

Diszruptív légi közlekedés: technológiai átalakulás a helyfüggetlen toronyirányítástól egészen a drónelhárításig

NVKDP kutatási jelentés

Horváth Gábor^{1,2} 

¹Honvédelmi Minisztérium, Állami Légügyi Főosztály, Légiforgalmi Felügyeleti Osztály, Budapest, Magyarország

²Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Hadtudományi és Honvédtisztviselőképző Kar, Katonai Műszaki Doktori Iskola, Budapest, Magyarország

Levelező szerző, e-mail: horvath.gabor@uni-nke.hu

Beérkezett: 2025. augusztus 1.; elfogadva: 2025. november 18.

Összefoglalás

A Kooperatív Doktori Program Nemzetvédelmi Alprogram keretében támogatott kutatásom a légiforgalmi szolgáltatások technológiai átalakulását vizsgálja, különös tekintettel a helyfüggetlen toronyirányítás (rTWR), a pilóta nélküli légi járművek elleni védekezés (C-UAS), valamint az ezek forgalommenedzsmentjét támogató UTM-rendszerek katonai alkalmazhatóságára. Ennek eredményeként minden vizsgált terület vonatkozásában megfogalmazásra kerültek azok a javaslatok, amelyek a Magyar Honvédség légiforgalmi szolgáltatásával összefüggésben a reziliencia növelését, valamint a kibervédelmi hatékonyság, az interoperabilitás és a műveleti rugalmasság javítását célozzák.

Kulcsszavak: helyfüggetlen toronyirányítás, drón, UAS, UAV

Disrupted air traffic: Technological transformation from location-independent aerodrome control to drone countermeasures

Gábor Horváth^{1,2}

¹Ministry of Defence, State Aviation Department, ATM Supervisory Division, Budapest, Hungary

²Ludovika University of Public Service, Faculty of Military Science and Officer Training,
Doctoral School of Military Engineering, Budapest, Hungary

Summary

The research, conducted within the National Defence Subprogramme of the Cooperative Doctoral Programme, examines the technological transformation of air traffic services with a focus on three disruptive domains: remote tower control (rTWR), counter-unmanned aircraft systems (C-UAS), and unmanned traffic management (UTM). These areas represent the ongoing convergence of digitalisation, automation, and defence innovation that is reshaping the operational and security landscape of aviation. The study explores how rTWR can decouple aerodrome control from physical location, supporting resilient, deployable, and cyber-secure operations in both civil and military environments. In parallel, the rapid proliferation of small, unmanned aircraft has made integrated C-UAS solutions essential for safeguarding critical airspace. UTM systems, as the backbone of future drone traffic management, are analysed for their potential to embed defence-specific requirements and strengthen interoperability between civil and military stakeholders. Across all domains, the research formulates recommendations to enhance resilience within the Hungarian Defence Forces' air traffic service framework and improve the overall effectiveness of cyber defence, interoperability, and operational flexibility.

Keywords: rTWR, drone, UAS, UAV

Bevezetés

„A légiforgalmi szolgáltatás rendszerét átalakító technológiák katonai alkalmazhatóságának vizsgálata a hálózat-alapú képességek koncepciójának figyelembevételével” című Kooperatív Doktori Program Nemzetvédelmi Alprogram (NVKDP) keretében támogatott pályázatomban elkészítését azok a negyedik ipari forradalommal együtt járó innovatív implementációk katalizálták, amelyek paradigmaváltás elé állítják a légi közlekedési iparág globális rendszerét. Ez a folyamat elkerülhetetlenül megreformálja a polgári, valamint a katonai légiforgalom-szervezés konvencionális eszközeit. Ennek a reformfolyamatnak az eredményeként korábban soha nem látott mértékű adat keletkezik, miközben a közvetlen emberi beavatkozás egyre inkább felügyeleti tevékenységgé alakul át, és a gépi tanulás, valamint a mesterséges intelligencia eszközeivel támogatott rendszeremlékek átveszik az operatív végrehajtó szerepkörét. A légi közlekedés terén ennek egyik leglátványosabb példája a drónok elterjedése, amelyek a katonai alkalmazás területén már több évtizedes múltra tekinthetnek vissza (*Palik 2013*), de a polgári légi közlekedésben is egyre jelentősebb szerepet töltenek be. A teljesség igénye nélkül ide lehet még sorolni a repülőterek legikonikusabb épületeit számúzni szándékozó, úgynevezett virtuális tornyokat, amelyek megteremtik a helyszíntől független repülőtéri légiforgalmi és repüléstájékoztatói szolgáltatások biztosításának lehetőségét (*Van Beek 2017*).

Az említett példák hatása alapvetően rendszerszinten jelenik meg: olyan diszruptív, vagyis felforgató erővel bírnak, amely túlmutat a hagyományos légiforgalom-szervezési alapelveken, így egyre kevésbé értelmezhető a klasszikus paradigmákon belül. Ezzel összefüggésben elég csak a helyfüggetlen repülőtéri irányítás (rTWR) koncepcióját áttekintenünk, amely nemcsak újszerű technológiai megoldások rugalmas alkalmazását igényli, de a tervezőktől kezdve a felhasználókon keresztül a hatósági engedélyeztetésben érintett szakértőkön át mindenkitől megköveteli az operatív szemléletváltást (*Horváth 2024a*).

Ezek a változások a számos kihívás mellett rengeteg lehetőséget is magukban rejtnek, amelyek feltérképezése és tudományos igényű vizsgálata katonai és nemzetvédelmi érdekeket szolgál, mivel nagymértékben hozzájárulhatnak a XXI. század újszerű harcászati eljárásainak optimalizálásához, valamint ezen keresztül a béke- és a békétől eltérő időszakokban szükséges információk uralomhoz, illetve vezetési fölényhez.

A témaválasztás motivációját az állami célú légi közlekedés területén eddig felhalmozott több, mint tízéves tapasztalatom szolgáltatja, amely a hazai és hadműveleti területen szerzett katonai légiforgalmi irányítói gyakorlaton túlmenően magában foglalja a NATO és az Eurocontrol szakmai testületeiben (NATO Air Traffic Management – Communication Navigation Surveillance

Advisory Group, Eurocontrol Military Air Traffic Management Board, Joint Civil-Military Air Traffic Management Coordination Committee) elvégzett munkát, a katonai légiforgalmi szolgálatok céllenőrzését és a légiforgalom-szervezésben érintett polgári féllel (HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt., HC Zrt.) való kapcsolattartást, illetve a részvételt a velük közös kutatás-fejlesztési projektekben. Ezek keretében – többek között – részt vehettem a NATO helyfüggetlen repülőtéri irányítással összefüggő állásfoglalásának szakmai előkészítésében, az Innovációs és Technológiai Minisztérium által életre hívott Drón Koalíció UTM/U-Space munkacsoportjának munkájában, a SESAR 2020 projekt keretében a „Multiple Remote Tower” validációs eljárásában, valamint számos, kibervédelmi relevanciával rendelkező repülőszakmai tanfolyamon (IATA Aviation Cyber Security, IANS Cyber Security in ATM).

Ez a három terület – a helyfüggetlen toronyirányítás, az UTM-rendszerek és a pilóta nélküli légi járművekkel szembeni védelmet szolgáló C-UAS-megoldások – mind diszruptív, azaz felforgató hatású technológiák, amelyek alapjaiban formálják át a légi közlekedés működését. Mivel mindegyiknek jelentős védelmi-ipari vonatkozásai is vannak, kutatásuk nemcsak polgári, hanem katonai és ipari stratégiai szempontból is indokolt.

Kutatási módszerek

Kutatásomat megalapozó munkám során elsőként a témához kapcsolódó hazai és nemzetközi szakirodalmat, jogszabályokat, intézményi belső szabályozókat, valamint különféle online és nyomtatott adatbázisokat, forrásanyagokat dolgoztam fel. Ezt követően az eredményeket folyamatosan összevettem és elemzem, hogy a kutatási témát mind elméleti, mind gyakorlati aspektusok figyelembevételével holisztikusan vizsgálhassam. A részleteiben megismert elemeket logikailag koherens egésszé szervezem, egymásra épülve, strukturált módon. Elemzéseim során egyaránt alkalmazok induktív és deduktív logikai megközelítéseket: az egyedi adatokból általános érvényű következtetéseket vonok le, miközben a már ismert általánosságokat konkrét esetekre is visszacsatolom. A kutatás szerves részét képezi egy többrétű, empirikus vizsgálat, amelyet a szakirodalmi háttéranyagok széles körű feldolgozása előz meg. E kutatás során célzott tanulmányutak keretében személyes tapasztalatokat szerzek és interjúkat készítek a hazai és nemzetközi állami és a komplementer szervek vezetőivel, ezzel is erősítve a vizsgálat gyakorlati megalapozottságát.

A kutatás holisztikus áttekintése

Az NVKDP keretében végzett kutatásom során alapvetően az alábbi alfejezetekben bemutatott három fő tárgykör vizsgálatára került sor.

Helyfüggetlen repülőtéri irányítás

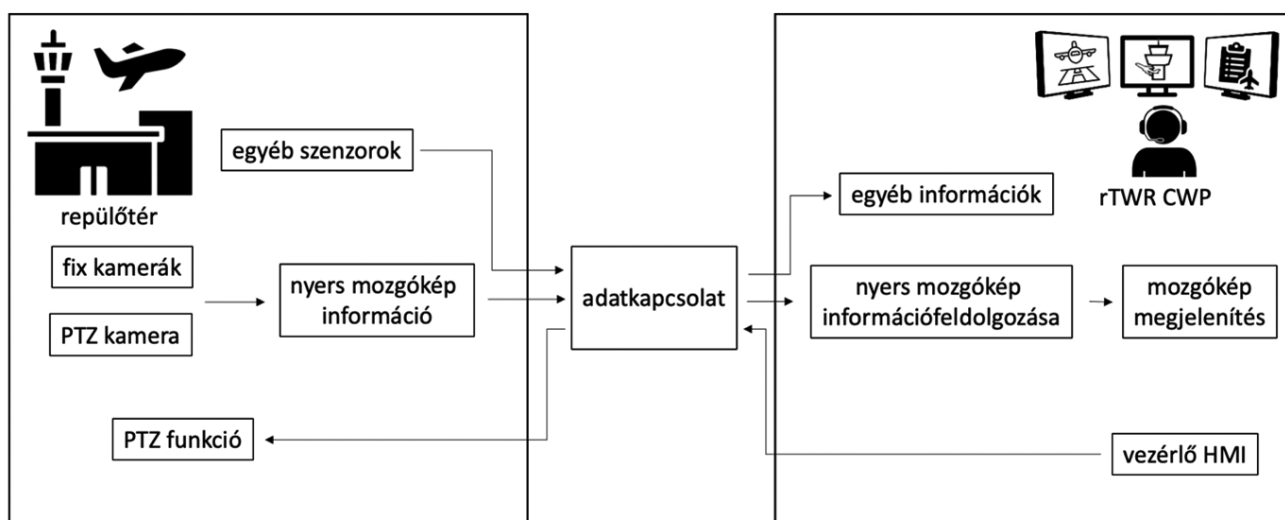
Ahogy arra az elnevezés is következtetni enged – függetlenül attól, hogy polgári vagy katonai repülőtérrel van szó –, a helyfüggetlen repülőtéri irányítás, valamint a hagyományos légiforgalmi irányítótornyból biztosított szolgáltatás között az alapvető különbség a vizuális felderítés módjából adódik (*van Schaik et al. 2016*). Utóbbi a konvencionális megközelítést alkalmazza, vagyis alapvetően az emberi szem segítségével, közvetlen vizuális észlelés útján felügyelik a légi forgalmat a repülőtér területén található toronyból. Ezzel szemben az előbbi megoldás esetében a felelősségi körzetbe tartozó területet a légiforgalmi irányítók digitális képképző eszközök – elsősorban kamerák – segítségével figyelik meg. A nevezett eszközök a repülőtér területén belül kerülnek elhelyezésre, és alapvetően – de nem kizárólag – az elektromágneses spektrum látható tartományában operálnak. A kamerák által rögzített mozgóképek vezetékkel, vezeték nélküli vagy hibrid adatkapcsolaton keresztül kerülnek továbbításra az irányító munkaállomáshoz (Controller Working Position, CWP), amely a repülőtértől függetlenül helyezhető el. Fontos hangsúlyozni, hogy az említett rTWR CWP nem csupán a képi információk valós idejű megjelenítésére szolgál az irányítás támogatása érdekében, hanem egy integrált, számos megfigyelési és irányítási funkciót összefogó munkaállomás (*Heintz-Eißfeldt 2022*). Feladatai közé tartozik a kommunikációs rendszerek kezelése, a radaralapú légtérelenőrzés és a repülési adatok megjelenítése, a riasztási rendszerek üzemeltetése, a meteorológiai információk integrálása, a különféle operatív eszközök és automatizmusok alkalmazása, valamint az esemény- és az incidensnaplók rögzítése. Ennek alapján az 1. ábra koncepcionális blokkdiagramként foglalja össze az rTWR-rendszer működését.

A NATO vonatkozó állásfoglalása (*Initial Position on Remote Tower Services concept 2015*) a több évtizedes ka-

tonai tapasztalatokat ötvözte a távérzékelés és a távoli irányítás terén a helyfüggetlen repülőtéri irányítás disruptív megközelítésével. Ez a szemlélet tette lehetővé az rTWR katonai potenciáljának kibontakozását, amelynek fő jellemzői a reziliencia és a telepíthetőség, így ennek eredményeként – katonai értelemben – meg kell különböztetni a stacioner és a telepíthető rTWR-megoldásokat (*Horváth 2024a*).

Stacioner rTWR esetében a repülőbázis, valamint az ezzel összefüggésben kiépített helyfüggetlen központ az adott országon belül található, ahonnan az általános és a műveleti követelményeknek megfelelő katonai légiforgalmi szolgáltatással szemben felmerült katonai igények egyaránt kielégíthetők. Ennek előnye, hogy nagyban támaszkodhat a már meglévő infrastruktúra rendelkezésre állására, ami elősegíti a kritikus rendszerek védhető és redundáns kiépítését. Ugyanakkor – főként közös felhasználású polgári-katonai repülőtér esetében – elkerülhetetlen, hogy a rendszer megfeleljen a polgári légi közlekedés rigorózus követelményrendszerének is.

A konvencionális irányítótornyról elmondhatjuk, hogy a légiforgalmi irányítás szimbóluma, amely ferde ablakaival és körpanorámát biztosító kilátásával sem téveszthető össze egy adott repülőtér épületei között. Békeidőben ez a torony tiszteletet parancsol, békétől eltérő időszakban azonban könnyen beazonosítható, funkciójában nehezen pótolható, és éppen emiatt nagy értéket képviselő célponttá válik, amelynek védelme különösen nehéz feladat. Egy átlagos repülőtéren a hagyományos irányítótorny megsemmisítésének eredményeként – az érintett felelősségi terület vonatkozásában – a légiforgalmi szolgáltatások biztosítása nem megoldható. Ezzel szemben egy jól kiépített rTWR-konfiguráció számos kisebb, nehezen felderíthető, ugyanakkor könnyebben védhető és funkcionálisan redundáns egységből tevődik össze, és ezek együttesen jelentősen növelik



1. ábra | Az rTWR-konceptió elvi felépítése

Forrás: Horváth 2023a

a repülőtérről összefüggésben biztosított légiforgalmi szolgáltatások rezilienciáját.

Ezzel szemben a telepíthető rTWR-konceptió potenciálja inkább műveleti környezetben realizálható, vagyis olyan szituációkban, amikor a légiforgalmi szolgáltatást elfoglalt repülőbázisokról vagy más, speciális rendeltetésű leszállóhelyekről kell biztosítani. Ebben a környezetben – az ellenséges tevékenység mellett – az adott infrastruktúra minőségi és mennyiségi adottságai jelentik a legnagyobb kihívást. Mindazonáltal a helyfüggetlen megoldások alkalmazása kulcsfontosságú lehet a műveleti területen nyújtott légiforgalmi szolgáltatások rezilienciájának erősítésében és az erők védelmében, mivel a katonai légiforgalmi irányítók a veszélyeztetett térségtől távolabb, védett vagy biztonságos létesítményekben látják el feladataikat. Érdemes azt is hangsúlyozni, hogy a telepíthető rTWR hatékony alkalmazása jelentősen elősegíti az erőforrások gyors és hatékony elosztását, lerövidíti az operatív döntéshozatali ciklusokat, valamint optimalizálja az időtényezőt, ami a műveletek szempontjából kritikus fontossággal bír. Technológiai értelemben a telepíthető rTWR legfőbb kihívása az adatátvitel területén jelentkezik: a műveleti környezetben elérhető korlátozott sávszélesség alapvetően befolyásolja az alacsony késleltetési igényű és viszonylag nagy adatcsomagként realizált mozgóképek továbbítását. További kiemelt szempont a különböző rTWR-megoldások kibervédelmének biztosítása (Horváth 2023b), valamint a NATO hálózatalapú képességrendszerébe történő zökkenőmentes integrációjuk.

Drónneutralizáció

A kis méretű, pilóta nélküli légi járművek (sUAS) számára exponenciális növekedése nemcsak új lehetőségeket, hanem komoly biztonsági kihívásokat is teremtett, amelyek egyre inkább átformálják a légterek ellenőrzésének és védelmének hagyományos megközelítéseit (Kumar 2020). A drónokkal szembeni védekezés, azaz a Counter-Unmanned Aircraft System (C-UAS) rendszerek kiépítése ma már nem csupán katonai, hanem közbiztonsági és polgári szempontból is stratégiai fontosságú feladat (Grieco et al. 2024). A drónneutralizációs képességek fejlődése a kutatás eredményeként felvázolt keretrendszeren belül kulcsszerepet játszik. Az sUAS-neutralizációval összefüggésben meg kell különböztetnünk a következő eljárásokat: (1) „soft” (puha, nem kinetikus) és (2) „hard” (kemény, kinetikus).

A puha (soft) neutralizáció olyan nem fizikai, jellemzően elektronikai vagy kibertámadási eljárásokat foglal magába, amelyek célja a drón működésének megzavarása, ártó szándékaitól való eltérítése vagy irányításának átvétele anélkül, hogy fizikai károsodást okoznánk. Ide tartozik többek között a zavarás (jamming), a megtévesztés (spoofing), valamint a rendszerszintű behatolás (hacking). Ezek a technológiák különösen nagy jelentőséggel bírnak sűrűn lakott területek vagy a kritikus inf-

rastruktúrák környezetében, ahol az elsődleges szempont a járulékos károk elkerülése (Wang et al. 2021).

Jamming esetében rádiófrekvenciás jelek generálásával történik a drón kommunikációs vagy navigációs rendszerének működésképtelenné tétele. E módszerek előnye a viszonylag egyszerű telepíthetőség és a nem destruktív jelleg, ugyanakkor korlátozzuk, hogy csak meghatározott frekvenciatartományokban hatásosak, és egyes esetekben más elektronikus eszközök működését is befolyásolhatják (Siti et al. 2018). A spoofing célja megtévesztő jelek kibocsátása, amelyek révén a drón helymeghatározása vagy irányítása manipulálható. Ez kifinomult protokollismeretet igényel, de lehetőséget nyújt a drón „elvezetésére” vagy irányított leszállítására is (Pistoiu 2021). A hacking módszerek viszont mélyebb, rendszerszintű támadást jelentenek, amelyek során a drón operációs rendszerének gyengeségeit kihasználva a támadó átveheti az irányítást – ezek a módszerek ugyanakkor rendszerspecifikusak (Rodday et al. 2016).

Ezzel szemben a kemény (hard) neutralizáció fizikai eszközökkel történő semlegesítést takar. Két fő kategóriája a kinetikus és az irányított energiájú fegyverek (direct energy weapon, DEW), valamint a fizikai akadályok vagy elfogó rendszerek. A kinetikus megközelítéshez tartoznak a lőfegyverek, az irányított rakéták, illetve olyan elfogódrónok, amelyek céljuk eléréséhez egyszerű ütközést vagy akár robbanást alkalmaznak. Bár ezek hatékonyak lehetnek gyorsan mozgó vagy nagy hatótávolságú drónokkal szemben, alkalmazásuk komoly veszélyt jelenthet a környezetre, különösen lakott területen vagy kritikus infrastruktúrák környékén. Az irányított energiájú fegyverek – például lézerek vagy mikrohullámú sugarak – precíziós képességeket kínálnak, és kisebb az esély a járulékos károokra, azonban költségesek, és technológiai értelemben még nem mindenhol állnak rendelkezésre (Borja 2023). A fizikai akadályok – például hálók, barikádok vagy elfogódrónok – olcsóbb és biztonságosabb alternatívát nyújtanak, telepítésük ugyanakkor helyhez kötött, alkalmazásuk pedig kevésbé rugalmas (Brust et al. 2021).

A fentiek alapján kijelenthető, hogy önmagukban sem a soft, sem a hard neutralizációs módszerek nem adnak univerzális választ a drónfenyegetésekre. A kihívások sokrétűsége miatt integrált megközelítésre van szükség, amely figyelembe veszi a fenyegetés típusát, az alkalmazási környezetet, valamint a szükséges reakcióidőt és a semlegesítési művelet kockázatait. Ennek megfelelően egy fejlett C-UAS-rendszer csak akkor lehet eredményes, ha különböző típusú neutralizációs komponensek intelligens összehangolásán alapul – a fenyegetés jellegének megfelelően dinamikusan választva a legmegfelelőbb taktikát. A kutatás tehát arra a felismerésre épül, hogy a kis drónok semlegesítése nem pusztán technológiai kérdés, hanem komplex rendszertervezési kihívás is. A jelenlegi trendek azt mutatják, hogy a jövőben várhatóan azok a rendszerek válnak meghatározóvá, amelyek képesek a felderítés és a neutralizáció moduláris, rugalmas és

skalázható integrációjára, lehetővé téve a gyors és árnyos válaszlépéseket. Ennek kulcsa egyrészt a mesterséges intelligencián alapuló célazonosítás és fenyegetésértékelés, másrészt a különféle neutralizációs technológiák egy rendszerbe integrálása.

UTM-rendszer

A kis méretű, a műszeres repülési követelményeknek nem megfelelő, pilóta nélküli légi járművek forgalommenedzsmentje, valamint légtér-integrációja hívta életre az úgynevezett Unmanned Traffic Management (UTM) koncepciót (Bernard et al. 2024). A teljes spektrumot lefedő, hatékony UTM-ökoszisztéma (Acceptable Means of Compliance and Guidance Material... 2022) kialakítása azonban elképzelhetetlen a (hon)védelmi szempontrendszer meghatározása és integrálása nélkül. A rendszer alapját a valós idejű adatmegosztás és információáramlás képezi, amelybe számos szereplő kapcsolódik be: operátorok, szolgáltatók, légtérelenőrző szervezetek (Robács et al. 2018). A katonai szereplőknek ilyen környezetben nemcsak alkalmazkodniuk kell, hanem a szükséges mértékben formálniuk is kell a szabályozást, a technológiai fejlesztést és az implementációt. A témakörrel összefüggésben végzett kutatás (Horváth 2024b) beazonosította a fegyveres erők különböző szerepköreit a légi közlekedésben, amelyeket közvetlenül interpretálni lehet az UTM vonatkozásában is. Ennek alapján (1) légi navigációs szolgáltatóként biztosítják a felelősségi körzetükben tevékenykedő drónok feladat-végrehajtását, és azonosítják a nem kooperatív, pilóta nélküli légi járműveket; (2) légtérhasználóként jelentős mennyiségű, változatos képességű katonai drónt üzemeltetnek a viszonylag egyszerű rendszerektől kezdve a műszeres repülési követelményeknek megfelelő variánsokig; (3) repülőtér-üzemeltetőként és -üzembentartóként komoly infrastruktúrával rendelkeznek, ami magában foglalhatja az sUAS-neutralizációval összefüggő rendszereket is, és az ebből származó adatok – a nem kooperatív elemek azonosítása céljából – célszerűen integrálhatók az UTM-rendszerbe; (4) szabályozó hatóságként az állami célú légi közlekedés igényeit és érdekeit szem előtt tartva alakítják az UTM-vonatkozású szabályozást és az ezzel összefüggő munkacsoportok feladatait; valamint (5) kibervédelmi szereplőként – a jellemzően nyílt hozzáférésű – UTM-rendszerek védelméhez is hozzájárulnak.

Mindezek alapján megállapítható, hogy a katonai szempontok UTM-be történő integrálása elengedhetetlen annak érdekében, hogy a rendszer ne csupán gazdaságos és technológiailag korszerű, hanem védett és nemzetbiztonsági szempontból is megbízható legyen. Az UTM jövője azon múlik, hogy a polgári és a védelmi szférát képviselő szereplők képesek-e közösen, egyensúlyra törekedve kialakítani és működtetni egy átfogó, ellenálló és adaptív légiforgalom-szervezési struktúrát.

A kutatás védelmi-innovációs hasznosíthatósága

Az előző fejezetben bemutatott három tárgykör vonatkozásában kutatásom védelmi-innovációs hasznosulására az alábbiak szerint került sor, további hasznosíthatóságukat pedig a jelen fejezetben leírtak szerint prognosztizálom.

Helyfüggetlen repülőtéri irányítás

Az rTWR-koncepció a katonai légi közlekedés számára nem csupán technológiai áttörést, hanem egyúttal védelmi és innovációs szempontból is paradigmaváltást jelenthet. E rendszerek alkalmazása lehetővé teszi a klasszikus, fizikai jelenlétet igénylő toronyirányítás decentralizálását, ami különösen értékes képességet jelent a fegyveres erők számára mobilitás, rejtettség, redundancia és gyors reagálóképesség tekintetében. A Magyar Honvédség 47. Bázisrepülőtérén (Pápán) telepített rTWR szetup köré épülő kutatás lehetővé tette a technológia katonai célú alkalmazhatóságának vizsgálatát, továbbá kijelölte azokat a fejlesztési irányokat, amelyek mentén a rendszer integrálható a NATO-tagállamok egységes légiforgalmi menedzsmentjébe. Az egyik legjelentősebb hasznosítási terület a Combat Controller Team (CCT) képességfejlesztési program támogatása, amelynek keretében a védelmi és missziós feladatok műveleti spektrumának bővülése várható. A CCT-koncepció lehetővé teszi előkészítetlen, ad hoc leszállóhelyek felderítését, előkészítését és biztosítását, valamint közepes méretű merevszárnyú szállító repülőgépek leszállítását akár nem megengedő műveleti környezetben is. A helyfüggetlen toronyirányítás technológiája ebben a kontextusban kritikus szerepet tölthet be, mivel rugalmas, földrajzilag független légiforgalmi támogatást biztosít.

A kutatás eredményeként több, egymásra épülő tanulmány született, amelyek az interoperabilitási követelmények, a rendszer rendelkezésre állása, valamint a verifikációs eljárások vonatkozásában is megalapozott, rTWR-specifikus javaslatokat fogalmaznak meg. Ezek a publikációk együttesen hozzájárultak ahhoz, hogy a NATO Air Traffic Management–CNS Tanácsadó Testületének munkájában a magyar hozzájárulás kiemelkedő mértékű legyen. A kutatási eredményekkel összefüggő nemzetközi érdeklődést egyértelműen alátámasztja az is, hogy 2023-ban – rendhagyó módon – hazánk adott otthont az említett szervezet ülésének.

Az rTWR védelmi célú alkalmazhatóságának egyik kulcsdimenziója a kibervédelem. Ebből a célból elkészítettem egy forgatókönyv-alapú kockázatértékelést, amelyben kidolgoztam az úgynevezett Scrutiny for Susceptibility and Negligence (S2N) módszertant. Ennek célja, hogy lehetőséget biztosítson a légiforgalom-szervezési rendszerek sebezhetőségi pontjainak strukturált feltérképezésére és a kibertámadások elleni reziliencia-tervezésre, így ez a részkutatás érdemben hozzájárult

a NATO Crisis Management Exercise 2025 (CMX25) gyakorlatával összefüggő forgatókönyvek hazai előkészítéséhez.

Az rTWR-technológia védelmi-innovációs potenciálját tovább erősíti a mobil légiforgalmi tornyokkal való rendszerfúzió lehetősége, amelyet a szlovák iBross gyártóeszközeinek hadműveleti értékelése során vizsgáltak. Ezek a megoldások – például a Csádban tervezett katonai szerepvállalás kapcsán – új dimenziókat nyithatnak a gyorsan telepíthető, teljes értékű légiforgalmi irányítás biztosításában (Lu et al. 2025). Mindezek fényében elmondható, hogy a helyfüggetlen toronyirányítás nem csupán technológiai fejlesztési lehetőség, hanem egyúttal stratégiai képességfejlesztési irány, amely hosszú távon is hozzájárulhat a védelmi szektor hatékonyságának és reagálóképességének fokozásához.

Drónneutralizáció

A drónneutralizáció kérdéskörének vizsgálatával összefüggésben kidolgozásra került az úgynevezett „No Drone’s Sky” koncepció, amely két pilléren építkező, komplex megközelítést kínál a kis magasságon közlekedő kis méretű, pilóta nélküli légi járművek által jelentett fenyegetés kezelésére: felderítés (surveillance) és fenyegetéskezelés (neutralization). Ennek védelmi-innovációs jelentőségét mutatja, hogy a veszélyhelyzeti intézkedések megalapozását célzó 448/2023. (X. 3.) kormányrendelet mentén a koncepció közvetlenül támogatja a kritikus infrastruktúrák drónokkal szembeni védelmének tervezését és operatív végrehajtását.

A kutatás eredményeként kidolgozott neutralizációs eljárások filozófiai alapokra építkező matematizálással kategorizálják a kis méretű drónok potenciális károkozási képességét, majd ennek megfelelően határozzák meg a megfelelő ellenintézkedéseket. Ennek eredményeként lehetővé válik a döntéshozatali eljárások optimalizálása, amely kritikus fontosságú a valós idejű fenyegetéskezelésben. Ez a megközelítés különösen releváns a Magyar Honvédség számára, mivel lehetővé teszi a meglévő védelmi képességek hatékonyabb kihasználását és az új technológiai megoldások integrálását.

Fontos aspektus továbbá a katonai alkalmazhatóság terén a mobilitás és az adaptivitás, amely a különböző méretű és konfigurációjú drónsemlegesítő eszközök alkalmazását, valamint ezek gyors integrálhatóságát teszi szükségessé. Ennek fényében a koncepció nagy hangsúlyt fektet a modularitás elvére: a rendszer komponensei skálázhatók, egymással kombinálhatók és különböző szintű veszélyhelyzetekhez igazíthatók.

A drónneutralizációs kutatás gyakorlati alkalmazása különös jelentőséggel bír az orosz–ukrán konfliktusban tapasztalt drónhadviselési gyakorlatok fényében, ahol tömegesen jelenik meg a kis méretű, kereskedelmi forgalomban is elérhető drónok precíziós csapásmérésre, felderítésre és elektronikai zavarásra történő felhasználása. A „No Drone’s Sky” koncepció keretrendszere lehetőssé-

get kínál arra, hogy a hazai és a NATO-kompatibilis védelmi rendszerek gyorsan reagáljanak a dinamikus változó drónfenyegetettségére. A fenyegetettségi szint alapú döntéshozatal és a modularitás elvére épülő semlegesítési technikák a hadszíntéren való adaptáció szempontjából különösen értékesek lehetnek.

Mindezek alapján kijelenthető, hogy a drónneutralizáció komplex, többdimenziós megközelítése olyan védelmi-innovációs értéket képvisel, amely túlmutat a klasszikus detekció–elimináció logikán. A kutatás által kidolgozott rendszerstruktúrák, döntéstámogató mechanizmusok és kategorizált eljárásrendek egy olyan keretrendszerben alkotnak egységes egészet, amely képes dinamikus módon reagálni a jövő drónfenyegetéseire.

UTM-rendszer

Az UTM-rendszerek vonatkozásában megkerülhetetlennek tűnik ezek védelmi aspektusokat figyelembe vevő értékelése, ami magában foglalja az állami – ezen belül a kifejezetten katonai – célú, pilóta nélküli légi járművek légtér-integrációs kihívásainak megoldását is. A kutatás során az UTM vonatkozásában a legfontosabb tapasztalatokat a magyar rendszer jelenleg is zajló kidolgozásában folytatott szakmai együttműködés, valamint egy izraeli tanulmányút eredményeire épülő esettanulmány (Horváth 2023c) alapozta meg. Ez utóbbi – izraeli katonai és iparági szereplőkkel történt közvetlen egyeztetés révén – rámutatott, hogy a városi és félig ellenőrzött légtérben történő állami drónműveletek kizárólag magas szintű szabályozási, kibervédelmi és adatfúziós támogatással hajthatók végre.

A védelmi-innovációs hasznosíthatóság szempontjából az UTM-rendszer lehetőséget biztosít egy újfajta, adaptív és skálázható légiforgalom-menedzsment létrehozására, amelyben kulcsszerepet kap a katonai és polgári szereplők közötti adatáramlás és koordináció. A kutatás eredményei így nemcsak a jelenlegi integrációs kihívásokra kínálnak megoldást, hanem megalapozhatják egy hosszú távon fenntartható, állami célú drónműveleteket támogató, biztonságkritikus rendszer kialakítását is.

A gyakorlati hasznosítás vonatkozásában fontos állomás az úgynevezett Military IFR RPAS in Hungary elnevezésű projekt, amely azt az ambiciózus vállalatást tűzte ki célul, hogy belátható időn belül integrálja a magyar légtérbe azokat a katonai, pilóta nélküli légi járműveket, amelyek megfelelnek a műszeres repüléssel összefüggő követelményeknek. Ennek keretében a polgári légi navigációs szolgáltató irányítása alatt – eseti légtérben – sor került egy NATO-drón irányítására. A tapasztalatfeldolgozás várható eredményei közül elsődleges lehet, hogy a katonai, pilóta nélküli légi járművek bizonyos feltételek teljesülése esetén eseti légtér igénylése nélkül – vagyis számottevő adminisztratív tehercsökkentés mellett, a műveleti rugalmasságnövelés érdekében – vehessék igénybe a magyar légtér.

További fontos állomásként azonosítható Magyarország UTM-stratégiájának, Drónstratégiájának és Védelmi Drónstratégiájának kidolgozása, amelyhez – egyes részkutatásaim eredményeit felhasználva – közvetlenül hozzájárultam.

Az UTM-rendszerek katonai hasznosítása nem pusztán technológiai kérdés, hanem a védelmi innováció fontos területe is lehet, amely a teljes védelmi infrastruktúra digitális transzformációjában is szerepet játszik. A hazai kutatások, a nemzetközi tapasztalatok és projektek, valamint a támogató NATO-keretek lehetővé teszik, hogy Magyarország élen járjon a katonai célú drónintegráció és az UTM-rendszerek implementációjában.

Összefoglalás

Kutatásom célja, hogy a légiforgalom-szervezést felforgató egyes kulcsterületek vonatkozásában a helyfüggetlen repülőterei irányítástól kezdve a drónneutralizáción keresztül egészen az UTM-rendszerekig feltérképezésre kerüljenek a katonai alkalmazhatóságban és a védelmi célú hasznosításban rejlő potenciálok.

Az rTWR-technológia elemzése rámutatott, hogy ez a megoldás nemcsak a békeidős légiforgalmi szolgáltatások rugalmasságát növeli, hanem válsághelyzetben jelentős redundanciát és rejtettségi potenciált biztosít. Míg a hagyományos irányítótoronyok fizikai sebezhetősége békétől eltérő időszakokban komoly hátrányt jelent, addig a stacioner és telepíthető rTWR-konfigurációk révén a légiforgalmi irányítói funkciók védett helyszínekre helyezhetők át. A kutatás során feldolgozott magyarországi és nemzetközi példák azt mutatják, hogy a technológia védelmi célú alkalmazásának alapfeltétele a reziliens infrastruktúra, a hálózati interoperabilitás és a kibervédelem integrált szemlélete.

A pilóta nélküli légi járművekkel szembeni fenyegetések kezelésére javasolt „No Drone’s Sky” koncepció egy átfogó, többszintű védelmi megközelítést kínál. A kutatás eredményeként kidolgozott soft és hard neutralizációs eljárások kategorizálása lehetővé teszi a fenyegetéssel arányos, adaptív válaszadást, amelynek során a járulékos károkozás minimalizálása kiemelt szempont. A filozófiai-logikai megalapozottságú besorolási rendszer elősegíti az objektív döntéshozatalt a dinamikus változó műveleti térben, valamint támogatja az interoperábilis NATO-standardokhoz illeszkedő eljáráskészlet kialakítását.

Az UTM-rendszerek katonai aspektusból végzett elemzése világossá tette, hogy a biztonságos és hatékony drónintegráció stratégiai jelentőségű. A Magyarországon megkezdett MIRIH projekt célja nem csupán a zökkenőmentes műveleti összehangolás megteremtése, hanem a kormányzati, katonai és ipari együttműködés elmélyítése. A katonai szereplők az UTM-ökoszisztémában nemcsak légtérhasználók, hanem légi navigációs szolgáltatók, repülőter-üzemeltetők, jogszabályalkotók és kibervédelmi aktorok is. Ennek megfelelően az UTM-rendszer fej-

lesztése nem kizárólag technológiai kérdés, hanem komplex védelmi-stratégiai feladat.

Összegzésként megállapítható, hogy a modern légi közlekedési rendszerek diszruptív technológiai új alapokra helyezik a légiforgalom-szervezés hagyományos paradigmáit. A kutatásban bemutatott megközelítések egyaránt hozzájárulnak a hazai védelmi képességek fejlesztéséhez, a NATO-kompatibilitás erősítéséhez, valamint a polgári-katonai szinergiák innovatív kihasználásához. Az eredmények hozzájárulnak a légiforgalmi rendszer digitális transzformációjának biztonságos és hatékony végrehajtásához, számos területen – így a kibervédelem, a missziós támogatás vagy a kritikus infrastruktúra-védelem területén – szolgálva a XXI. századi haderő képességfejlesztési céljait.

Köszönetnyilvánítás

Jelen tanulmány a Kulturális és Innovációs Minisztérium Doktori Program Doktori Hallgatói Ösztöndíjprogramjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



Irodalomjegyzék

- Acceptable Means of Compliance and Guidance Material to Regulation (EU) 2021/664 on a regulatory framework for the U-space (2022). EASA. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/acceptable-means-of-compliance-and-guidance-materials/amc-and-gm-implementing>
- Bernard, St., Cernan, J., Drévilion, H. & Zaharescu, S. (2024) Military and U-Space Guidelines. European Defence Agency. <https://eda.europa.eu/docs/default-source/documents/sc4-final-report-v1-0.pdf>
- Borja, L. J. (2023) High-Energy Laser Directed Energy Weapons. In: A. Gruszczak & S. Kaempf (eds.) Routledge Handbook of the Future of Warfare. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003299011-37>
- Brust, M. R., Danoy, G., Stolfi, D. H. & Bouvry, P. (2021) Swarm-based counter UAV defense system. Discover Internet of Things, Vol. 1. No. 2. <https://doi.org/10.1007/s43926-021-00002-x>
- European Commission Joint Research Centre (2024). Counter-drone systems and data fusion. Publications Office of the EU. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/6037951>
- Grieco G., Amendola D. & Anderson D. (2024). Counter-drone systems and data fusion, Publications Office, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/6037951>
- Heintz, A. & Eißfeldt, H. (2022) Ability requirements for Remote Tower Control – First insights. Transportation Research Procedia, Vol. 66. No. 2. pp. 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.12.016>

- Horváth G. (2023a) A helyfüggetlen toronyirányítás mint a reziliens katonai légiforgalmi szolgáltatás eszköze. *Haditechnika*, Vol. 57. No. 2. pp. 68–72. <https://doi.org/10.23713/HT.57.2.13>
- Horváth, G. (2023b) The cybersecurity aspect of remote tower optical systems. *Acta Avionica Journal*, Vol. 25. No. 1. pp. 45–54. <https://doi.org/10.35116/aa.2023.0006>
- Horváth G. (2023c) Esettanulmány Izraelből: Drónok ellenőrzött légterben. *Közlekedés és Mobilitás*, Vol. 2. No. 2. pp. 89–97. <https://doi.org/10.55348/KM.18>
- Horváth, G. (2024a) Remote Tower: The Development Vision of Location-independent Aerodrome Control Tailored for Military Purposes. *Honvédségi Szemle*, Vol. 152 (Special Issue). No. 1–2. pp. 64–73. <https://doi.org/10.35926/HDR.2024.1-2.5>
- Horváth, G. (2024b) Bridging the Skies: Analyzing Unmanned Traffic Management from a defense-centric perspective. *New Trends in Aviation Development (NTAD) 2024*. Conference paper. IEEE. pp. 56–61. <https://doi.org/10.1109/NTAD63796.2024.10850211>
- Initial Position on Remote Tower Services (RTS) concept AC/92WP-(2015) 0001 (2015) NATO.
- Kumar, A. (2020) Drone proliferation and security threats. *Journal of Asian Affairs*, Vol. 33. No. 1–2. pp. 43–62. <https://www.jstor.org/stable/e27003430>
- Lu, T., Hao, M. & Zhang, Z. (2025) Comprehensive Evaluation of Remote Tower Controllers' Situation Awareness Level Based on the Entropy Weight Method (EWM)–TOPSIS–Gray Relational Analysis Model. *Applied Sciences*, Vol. 15. No. 5. 2623. <https://doi.org/10.3390/app15052623>
- Palik M. (2013) Pilóta nélküli repülés profioknak és amatőröknek. Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Budapest. <https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/handle/20.500.12944/10037>
- Pistoia, D. (2021) Counter UAS systems overview. In: C. Clemente, F. Fioranelli, F. Colone & G. Li (eds.) *Radar Countermeasures for Unmanned Aerial Vehicles*. Institution of Engineering and Technology. SciTech Publishing. pp. 21–43. https://doi.org/10.1049/SBRA543E_ch1
- Rodday, N. M., Schmidt, R. D. O. & Pras, A. (2016) Exploring security vulnerabilities of unmanned aerial vehicles. *NOMS 2016 – 2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*. <https://doi.org/10.1109/NOMS.2016.7502939>
- Rohács D., Fekete T. R. & Dobi S. G. (2018) Az európai UTM helyzete és jövője. *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. 30. No. 2. pp. 189–204. http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_2/2018-2-Repulestudomanyi_kozlemenyek.pdf
- Sliti, M., Abdallah, W. & Boudriga, N. (2018) Jamming Attack Detection in Optical UAV Networks. *20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2018.8473921>
- Van Beek S. (2017). *Remote Towers: A Better Future for America's Small Airports*, Reason Foundation, https://reason.org/wp-content/uploads/2017/07/air_traffic_control_remote_towers-1.pdf
- van Schaik F.J., Roessingh J.J.M., Lindqvist G. és Fält K. (2016). *Detection and Recognition for Remote Tower Operations*. Virtual and Remote Control Tower, Springer International Publishing, https://doi.org/10.1007/978-3-319-28719-5_3
- Wang, J., Liu, Y. & Song, H. (2021) Counter-Unmanned Aircraft System(s) (C-UAS): State of the Art, Challenges, and Future Trends. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 36. No. 3. pp. 4–29. <https://doi.org/10.1109/MAES.2020.3015537>

A cikk a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) feltételei szerint publikált Open Access közlemény, melynek szellemében a cikk bármilyen médiumban szabadon felhasználható, megosztható és újraközölhető, feltéve, hogy az eredeti szerző és a közlés helye, illetve a CC License linkje és az esetlegesen végrehajtott módosítások feltüntetésre kerülnek. (SID_1)