	lebegőpontos	
longitudeDegrees	hosszúság fok.tizedfok	lebegőpontos	
altitude	magasság	lebegőpontos	Tengerszint feletti magasság
speed	sebesség	lebegőpontos	Sebesség csomóban
angle	haladási irány	lebegőpontos	Földrajzi északtól való eltérés fokokban
lat	É/D félteke	karakter	'N'/'S'
lon	K/NY félteke	karakter	'E'/'W'
satellites	műholdak száma	8 bites egész	

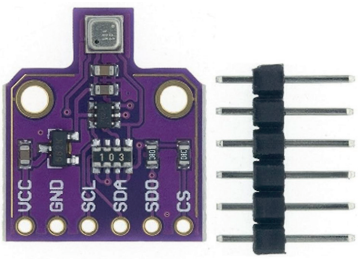


3. ábra
A NEO-M8N GPS-vevő [17]

A GPS-vevő az alaplap 3,3 V-os portjáról kapja a tápfeszültséget, az adatkommunikáció az alaplap két digitális portjáról (D6-rx, D7-tx) történik.

3.1.2.2. Hőmérséklet-, relatívpáratartalom- és légnyomásmérő szenzor

A levegőállapot méréséhez a CJMCU-680 megnevezésű szenzor lett kiválasztva, az érzékelője a Bosch gyártmányú BME680 típusú chip, hőmérséklet-, relatívpáratartalom- és légnyomásmérő képességgel.



4. ábra
A CJMCU-680 kombinált levegőállapot-mérő a BME680 BOSCH szenzorral [18]

A kombinált mérő az Adafruit_BME680.h driverrel egy Adafruit_BME680 adatstruktúrában adja vissza a mért adatokat, amelynek változói a 2. táblázatban láthatók.

2. táblázat
A mérőszenzor adatstruktúrájának kimeneti változói [a szerző]

Változó megnevezése	**Jelentés**	**Változó típusa**	**Megjegyzés**
temperature	hőmérséklet	lebegőpontos	°C
pressure	nyomás	32 bites egész	Pa
humidity	relatív páratartalom	lebegőpontos	%
seaLevel	referencia atmoszferikus nyomás	16 bites egész	bemeneti változó, tengerszinti nyomás vagy referencia relatív talajszinti nyomás
readAltitude(seaLevel)	relatív magasság	lebegőpontos	függvény, referencia nullponti nyomást vár bemenetként, kimenete a relatív magasság, m

A magasságszámításnál a barometrikus magasságmérést alkalmazzuk, mivel az jóval pontosabb, mint a GPS segítségével kapott magasságérték.

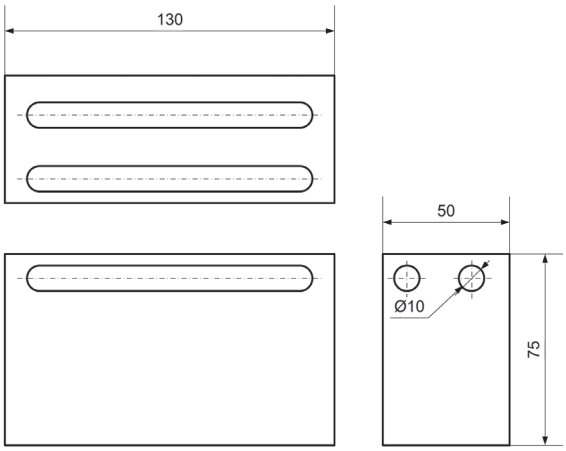
A szenzor az alaplapi táp 5 V-os portját használja, az adatkommunikáció két analóg porton (A4-A5) fog folyni.

Egyszerűség kedvéért a szenzort RHTP-mérőnek fogjuk hívni.

3.1.3. GM-számláló

A tervezett dózisteljesítmény-mérő 2, illetve 4 db önállóan vezérelhető és önálló táppal rendelkező modulból fog állni. A detektor 2–4 db SBM-20 típusú GM-csövet fog tartalmazni, ami biztosítja egyrészt a megnövelt számlálási hatásfokot, másrészt meghibásodás esetén a zökkenőmentes működést. A 2 GM-csöves modult dupla-, a 4 db-os modult kvadromodulnak

fogjuk hívni. A modulok saját hatásfokának kimérése alapján a dózisteljesítmény-mérő kumulatív hatásfokát súlyozott átlagolással határozzuk meg (5. ábra).

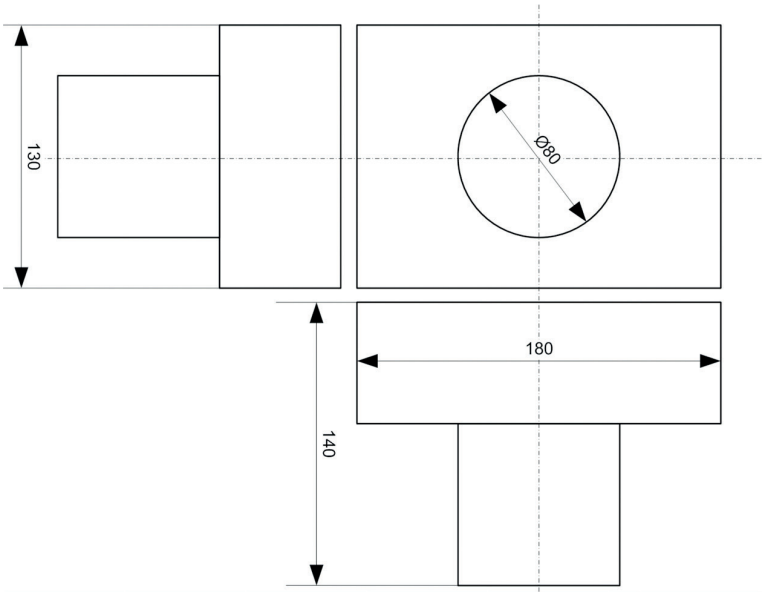


5. ábra
Dupla GM-csöves számláló modul [a szerző]

A dózisteljesítmény-mérő detektor előfeszítése a GM-cső előfeszítésének teljes platóján belül, a 390–550 V feszültség-intervallumba fog esni. Az ideális előfeszítés ebben az esetben 460–480 V között jó, de a nagyobb előfeszítés jobb hatásfokot fog eredményezni. A prototípus előfeszítése 500 V lesz, ez körülbelül 10%-os hatásfokjavulást eredményez. A port baud rate értéke 9600-on lesz tartva, ez rendkívül stabil. A detektor önálló, 4,5 V-os tápegységből fog működni, az alaplapi kommunikáció az alaplap digitális portjait (D2-D5) fogja használni.

3.1.4. Szcintillációs detektor

A szcintillációs detektort egy 3 × 3" méretű (a detektorkristály méretét nemzetközileg hüvelykben adják meg), nagy hatásfokú, függőlegesen orientált NaI(Tl) kristállyal, félvezető alapú fotoelektron-sokszorozó (silicon photomultiplier, SiPM), robusztus alumínium házas kivitelben építjük be. A detektor alapértelmezésben 1024 csatornás analizátorral működik, de az energiafelbontás a rövid idejű spektrumfelvétel miatt 64–256 csatornaszám-tartományban fog működni. A kristály fényhozamának, illetve az elektronikának a hőmérséklet-függését, ami óhatatlanul a spektrum torzulását okozza a környezeti mérések esetén, a detektorház folyamatos hőmérséklet-mérésével és egy erre az esetre kidolgozott kompenzációs algoritmus segítségével lehet kezelni. A detektorház hőmérséklet-mérése a kristályoldal lefelé néző felületével fizikai kontaktusban lévő CJMCU-680 szenzor segítségével fog megvalósulni (6. ábra).



6. ábra
A NaI(Tl) szcintillációs detektor modul [a szerző]

Valójában, a szenzormodul külső burkának tömege mellett, e detektor tömege lesz a meghatározó a szakrészen belül, hiszen csak a kristály tömege 1,3 kg. A detektor össztömege maximum 2 kg, ami egy légi felderítő modulhoz elég soknak tűnik, de csak az ekkora méretű szcintillációs detektor gamma-abszorpciós hatásfoka kellően magas, és ezt légi felderítésnél nem lehet nélkülözni.

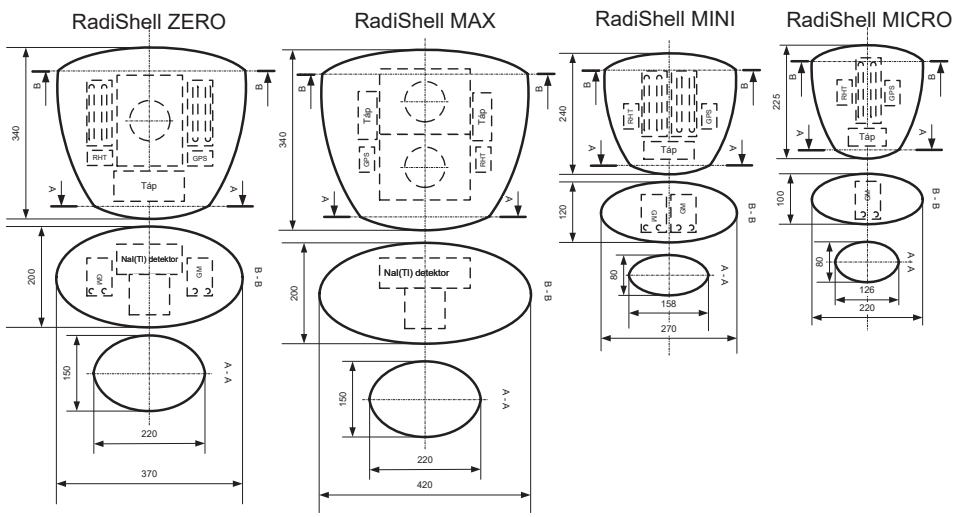
4. A szenzormodul-család tervezett típusai, főbb műszaki és műveleti paraméterei

Mivel már eddig is radiológiai szenzormodul-családról beszéltünk, most nézzük meg, hogy valójában hogy épülnek fel a család tagjai. Ezt a 3. táblázatban összefoglalva láthatjuk, amelyből valójában már látszik is, hogy az adott típusok eltérő hardvere, főleg eltérő műszerezettsége eltérő műveleti paramétereket, képességeket fog eredményezni.

3. táblázat
A RadiShell család nagybani felépítése, tervezett műszerezettsége (darabszám) [a szerző]

Modell	Kontroller Arduino	NaI(Tl) detektor	dupla GM-modul	kvadro GM-modul	RHTP-mérő	GPS-vevő
ZERO	MEGA	1	-	1	2	2
MAX	MEGA	2	-	-	3	2
MINI	UNO	-	-	1	1	2
MICRO	UNO	-	1	-	1	2

Az általános rendeltetésű szenzorok közül a GPS-vevő két példányban lesz beépítve a modulokba, ennek az az oka, hogy a pozícióadatok ugyanolyan fontosak, mint a mért sugárzási adatok, valamint a redundancia a pontosabb pozíció meghatározását is lehetővé teszi. Az RHTP-mérők modulonként a külső levegőállapotot mérik, azonban a ZERO és a MAX modellben a kristály hőmérsékletét is szükséges mérni, ezért ezekbe a modellekbe kristályonként egy-egy hőmérsékletszenzort is beépítünk. A modellek nagybani felépítése az alábbi, 7. ábrán látható.



7. ábra
A radiológiai szenzormodul-család változatai, vázlatos felépítésükkel és főbb méreteikkel [a szerző]

A 3. táblázatban és 7. ábrán látható szenzormodul-család alapverziója a már említett RadiShell ZERO lesz, vagyis, mint első prototípus, ez lesz kifejlesztve. A további modellekben csak egyféle detektor található, míg az alapverzióban kétféle. Ez feleslegesnek tűnik, mivel ismeretes, hogy a szcintillációs detektor, spektrum felvétele mellett, dózisteljesítmény-mérésre is alkalmas, sőt manapság már egyre elterjedtebb a szcintillációs dózisteljesítmény-mérés. Ezenkívül, a szcintillációs kristály gammafoton-befogási hatásfoka azonos hasznos térfogat esetén mintegy két nagyságrenddel nagyobb, mint a GM-csőé. Akkor vajon minek ez a duplikáció? A válasznál mi sem egyszerűbb, benne van a modell alaprendeltetésében. Ez egy prototípus, tanulmány, kísérleti nyúl, pofozógép. Mivel rendelkezik a további tervezett verziók műszerezettségével, nagyszerűen alkalmas azok műveleti paramétereinek (repülési magasság, sebesség, pásztázási távolság, mintázási frekvencia stb.) kikísérletezéséhez, valamint a mért adatok alapján elvégezni a versengő paraméterek optimalizálását, és végső soron meghatározni a modellek műveleti képességeit és az optimális felderítési paramétereket.

Most pedig meg kell vizsgálni, vajon milyen mérési eredményeket várhatunk különböző magasságban végzett repülés esetén? Ehhez persze nem árt ismernünk a dózisteljesítmény magasságfüggését a referenciamagasságban (1 m-re a talajfelszín felett) mért dózisteljesítményhez képest.

4.1. A dózisteljesítmény magasságfüggése

A magasságfüggés valójában nem más, mint a levegőréteg vastagságától, illetve állapotától függő gyengítési tényező, vagyis egy viszonyszám a referenciamagasságban, illetve egy adott magasságban mért dózisteljesítmény között:

$$k_h = \frac{P_r}{P(h)} \tag{1}$$

ahol

k_h		magasságkorrekciós együttható;
P_r	Gy/h	referenciamagasságban mért dózisteljesítmény;
h	m	emelkedési (repülési) magasság;
P(h)	Gy/h	h magasságban mért dózisteljesítmény.

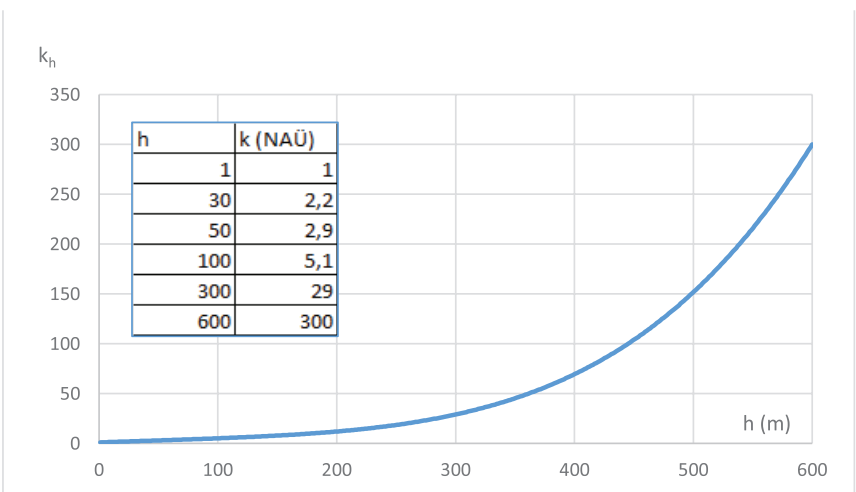
Sajnos, ez az összefüggés nem ilyen egyszerű, mivel a magasság mellett a levegő állapota is befolyásolja a gamma abszorpciót, vagyis:

$$k_h = k(h, p, \varsigma_r) \tag{2}$$

ahol

ς_r	%	levegő relatív páratartalma;
p	Pa	légnyomás.

Tehát egy egyszerű összefüggésből elég bonyolult keletkezik, de szerencsére az átlagos légköri viszonyok és a légnyomás és relatív páratartalom szélsőértékeinél is az eltérés ±5% intervallumon belül marad.



8. ábra
Az optimalizált magasságkonverziós értékek mint légi gyengítési együtthatók [a szerző]

Az optimalizált magasságkonverziós értékeket tapasztalati forrásból, reális mérési adatok alapján határoztuk meg és a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) ajánlásával tettük közzé (8. ábra) [1].

4.2. A GM-számláló várható mérési eredményei

A GM-számlálókkal végzett dózisteljesítmény-mérésnek van néhány sajátossága, amit a levegőből végzett méréseknél fokozottan kell figyelembe venni. Talán úgy lesz ez leginkább érthető, ha felsorolás szinten tekintjük át:

- a GM-számláló uniformizált beütéseket (impulzusokat) számol, ami a mérési idő hozzárendelésével intenzitást eredményez, ami valójában a számláló mérési alapmennyisége. A kalibráció során a tisztán impulzusintenzitás-mennyiséget konvertáljuk valamilyen dózisteljesítmény-mennyiséggé (a sugárzási tér súlyozott gamma-átlagenergiája figyelembevételével), ami, ha szabatosak akarunk lenni, elnyelt dózisteljesítményt eredményez. A biológiai egyenértékdózisban megadott kijelzés valójában egy további konverziónak az eredménye, hiszen a műszer elektronikus, élettelen, tehát feltételezve, hogy a környezet dózisterében lévő élő test csak röntgen- és gamma-sugárzásnak van kitéve, az erre vonatkozó sugárzási súlytényezővel (itt a wR = 1) való konverzióval biológiai dózist is kijelezhet egy kalibrált és hitelesített műszer. Mindazonáltal maradjunk az alaptételnél: a GM-számláló *impulzusintenzitást* mér;

$$I = \frac{n}{t} \tag{3}$$

ahol
I intenzitás (1/s);
n beütésszám és
t mérési idő (s).

- A beütésszámhoz tartozó statisztikus hiba, mivel adott időintervallumban számolt beütésátlagok a Poisson-eloszlást követik, így azt közelíteni gyökös kifejezéssel tudjuk:

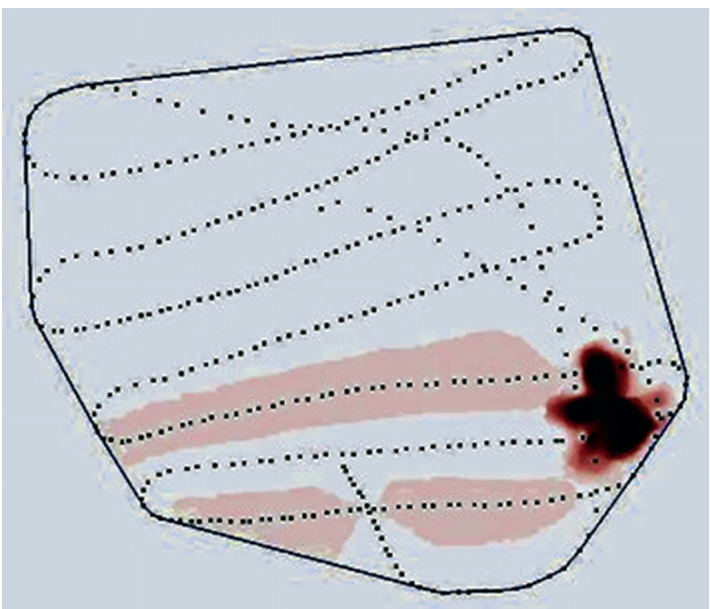
$$\Delta n = \sqrt{n} \tag{4}$$

ahol Δn – beütésszám statisztikus hibája, és mivel az időmérés hibáját elhanyagoljuk a beütésszám hibájához képest, így az intenzitás hibája (ΔI):

$$\Delta I = \frac{\Delta n}{t} = \frac{\sqrt{n}}{t} \tag{5}$$

- a fenti összefüggésekből látványosan következik, hogy a mérések hibája kis értékeknél magas, sőt összemérhető mennyiség a mérésekkel, míg az intenzitás növekedésével a hiba gyorsan csökken;

- a normál háttérsugárzás, amely a Budapest környezetében körülbelül 100 nGy/h elnyelt dózisteljesítménnyel jellemezhető, kimondottan alacsony intenzitású sugárzási teret jelent, ami nagy beütésszám-, azaz nagy intenzitásingadozást okoz a mérések során. Méréstechnikai szempontból ez kétféleképpen csökkenthető: egyrészt a számlálási (átlagolási) idő növelésével, másrészt a detektor hasznos térfogatának (vagy számának) növelésével. Voltaképpen a mérődetektor térfogatának növelése, illetve egy adott detektor számának növelése egymással egyenértékű: kétszer akkora detektortérfogat ugyanolyan mértékben csökkenti a mérés relatív hibáját, mint két identikus detektor párhuzamos használata. Talajszinten végzett méréseknél, vagy például telepített monitoringrendszereknél általában a hosszabb átlagolási idő jó megoldás, azonban ha a mérés mozgásban történik, az átlagolási/mintavételi idő korlátozott, mivel a mérési adat csak egy rövid útszakaszra vonatkozhat, amit az útvonal vagy körzet szempontjából pontszerűnek tekinthetünk. Ily módon, a felderítés sebessége (következménye a megtett út) és az átlagolási idő egymással versengő mennyiségek, ami azt eredményezi, hogy alacsony intenzitású dózistérben az egymás mellett lévő pontokra vonatkozó intenzitásértékek erősen ingadoznak. Ha megnöveljük az átlagolási időt, netán mozgóátlagot képzünk, ami a földi méréseknél teljesen elfogadott és jó módszer, akkor a 9. ábrán látható effektust tapasztaljuk.



9. ábra
Légi sugárfelderítés hosszabb mozgóátlag-képzéssel [a szerző]

Az ábrán a légi sugárfelderítő konténer forró pont bemérésének pásztázási útvonala látható, a pontokhoz tartozó dózisteljesítmény-értékek a szürke-piros-fekete színmélységgel arányosak. A hosszabb idejű mozgóátlag-képzés eredménye lesz az a háttértől elütő színű „csóva”,

amelyet a forró ponttól távolodva mért a konténer, ahol a pontokhoz és környezetükhöz tartozó „valós" értékek nyilvánvalóan teljesen mások, mint amit a mérések mutatnak.

- Tehát, marad a viszonylag rövid átlagolási idő, mozgóátlag-képzés nélkül, és ha figyelembe vesszük, hogy a kis magasságon végzett repüléssel, ha elfogadható felbontással akarjuk végezni a pásztázó felderítést, egy 5 s-os átlagolási idő, 3–5 m/s-os felderítési sebesség mellett 15–25 m-es pontok közötti távolságot eredményez. Nos, nézzük meg, hogy normál háttér mellett ez mit eredményez. Az alábbi, 4. táblázatban a talajszinten végzett gyakorlati mérések intenzitásértékei vannak feltüntetve (Ix), a hozzá tartozó statisztikus hibával (ΔIx), illetve relatív hibával (Δx). Az index a két vagy négy GM-csöves detektorral való mérést jelöli. A talajszinti méréseket átszámoltuk különböző magasságra, ennek megfelelően az őket terhelő statisztikus és relatív hiba értékeit is.

4. táblázat
5 s-os átlagolási idővel mért, illetve adott magasságra átszámolt intenzitás- és hibaértékek [a szerző]

h (m)	kh	dupla GM-modul			kvadro GM-modul		
		I2 (cpm)	ΔI2 (cpm)	*Δ2 (%)*	I4 (cpm)	ΔI4 (cpm)	*Δ4 (%)*
1	1	54,2	28,8	*53*	108,4	40,3	*37*
5	1,17	46,4	26,6	*57*	92,8	37,3	*40*
10	1,36	39,7	24,6	*62*	79,5	34,5	*43*
20	1,76	30,9	21,7	*70*	61,7	30,4	*49*
30	2,15	25,2	19,6	*78*	50,4	27,5	*55*

A relatívhiba-értékekből látszik, hogy az egymást követő mérési adatok ingadozása nagy és a repülési magasság növelésével jelentősen megnövekszik, hiszen 30 m-es repülési magasságban, dupla modul esetén 78%-ot ér el, de talajszinten is már 53%. Nem sokat javít a helyzeten, ha kvadromodullal mérünk, a relatív hiba itt is csak körülbelül 70,7%-ra csökken (pontosabban $-\sqrt{2}/2$-részére). Ilyetén az 5 s-os átlagolási idő rövidnek tűnik, kivéve, ha kvadromodult alkalmazunk 10 m-es emelkedési magasságig.

Ha megnöveljük az átlagolási időt 10 s-ra, az alábbi táblázatból látható, hogy a relatív hiba lecsökken $\sqrt{2}/2$ -részére, ami azt jelenti, hogy dupla modullal szerelt felderítő alacsony, 10 m-es magasságon végezhet felderítést, míg a kvadromodul 30 m-es magasságig elfogadható adatsorokat fog küldeni.

5. táblázat
10 s-os átlagolási idővel mért, illetve adott magasságra átszámolt intenzitás- és hibaértékek [a szerző]

h (m)	ka	dupla GM-modul			kvadro GM-modul		
		I2 (cpm)	ΔI2 (cpm)	*Δ2 (%)*	I4 (cpm)	ΔI4 (cpm)	*Δ4 (%)*
1	1	54,2	20,7	*38*	108,4	29,3	*27*
5	1,17	46,4	19,2	*41*	92,8	27,1	*29*
10	1,36	39,7	17,8	*45*	79,5	25,1	*32*
20	1,76	30,9	15,7	*51*	61,7	22,1	*36*
30	2,15	25,2	14,1	*56*	50,4	20,0	*39*

Most már csak egy dolgot kell megmagyarázni: vajon miért fogadható el a nagyjából 40%-os relatív hiba, hiszen ez még mindig nagy ingadozást eredményez az adatsorozatban? Megmagyarázzuk:

- először is, a felderítési adatok egy irreguláris ponthalmazként jelentkeznek, és térképi adatbázisba illesztés során raszteres koordináta-rendszerbe való konverzión, súlyozott átlagképzéses eljáráson (például krigelésen) esnek át, ami egyben simító művelet is;
- továbbá, a számítások normál háttérsugárzási értékekre vonatkoznak. A mérések célja valójában a normál háttérnél lényegesen magasabb dózisteljesítmény-szintek feltérképezése, akár szennyezés, akár például egy uránkibúvás okozza, mint Kővágószőlősön, ahol a dózisteljesítmény egy nagyságrendet emelkedik, és ilyen esetben a relatív hiba a töredékére csökken.

4.3. A szcintillációs detektor várható mérési eredményei

A szcintillációs detektorral nagyobb szerencsénk van, mivel általában véve e detektor jellemzője a nagy fotonabszorpciós hatásfok. A gyakorlatban végrehajtott mérések szerint a 3 × 3" kristályméretű detektor spektrumintenzitása 400–600 cps körül van abban a környezetben, ahol a dózisteljesítmény-mérések 100–120 nGy/h elnyelt dózisteljesítményt mutatnak. A földfelszín feletti méréseknél a spektrumintenzitás csökkenését ugyanúgy figyelembe kell venni, mint dózisteljesítmény-méréseknél, ezenkívül a 10–30 m vastag levegőrétegnek van Compton-tartomány-növelő hatása is. Ennek azonban csak a spektrum kis energiájú régiójában van jelentősége, hiszen már 300 keV energiánál a levegő gamma abszorpciós felezési rétegvastagsága 50 m felett van [19], így a talaj U, Th sorainak és 40K tartalmának vizsgálata során ez nem releváns probléma. Valós problémát a már fentiekben tárgyalt, a repülőeszköz mozgása során rendelkezésre álló korlátozott, mintegy 5–10 s-os mérési idő jelenthet.

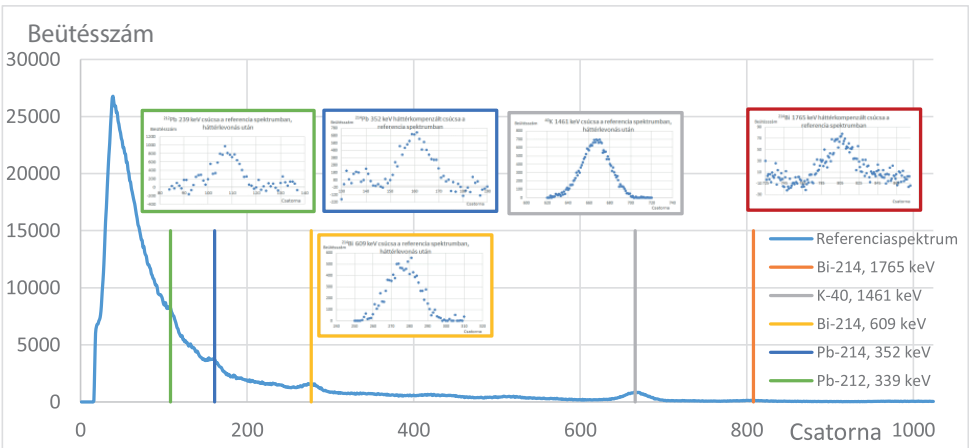
Mozgásban lévő objektumról való méréseknél figyelembe kell vennünk néhány sajátosságot:

- általában nem végzünk spektrometriás méréseket, mivel azokat egy adott pontra vonatkoztatjuk. Itt most szemléletet váltunk, és a spektrum felvételének ideje alatt megtett szakasz geometriai középpontjára vonatkoztatjuk a spektrum által hordozott információt. Ez mindenképpen járulékos hibával terheli a méréseket;
- a gamma-spektrometriában általában „nem szeretjük" a Compton-tartományt, igyekszünk csökkenteni, elnyomni, azonban a légi felderítés során az is hordoz értékes információt, spektrumösszintenzitás-növelő hatása miatt, hiszen az anomáliák, esetleges forró pontok pozicionálása miatt a spektrumösszintenzitás is az egyik nagyon fontos mérési adat;
- a spektrum felvételének időtartama – a GM-számlálóval végzett mérésekhez hasonlóan – korlátozott, aminek következtében a spektrum összbeütésszáma viszonylag kevés. Ez egyrészt szintén statisztikus hibanövelő hatású, másrészt befolyásolja a spektrum felbontását is. A kis beütésszám kompenzálásának egy lehetséges módszere, ha a spektrum csatornafelbontását csökkentjük úgy, hogy az *A* csatornaszámú spektrumot átkonvertáljuk *B* csatornaszámúra, az alábbi algoritmus szerint:

$$
\begin{aligned}
&\textit{Legyen } \mathrm{A, B, i, j, n, m} \in \mathrm{N, n > m} \\
&A = 2^n, B = 2^m \\
&j = \left\lfloor \frac{i}{n-m} \right\rfloor \\
&B_j = \sum_{j(n-m)}^{(j+1)(n-m)-1} A_i
\end{aligned}
\tag{6}
$$

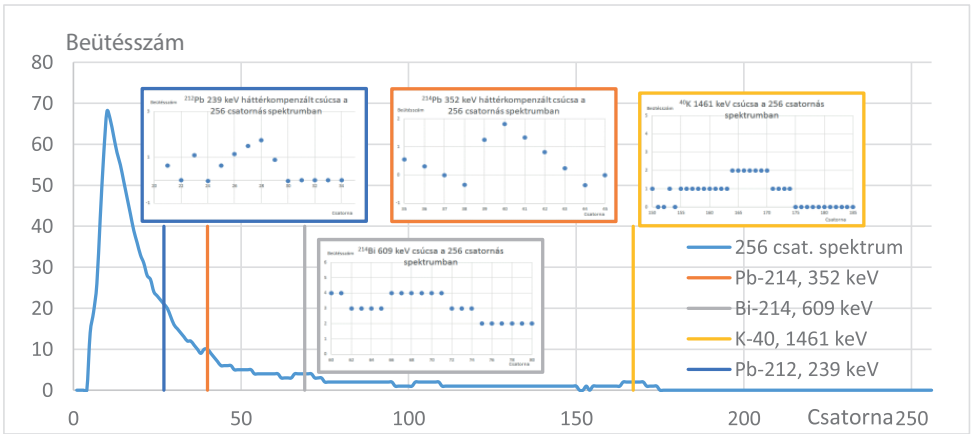
A 10–13. ábrán látható elemzés során megbecsültük, hogy egy környezeti mérés (Budapest, NKE, 47°29'38.0"N 19°07'01.2"E) során felvett gamma-spektrum ismeretében milyen kisebb csatornaszámú spektrumok várhatók, valamint a referenciaspektrumból jól kiértékelhető csúccsal rendelkező természetes radioaktív izotópok közül melyek azonosíthatók, illetve kvantitatíve kiértékelhetők. A referenciaspektrum egy 3 × 3" kristályméretű NaI(Tl) szcintillációs detektorral, 3600 s mérési idővel és 1 m talajszinttől való magasságban lett felvéve, a meghatározható izotópok:

- 212Pb, 232Th sor, 239 keV centroid energia;
- 214Pb, 238U sor, 352 keV centroid energia;
- 214Bi, 238U sor, 609 keV centroid energia;
- 40K, 1461 keV centroid energia;
- 214Bi, 238U sor, 1765 keV centroid energia.

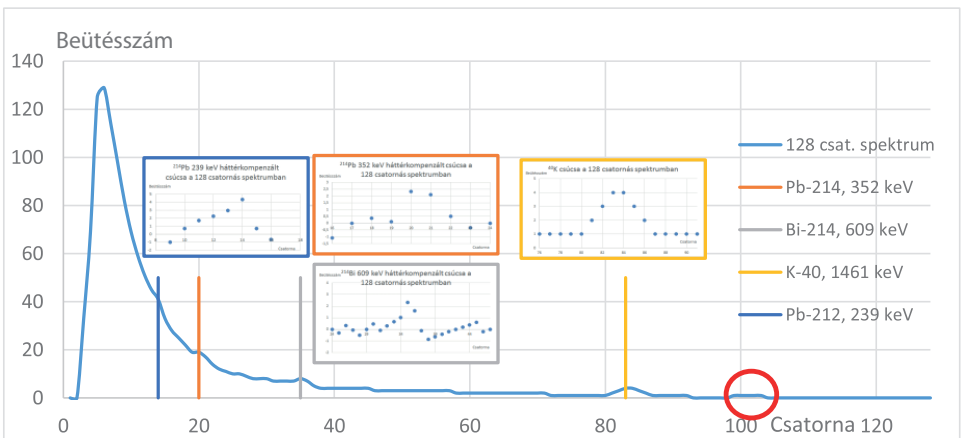


10. ábra
Az elemzés alapját képező referenciaspektrum [a szerző]

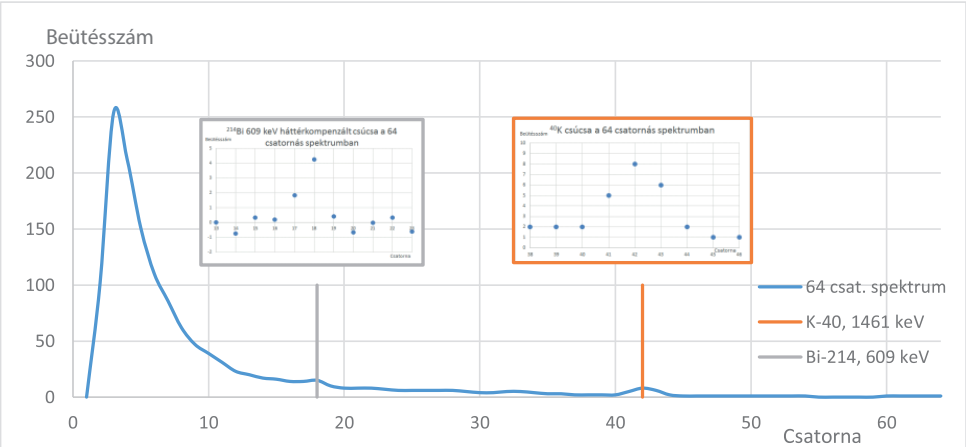
A 10. ábrán látható referenciaspektrumból a (6) algoritmus alapján, a beütésszámokat 5 s-os mérésre, illetve 30 m magasságra átszámolva láthatjuk a várható, vagyis becsült spektrumokat (11–13. ábra). A számítások során elhanyagoltuk egyrészt azt, hogy a magassági gyengítési tényező egy, a dózisteljesítményre vonatkoztatott átlagérték, adott magasságon a gamma-energia növekményével ez csökken, valamint a vastagabb levegőréteg Compton-tartomány-növelő hatása. Ennek ellenére, látszik, hogy a referenciaspektrumban kijelölt csúcsok közül, a 214Bi 1765 keV-os csúcsa kivételével (ez csak a 128 csatornás spektrumban, piros körrel kiemelve látható, de kvantitatíve nem értékelhető) a nevezetes csúcsok meghatározhatók és kiértékelhetők, természetesen viszonylag nagy statisztikus hibával.



11. ábra
A referenciaspektrum alapján 5 s mérési időre és 30 m magasságra, valamint 256 csatornára átkonvertált spektrum
[a szerző]



12. ábra
A referenciaspektrum alapján 5 s mérési időre és 30 m magasságra, valamint 128 csatornára átkonvertált spektrum
[a szerző]



13. ábra
A referenciaspektrum alapján 5 s mérési időre és 30 m magasságra, valamint 64 csatornára átkonvertált spektrum
[a szerző]

A 64 csatornára konvertált spektrumban, az alacsony felbontás ellenére, azok a csúcsok, amelyek a konverzió kumulatív eljárása miatt nem „vesznek el", nagyobb intenzitással és lényegesen kisebb statisztikus hibával értékelhetők ki, ezért párhuzamos használata indokolt lesz valószínűleg.

A felderítés adatbázisának kiértékelése során a spektrumkonverzió műveletét dinamikusan alkalmazva, vagyis a különböző felbontásokat ugyanarra a mért adatsorra, a viszonylag alacsony beütésszám ellenére a szignifikáns csúcsok (és a mögöttük rejtőző izotópok) detektálhatók és kvantitatíve meghatározhatók.

A 10–13. ábrákon látható spektrumokban kijelölt nevezetes csúcsok a diagramban ki vannak emelve, ezek egy része esetében, ott ahol az adott csúcs nagy intenzitású Compton-háttéren „ül", a kiemelésben a csúcs háttérkompenzált alakját tüntettük fel.

A mérési idő 10 s-ra növelése természetesen szebb csúcsalakokat, illetve kisebb statisztikus hibát nyújt, valamint a mérés során az esetlegesen alacsonyabb repülési magasság szintén növeli a beütésszámot, ami a kiértékelés pontosságát tovább növeli.

5. Összefoglalás

Jelen cikk áttekintette a drónra szerelhető radioszenzoros modulcsalád főbb szerkezeti, hardverelemeit, természetesen elhanyagolva a fejlesztés során olyan lényeges kérdéseket, mint a tervezés, méretezés kérdéseit, az elemek közötti kommunikációs protokollt, a modul gépészeti, amortizációs és rögzítési problémáit.

Kiemelten fontos volt a modul nukleáris méréstechnikájával kapcsolatos kérdéskör, a sugárzásdetektoroktól az adott repülési paraméterek figyelembevételével várható mérési adatok elemzése, hiszen majd a kész prototípus(ok)kal való gyakorlati munka során kristályosodik ki igazán a drónnal végrehajtott légi sugárfelderítés részletes módszertana.

Ennek ellenére, már most látszik néhány igen fontos sajátossága a drónnal végzett légi sugárfelderítésnek. Összehasonlítva a helikopterre kifejlesztett légi sugárfelderítő konténer alkalmazási elveivel, a drón képes (és követelmény is) kisebb magasságon felderítést végezni, kisebb a repülési sebessége, ez mindenképpen pontosabb mérést tesz lehetővé. A drón korlátozott repülési ideje, kisebb sebessége egyszersmind jóval kisebb területpásztázási teljesítőképességet is jelent. A felderítés kezdőpontja és az operátor közötti távolság viszonylag kicsi kell hogy legyen, vagyis a felderítendő terepszakaszhoz közel kell települni (szennyezett terepszakasz esetén ez igen fontos). A radiomodul műszerezettsége is döntő körülmény, a GM-csöves detektorral felszerelt modul kisebb sebességgel és kisebb magasságból végez megbízható mérést, mint a szcintillációs detektorral felszerelt változat. Mindazonáltal a drón tetszőleges helyen, gyakorlatilag nagyon kis magasságon képes lebegve mérést végezni, például spektrumot felvenni, ami nagyon nagy előny a hot spot analízis során. A repülőeszköz és a radioszenzoros modul üzemeltetési költsége valószínűleg töredéke lesz a helikopteres felderítő változatnak (csak a repülőeszközt figyelembe véve).

Összességében, a légi sugárfelderítés két „műfaja", a helikopteres és a drónos változatok semmiképpen nem váltják ki, azonban igen jól kiegészítik egymást, és megfelelően kombinálva lehetővé teszik adott esetben egy szennyezett, vagy más szempontból kijelölt terepszakasz korrekt és pontos felderítését. Valószínűleg ebben az esetben a földi felderítés jórészt lekorlátozódhat a forró, vagy műveleti szempontból kiemelten fontos pontokról való mintavétel, illetve in situ mérések végrehajtására.

Irodalomjegyzék

[1] International Atomic Energy Agency, *Airborne Gamma Ray Spectrometer Surveying.* IAEA Technical Reports Series No. 323. Vienna, 1991. Online: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/072/22072114.pdf

[2] International Atomic Energy Agency, *Guidelines for Radioelement Mapping using Gamma Ray Spectrometry Data.* IAEA-TECDOC-1363, 2003. Online: https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1363_web.pdf

[3] Zelenák J. et al., „A légi sugárfelderítés képességei alkalmazhatóságának vizsgálata elveszett vagy ellopott sugárforrások felkutatása, illetve szennyezett terepszakaszok felderítése során," *Hadmérnök,* 4. évf. 1. sz. pp. 46–62. 2009,

[4] Manga L. et al., „Pilóta nélküli repülők a sugárfelderítésben," *Védelem Tudomány: Katasztrófavédelmi Online Tudományos Folyóirat,* 2. évf. 2. sz. pp. 63–75. 2017. Online: www.vedelemtudomany.hu/articles/II/2/05-manga-katai-vass-csurgai.pdf

[5] Ács B. et al., „ABV-anyagok terjedésének numerikus, számítógépes szimulációja," *Haditechnika,* 39. évf. 1. sz. pp 13–19. 2005.

[6] Csurgai, J. et al., Numerical Simulation of Transmission of NBC Materials, *AARMS,* 5. évf. 3. sz. pp. 417–434. 2006.

[7] Madarász B. et al., „Lézeres szemcseösszetétel elemzés néhány előkészítő eljárásának vizsgálata nagy szervesanyag-tartalmú talajokon," *Agrokémia és Talajtan,* 61. évf. 2. sz. pp. 381–398. 2012. Online: https://doi.org/10.1556/agrokem.60.2012.2.11

[8] Pécsi M. et al., „Negyedidőszaki éghajlatváltozások, talajok-löszök képződése a Kárpát-medence térségében," *Földtani Közlöny,* 132. évf. pp. 23–41. 2002.

[9] Elek B., Talajok szerves folyadékvisszatartó- és folyadékvezető-képessége, PhD-értekezés. Keszthely, Pannon Egyetem, 2009.
[10] Kettler, T. A., Doran, J. W., Gilbert, T. L., Simplified Method for Soil Particle-Size Determination to Accompany Soil-Quality Analyses, *Soil Science Society of America Journal,* 65. évf. 3. sz. pp. 849–852. 2001. Online: https://doi.org/10.2136/sssaj2001.653849x
[11] Taubner, H., Roth, B., Tippkötter, R., Determination of Soil Texture: Comparison of the Sedimentation Method and the Laserdiffraction Analysis, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science,* 172. évf. 2. sz. pp. 161–171. 2009. Online: https://doi.org/10.1002/jpln.200800085
[12] Verőné Dr. Wojtaszek M., *Földhasználati tervezés és monitoring 3. Távérzékelés, mint földhasználati adatforrás.* Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, 2010. Online: https://dtk.tankonyvtar.hu/handle/123456789/7658
[13] Matula R., Tóth T., „Talajok agyagtartalmának becslése gamma-spektroszkópiai mérésekkel," *Agrokémia és Talajtan,* 68. évf. 2. sz. pp. 367–383. 2019. Online: https://doi.org/10.1556/0088.2019.00034
[14] M, Nagy N., „Ioncsere-folyamatok az agyagásványok 'nanolaboratóriumában'," *Magyar Kémiai Folyóirat,* 123. évf. 1. sz. pp. 25–31. 2017. Online: https://doi.org/10.24100/MKF.2017.01.25
[15] Csurgai, J., Padányi, J., Földi, L., "Temperature Dependence of NaI(Tl) Radiation Scintillation Detectors' Characteristics," *Advances in Military Technology,* 15. évf. 1. sz. pp. 201–212. 2020. Online: https://doi.org/10.3849/aimt.01328
[16] www.hestore.hu/images/comp/full/QXJkdWlub1Vubwbw.jpg, https://cdn.sos.sk/productdata/9f/72/3748880e/arduino-mega2560-rev3-a000067.jpg
[17] www.ebay.com/itm/273805129497
[18] https://img.fruugo.com/product/6/23/559668236_max.jpg
[19] The National Institute of Standards and Technology, *X-Ray Mass Attenuation Coefficients.* é. n. Online: https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html

Drone-Mountable Radiology Module Development Concept

A wide range of sensor architectures for fixed- or rotary-wing drones with different purposes and uses have been or are being implemented. The author would like to give a taste of the development of an airborne sensor module for drone-mounted airborne beam detection to be developed in the framework of the present call TKP2021-NVA-16. The present paper briefly reviews the operational criteria for the application, the background of the development of the sensor module, the measurement fundamentals of the R&D, the radiological sensor and general purpose sensor system under development, the design fundamentals of the possible flight altitude and speed of the launch vehicle.

Keywords: *airborne radiological reconnaissance, radio sensor module, radiological survey*

Dr. Csurgai József egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Műveleti és Támogató Tanszék csurgai.jozsef@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-4770-7997	József Csurgai, PhD Associate Professor University of Public Service Faculty of Military Sciences and Officer Training Department of Operations and Support csurgai.jozsef@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-4770-7997

„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

Tartalom

Táborszky József: *A katonai repülőtereket érintő biztonsági kihívások változása a történelem során – 2. rész* 5

Sally Ichou, Árpád Veress: *Technology Roadmap for Aircraft Maintenance, Repair and Overhaul* 19

Sándor Zsolt: *Az áruszállító drónok megjelenése okozta kihívások a légi közlekedési rendszerben* 31

Sándor Zsolt, Pusztai Máté: *Pilóta nélküli légi járművek a mezőgazdaság szolgálatában – a hazai hatósági szabályozási keretrendszer* 47

Csató Péter, Óvári Gyula: *A hidrogén felhasználásának jelene és jövője a repülésben* 59

Békési Bertold, Csóré Attila, Gajdács László: *A légi járművek adatfeldolgozó és adattovábbító rendszere – az Air Data Computer* 77

András Vajda, István Szalkai: *New Complex Military and Civil UAV/RPA Classification System for Registration, Administrative Purposes, and Special Operation Preparation* 91

Páll Márton, Wantuch Ferenc: *Szupercellák objektív felismertetése villámadatok segítségével* 109

Ádám Fehér, Imre Kállai, Árpád Veress: *Parameter Sensitivity Analysis and Structural Development of an Airliner Lavatory Unit by Means of Finite Element Method* 125

Vas Tímea, Halászné Tóth Alexandra, Bali Tamás, Dudás Zoltán, Bottyán Zsolt, Gajdos Máté, Fekete Csaba: *A pilóta nélküli légi jármű-rendszerek integrálása a repülőtér forgalmába* 145

László Szilvássy: *Why Does the Attack Helicopter Have More Survival Ability than the Armed Utility Helicopter?* 167

Csurgai József: *Drónra szerelhető radiológiai modul fejlesztési koncepció, hardveres felépítés és nukleáris méréstechnikai alapok* 181