

Műhelytanulmány

Rutinszerű légköri vertikális profilmérések végrehajtására alkalmas drón mérőhálózat kialakítása

Beküldve: 2022.10.13.
Elfogadva: 2022.10.14.
Online közzétéve: 2022.10.24.

- ID DR. BOTTYÁN ZSOLT** vezető kutató-fejlesztő munkatárs, MouldTech Systems Kft., zsold.bottyán@mouldtech.hu
- ID FEKETE CSABA** tanársegéd, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék, fekete.csaba@uni-nke.hu
- ID GYÖNGYÖSI ANDRÁS ZÉNÓ** kutató-fejlesztő munkatárs, MouldTech Systems Kft., andras.zeno.gyongyosi@mouldtech.hu
- ID KARDOS PÉTER** kutató-fejlesztő munkatárs, MouldTech Systems Kft., peter.kardos@mouldtech.hu
- ID DR. TUBA ZOLTÁN** kutató-fejlesztő munkatárs, MouldTech Systems Kft., zoltan.tuba@mouldtech.hu
- ID DR. VAS TÍMEA** tanszékvezető, adjunktus, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék, vas.timea@uni-nke.hu

Absztrakt: A Meteorológiai Világszervezet felmérése szerint komoly adathiány van a légkör függőleges jellemzőit leíró mérésekből, ami az aktuális állapot elégtelen meghatározása mellett kihatással van a meteorológiai előrejelzések pontosságára is. A probléma lehetséges megoldását a Meteorológiai Világszervezet a drónok profilozó célú alkalmazásában látja, aminek érdekében 2024-ben globális mérési kampányt is indít, melyre hazánkban egyedülként a MouldTech Systems regisztrált és kezdte meg ezirányú fejlesztéseit. Cikkünkben a fejlesztés eddigi eredményeinek és az ezek elérése érdekében leküzdött akadályok felvázolása mellett a tervezett mérőrendszer teljes funkcionalitásának és az ennek elérését várhatóan kísérő kihívásoknak a bemutatását tűztük ki célul.

Kulcsszavak: meteorológiai mérőrendszer; drón; vertikális profil; repülésbiztonság

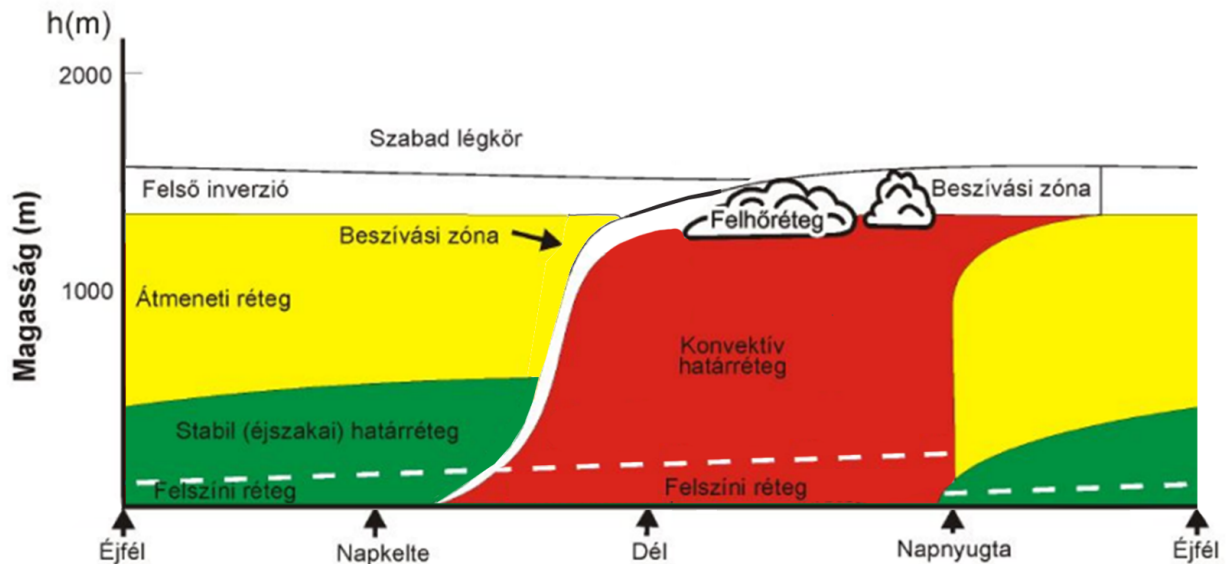
Development of a drone measurement network for routine atmospheric vertical profile measurements

Abstract: According to a survey by the World Meteorological Organization there is a serious lack of data from measurements describing the vertical characteristics of the atmosphere. Which, beside the insufficient determination of the current state, also affects the accuracy of meteorological forecasts. World Meteorological Organization sees the use of profiling drones as a possible solution. That's the reason why they start a global campaign in 2024, from Hungary only MouldTech System registered and started the development in this field. In this study beside the achieved outcomes of the development and the bridged obstacles, we would like to introduce the complete functionality of the measurement network and the related future challenges.

Keywords: meteorological measurement system; drone; vertical profile; aviation safety

Bevezetés

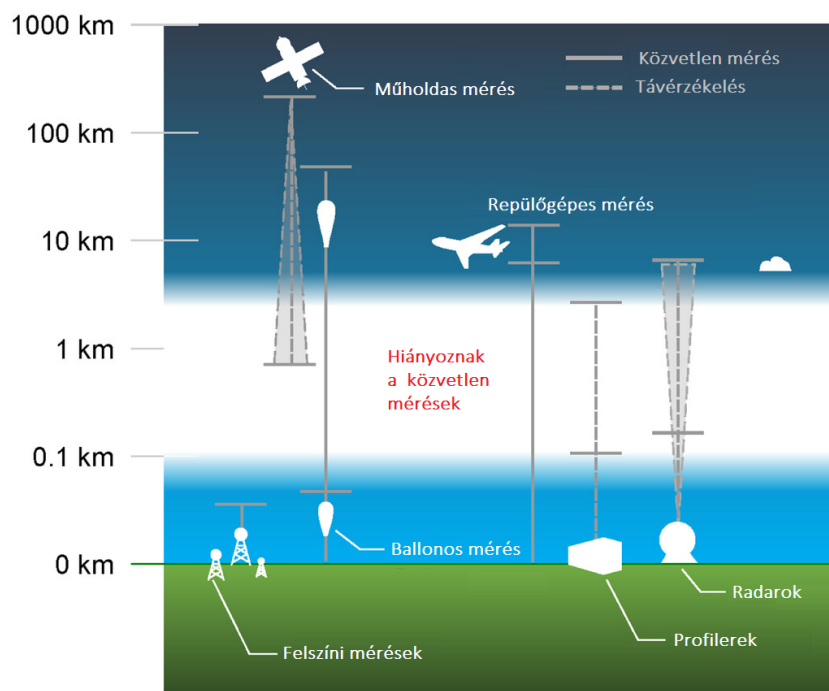
Planetáris határrétegnek (a továbbiakban: PHR) a légkör azon felszínközeli, maximum néhány kilométer vastag rétegét tekintjük (1. ábra), ahol a felszín és a légkör közötti kölcsönhatás közvetlenül kimutatható. A PHR szerepe az időjárás alakításában kulcsfontosságú (és nagyrészt ismert is), hiszen ebben 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 (Bottyán et al., 2016).



1. ábra A planetáris határréteg és annak szerkezete.

Forrás: Bottyán (2016) alapján

Ugyanakkor éppen a mikro- és mezoskálájú időjárási jelenségek, mint például a turbulencia vagy a zivatarok azok, amelyeknek az előrejelzése az élet számos területén kiemelt fontosságú. Ahogyan azonban a Meteorológiai Világszervezet (World Meteorological Organization – WMO) vizsgálata is megállapította (Pinto et al., 2021): éppen a planetáris határrétegben van komoly térbeli és időbeli adathiány a légkör függőleges jellemzőit leíró mérésekben (2. ábra), hiszen a légkörnek ebben a tartományában sokkal inhomogénebb eloszlású, és időben is gyorsabban változó a karakterisztikák értéke; mint a magasabb rétegekben. Az aktuális légköri állapot elégtelen meghatározása pedig nyilvánvalóan hatással van a meteorológiai előrejelzések pontosságára is. Azaz éppen a fentiekben említett, a legnagyobb érdeklődésre számot tartó, kis- és közepes léptékű légköri folyamatok rövid távú prognosztikai pontosságát ütköztetik akadályba a kezdeti feltételek nem megfelelő ismerete miatt (Bottyán et al., 2022).



2. ábra A légkör mérések

Forrás: Pinto et al. (2021) alapján

A magyarországi viszonyokat tekintve, in situ mérésenként, ballonos rádiószondákkal (Budapesten és Szegeden naponta két alkalommal) és repülőgépekre szerelt szenzorokkal (a nagyobb repülőterek körzetében, rendszertelen időközönként) lehet adatokat nyerni a légkör ezen régiójából. Az azonban, hogy ezeknek a méréseknek számát térben és időben jelentősen megnöveljük, több szempont miatt sem realitás. A rádiószondás mérések esetében a költséghatékonyság és a környezetvédelmi szempontok, míg a repülőgépes mérések esetén az a tény a korlátozó tényező, hogy a mérések térbeli elhelyezkedése a repülőterek lokációjához, az időbeli felbontás pedig a járatok menetrendjéhez kell, hogy igazodjon. Kijelenthető tehát, hogy a meglévő adathiány a hagyományosnak mondható eszközrendszerrel ésszerű keretek között nem elégíthető ki. Újszerű, költséghatékony eljárást kell keresni, ami időben és térben is megfelelő mérési felbontást tud garantálni. A megoldást a WMO iránymutatása szerint is a drónos vertikális profilozó mérések jelenthetik. Elképzelésük komolyságát alátámasztja az a tény is, hogy 2024-ben fél év időtartamú, globális mérési kampányt terveznek, amelyre egyetlen hazai résztvevőként a MouldTech Systems Kft. jelentkezett saját fejlesztésű drónos mérőrendszerével.

Cikkünk célja ennek a drónos profilozó mérőrendszernek az áttekintő felvázolása, és a kialakítása során leküzdött akadályok, valamint a jövőbeli kihívások és a várható eredmények bemutatása.

Alkalmazott eszközök

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. Tekintettel arra, hogy sem meteorológiai mérőeszközök drónokra való telepítésére, sem pedig ilyen eszközök mérőhálózatba szervezésére nincs kialakult, standardizált gyakorlat, rendszeres meteorológiai drónos mérőhálózat egyedül Svájcban működik operatíván (Leuenberger et al., 2020), ezért amellet döntöttünk, hogy amit csak lehetséges, azt saját fejlesztéssel, gyártással állítunk elő a tervezett rendszer esetében. Az egyes részegységek bemutatása során ezért az alábbiakban törekszünk a saját fejlesztésű, gyártású elemek tulajdonságainak hangsúlyozására is (Bottyán et al., 2021).

Meteorológiai mérődrón

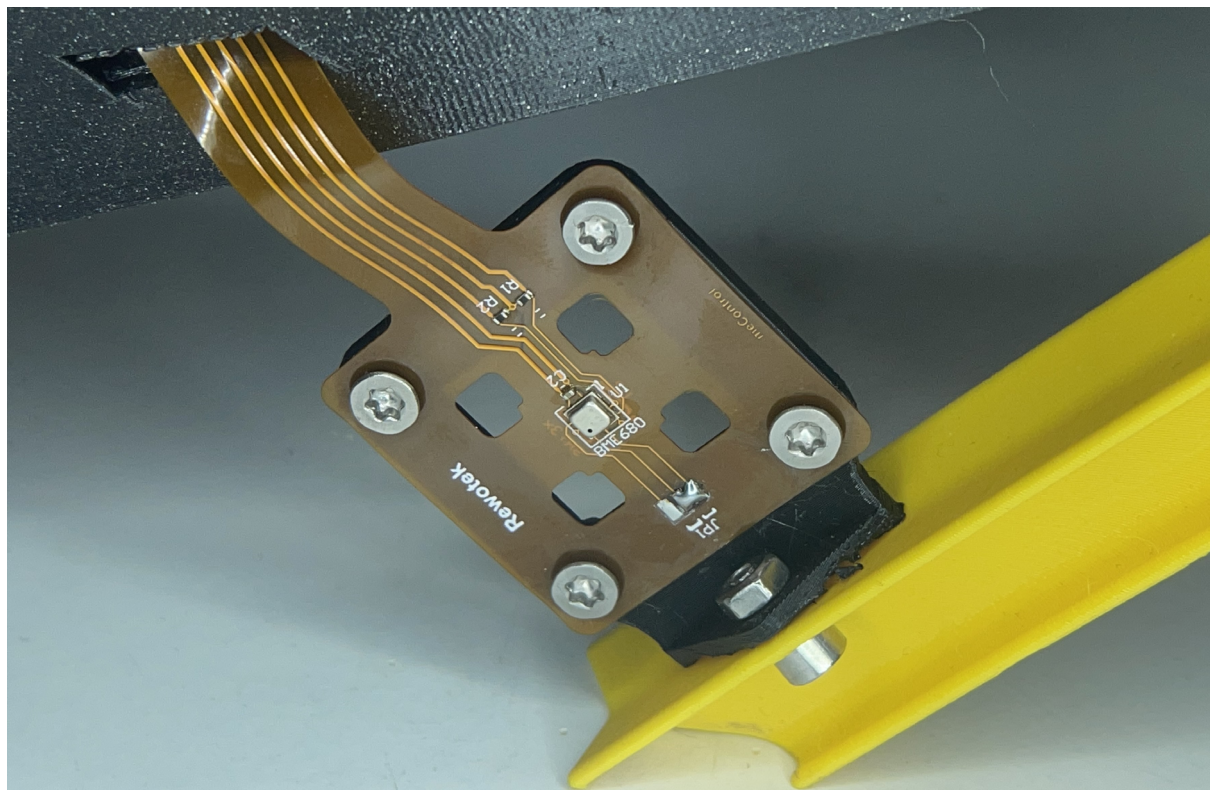
A mérőhálózat legfontosabb eleme egy olyan drón (3. ábra), amely akár néhány óránként képes a PHR vertikális szondázására. Egy ilyen feladat ellátásánál pedig elengedhetetlen a magas hatásfok és a megbízható működés. Ennek megfelelően a kiválasztott motorok kis tömegű, nagy hatásfokú egységek, a hozzájuk párosítható legnagyobb légcsavarral és legnagyobb feszültségű akkumulátorral kerültek tervezésre. A kiválasztott quadrotor kialakítás esetén ez KDE2315-885 motorokat, 12x4 karbon lég-csavarokat, és 4 cellás 6750 mAh kapacitású, LiPo kémiaájú akkumulátort és megfelelő feszültségen üzemelő szénkefe nélküli motorvezérlőt jelent.



3. ábra A meteorológiai mérődrón

Forrás: Bottyán et al. (2022)

A drón szerkezeti kialakításának fontos lépése volt a szenzorok megfelelő fedélzeti rögzítése és az adatgyűjtővel való stabil adatkapcsolat kialakítása. A szenzorok helyének meghatározásakor elsődleges szempont volt, hogy az elhelyezett mérőeszköz kellően reprezentatív módon működjön a környezet felmérése során, azt a drón működésével együtt járó semmilyen termikus vagy dinamikus folyamat ne befolyásolja hátrányosan. Alapos mérleget követően végül a szenzorok a drón lábain kerültek rögzítésre (4. ábra). A szenzorok rögzítési struktúrája és az adatfeldolgozó komponens úgy került kialakításra, hogy egy időben akár 8 darab integrált érzékelő is mérheti a környezet állapotát.



4. ábra A meteorológiai mérődrón szenzor rögzítési megoldása

Forrás: Bottyán et al. (2022)

A drónvezérlés kiválasztásának elsődleges szempontjával a megbízható működést és a nagy fedélzeti számítási kapacitást vettük figyelembe. Ennek megfelelően a választás a Pixhawk Cube Orange repülésvezérlésre, és a hozzá tartozó carrier board-okra esett. Ez nyílt szoftvert futtató rendszer lévén nagy szabadságot biztosít a repülésvezérlés és a további fejlesztések megvalósításának terén egyaránt. Repülés közben a pozicionálást RTK GPS segítségével valósítjuk meg, az egyidejű repülést végző objektumok elkerülésének érdekében, a PixHawk Cube Orange repülésvezérlőhöz integrált ADS-B vevő egység alkalmazása mellett döntöttünk. Ezzel a funkcióval lehetővé válik más, ADSB adóval felszerelt repülőgépek megfelelő időben és távolságban történő észlelése és – szükség esetén – a meteorológiai drón pályájának módosítása is. A rossz látási viszonyok között és/vagy éjszaka történő könnyebb vizuális azonosítás érdekében a drónra zöld színű villanófény került felszerelésre.

A drón teljesen saját tervezésű elemei közül (az elektronikus egységeket, szenzorokat és a légcsavarokat kivéve) a vázrendszert folytonos szálhúzásos kompozit 3D nyomtatással állítottuk elő, amelynek magas szakítószilárdság/tömeg aránya közismert. Az áramlási felületek gyártása SLS nyomtatási technológiával, PA12 alapanyagból történt.

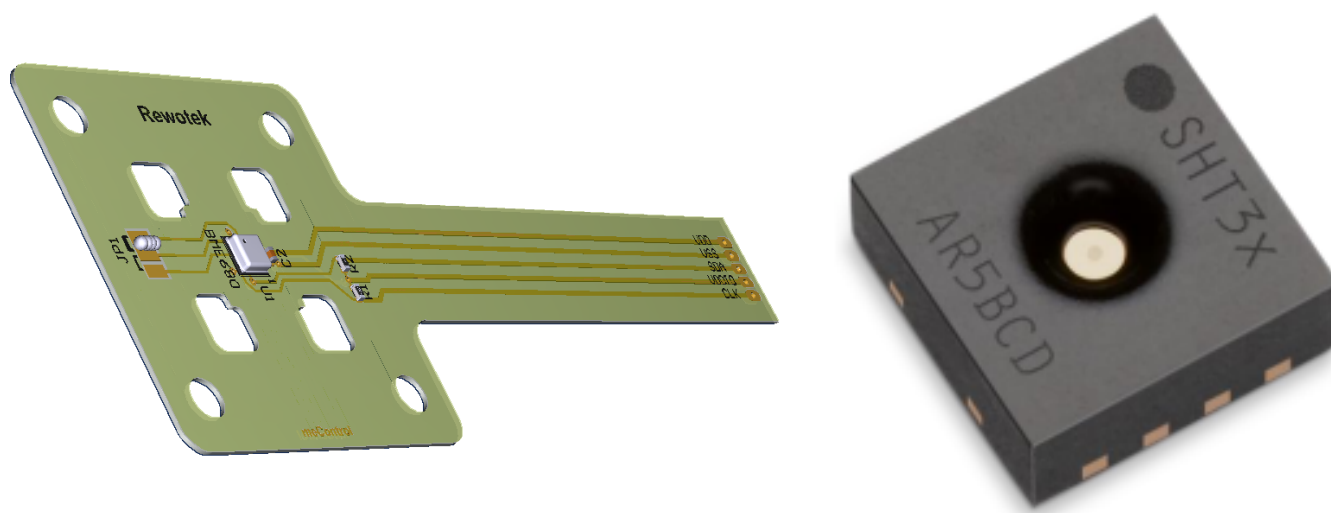
Meteorológiai szenzorrendszer

A szenzorrendszer kialakításánál a hagyományos rádiószondás profilozó mérésekkel szemben támasztott elvárásokat vettük irányadónak. Ez nem csak a vizsgált állapotjelzők kiválasztását, azaz a szenzorok meghatározását, hanem a mérésekkel szemben elvárt pontosságot is alapjaiban determinálta. Ennek megfelelően olyan szenzorrendszer összeállítását végeztük el, ami 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 légcsavarak okozta áramlás figyelembevételéről, úgy döntöttünk, hogy a rádiószondás mérésekhez hasonlóan mérőeszköz nélkül oldjuk meg a levegő mozgási karakterisztikáinak (szélsebesség, szélirány, széllökés) számítását. A ballonos profilozáshoz képest annyi különbséggel, hogy esetünkben nem az elsodródást jellemző vektort, hanem a drón robotpilóta szél ellen tett kompenzáló parancsainak valós idejű telemetriai adatait dolgozzuk fel. Ez a feladat annyiban egyszerűbb a telemetriai adatokból történő szél-információk általános kiszámításához képest, hogy esetünkben a profilozás repülési karakterisztikája kizárólag vertikális irányú elmozdulást tartalmaz, tervezett horizontális komponense nincsen. Azaz minden vízszintes síkban történő elmozdulás a szél ellenében tett kompenzációnak tekinthető.

A szenzorokkal kapcsolatban is elmondható, hogy a repülési üzemidő maximalizálása érdekében a fejlesztés egyik alapvető szempontja az alacsony tömeg és a megbízhatóság volt. Az alacsony hőkapacitás, a kis hiszterézis a drónok nagy vertikális elmozdulási sebessége által támasztott gyors reakció miatt szintén nélkülözhetetlen volt.

Az alkalmazási terület és a repülési körülmények változatossága megkövetelik a szenzorrendszer olyan kialakítását is, amely alkalmasá teszi azt a magas és alacsony hőmérséklet, valamint magas páratartalom környezetében történő üzemelésre is. A szenzorrendszer fejlesztésének további fontos szempontja volt a korrózióállóság, valamint a rotorlapátok által gerjesztett intenzív légmozgásnak ellenálló robusztus mechanikai kialakítás. A követelményrendszer vizsgálata alapján a fenti kritériumoknak megfelelő Bosch680 (T, Rh, p) és Sensirion SHT35 (T, Rh) mérőérzékelők (szenzor chippek) kerültek. A szenzorokat fogadó nyomtatott áramkörti lap úgy került megtervezésre, hogy mindkét mérőérzékelő elhelyezhető rajta egyidőben, de készíthető szenzorrendszer csak BME680 vagy csak SHT35 érzékelővel is.



5. ábra A fólianyákra integrált BME680 szenzor és az SHT35 érzékelő

Forrás: Bottyán et al. (2022)

A szenzorrendszer fedélzetre történő installációja a quadrokopter rendszerű kísérleti drónra megtörtént és alacsony magasságon az első próbákat el is végeztük vele.

Adatkommunikáció

A repülés közben mért meteorológiai adatokat és a szél paraméterek meghatározásához szükséges telemetriai információkat a fedélzeten memóriakártyára rögzítjük, de valós időben is lesugározzuk irányított WiFi, illetve peer-to-peer LoRa hálózaton keresztül. Az adatkommunikációs rendszer implementálása során figyelnünk kellett a stabil adatkapcsolat fenntartására és az EU szabványoknak való megfelelésre, ezért a választás az 868MHz-es tartományban szórt spektrumú SX1262 LoRa HAT adatátviteli moduljára esett. Ezen modulok nagy (akár 80km) hatótávolságú adathidat képesek biztosítani repülés közben (Károly, 2019), ami biztonságosan megfelel a tervezett repülési feladat végrehajtásához. Ez utóbbihoz az Antenna Hungária hálózatát használhatjuk tesztelési céllal a Zalaegerszeg-Andráshida repülőtérré tervezett mérési helyszínen.

A mérőhálózat kialakításának nehézségei

A mérőhálózat kialakítása során a megfelelő műszaki és meteorológiai, szakmai szempontból releváns megoldások kialakítása mellett komoly erőforrásokat kellett hozzárendelni a fenti kategóriákon kívül eső akadályok, nehézségek leküzdéséhez. Az üzemeltetés kereteinek és az operatív mérések szabályszerű végrehajtásának ugyanis számos, a műszaki és meteorológiai témakörökkel csak közvetett módon kapcsolatban álló terület szabott jogos feltételeket. A következő alfejezetekben ezeket a problémaköröket és megoldásukat részleteiben is kifejthetjük.

A jogos repülés keretei és korlátai

A pilóta nélküli légi jármű rendszerek (továbbiakban: UAS Unmanned Aircraft Systems) légköri mérésekre való dinamikus-, igény szerinti-, akár egy időben több helyszínről történő alkalmazásának egyik akadályozó tényezője a jogszerű UAS repülések végrehajtásának szabályozási háttere. Ehhez egyrészt hozzátartozik az UAS hatósági regisztrációjához szükséges tanúsítási, besorolási eljárás lefolytatása, másrészt a légtérhasználatra jelenleg rendelkezésre álló feltételek. Ahhoz, hogy a fent említett eljárások sajátosságait bemutassuk, előzetesen át kell tekintenünk a meteorológiai méréseket végző drón repülési karakterisztikáit.

A mérődrón egy VTOL (Vertical Take Off and Landing) pilóta nélküli légi jármű (továbbiakban: UA - Unmanned Aircraft), melynek maximális felszálló tömege (MTOM- Maximum Take Off Mass) 3000 g, hasznos teher nélküli tömege pedig kb. 2600 g. A légi jármű hasznos teherként a már bemutatott meteorológiai szenzorokkal van felszerelve. A felszállást a földről távpilóta vezérli, majd ellenőrzi, mivel az UA automatizált látótávolságon túli repülést hajt végre BVLOS (Beyond Visual Line of Sight) szabályok szerint. A függőleges profilú pályán folyamatos 5-8 m/s-os sebességgel emelkedik. Az elérni kívánt magasság, a téli és nyári időszakról függően változhat, igazodva a PHR magasságához, de ez nem haladná meg a 2500 métert AMSL (Above Mean Sea Level)-t, ami az év minden szakában biztosítaná az előrejelzések pontosításához szükséges adatok begyűjtését. Ennek a magasságnak az eléréséhez kb. 4-8 perc szükséges. A mérési maximum magasság elérése után az eszköz folyamatosan süllyed, ami a fent említett 5-8 m/s sebességnél lassabban, kb. 4 m/s sebességgel történik. Az elvégzett számítás alapján kijelenthető, hogy az mérődrón 34kJ alatti kinetikai energiával rendelkezik, amit a műveleti besorolás és későbbi kockázatelemzés miatt fontos leszögezni (Vas et al., 2021a; 2021b).

Mivel az UA egy kísérleti prototípus, ami a piacon jelenleg elérhető típusoktól eltérően szélsőségesebb időjárási határértékek mentén is képes repülést végezni, hatósági tanúsítási eljárásról kell majd átvennie. A tanúsítás során, amelyet az illetékes polgári légügyi hatóság végez, gyakorlatilag a hagyományos légi járművekre előírt normák szerint, vizsgálat alá kell vonni az UA-t, mint légi járművet (típusalkalmassági vizsgálat), a tervezési és gyártási körülményeket, illetve annak karbantartási és folyamatos légi alkalmasságát biztosító rendszerét. A hatóság az előírásoknak való megfelelést tanúsítványokkal igazolja. Az UA típusáról az eljárás lefolytatását követően ún. típusalkalmassági bizonyítvány kerülhet majd kiadásra, a tervezés, gyártás és karbantartás vonatkozásában pedig szervezeti engedélyek, amelyek birtokában kimondható, hogy az eszköz biztonságos és légi közlekedésre alkalmas.

A mérődrónt, ahogyan azt a tervezett repülési profil is bizonyítja, nem lehet üzemeltetni a nyílt kockázati kategória szabályai szerint, hiszen a repülési magasság a mérések során meghaladja a 120 méter magasságot terep felett (AGL-Above Ground Level). Ezért vizsgálni kell, hogy az uniós keretrendelet¹ adta határok között melyik műveleti kategóriába sorolható be az eszköz.

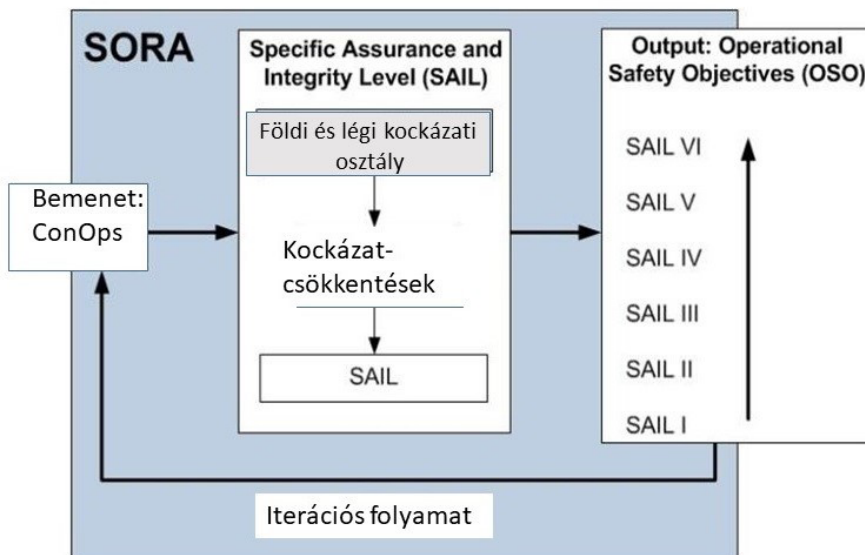
Az üzemeltetés történhet speciális műveleti kategóriában, mivel az UA repülési magassága több, mint 120 méter, és a drón jellemző mérete sem haladja meg a 3 métert. A drón ebben a műveleti kategóriában üzemeltethető BVLOS-ban is, ami az esetleges felhőzet és a nagy vertikális magasság miatt alapfeltétel. A speciális kategóriában történő üzemeltetés egyik alapfeltétele a Műveleti Leírás (OM-Operation Manual), melyet a polgári légügyi hatóságnak el kell fogadnia a repülési műveletek végrehajtása előtt.

Az OM-nek tartalmaznia kell a kérelmező szervezet leírását, viszonyát a repülésbiztonsághoz, a művelet teljeskörű leírását (ConOps-Concept of Operation), és egy részletes kockázatelemzést is, melyet a végrehajtási rendelet² 11. cikke alapján kell elvégezni SORA-alapú kockázatelemzéssel (Specific Operating Risk Assessment). Fontosabb elemei még az OM-nek a normál és rendkívüli eljárások, a Vészhelyzeti Reagálási Terv (ERP-Emergency Response

¹ 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 üzemeltetéséről

² A BIZOTTSÁG (EU) 2019/947 VÉGREHAJTÁSI RENDELETE (2019. május 24.) A pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról

Plan), a műveletbe be nem vont emberek védelme és a naplózási szabályok. A kockázatelemzés iteratív eljárás, melynek során figyelembe kell venni a ConOps leírásait, a repüléssel érintett terület jellemzőit, az aktuális terület feletti légtér szerkezetet, a közeli repülőtereket, és a korlátozott vagy veszélyes légtereket is. A fentiek mellett fontos tényezők még az alkalmazott drón fizikai jellemzői. Mindezeket figyelembe véve a kockázatelemzés végeredménye egy Speciális Bizonyossági és Integritási Szint elérése (SAIL-Specific Assurance and Integrity Level), mely figyelembe véve a fentebb felsorolt tényezőket, egy együttes kockázati értéket mutat meg a repülési művelet egészére kihatóan (EASA, 2022). A speciális kategóriára vonatkozó SORA szerinti kockázatelemzés folyamatát szematikusan az 5. ábra mutatja.



6. ábra SORA szerinti kockázatelemzés

Forrás: Nikodem, Florian et al. (2018)

Abban az esetben, ha a kockázati értékek meghaladnak egy bizonyos értéket a kockázatcsökkentések során a megfelelő Üzemi Biztonsági Célok (OSO-Operational Safety Objective) alkalmazásával, amelyek vonatkozhatnak például a repülési körülmények, időjárási viszonyok állapotára, a repülés végrehajtásának működési korlátjaira vagy a távpilóták kompetencia szintjének növelésére, csökkenthető az összkockázat mértéke.

Előfordulhat olyan eset azonban, amikor a SORA alapú kockázatelemzés során a GRC (Ground Risk Class- Földi kockázat Mértéke) magasabb mint 7, vagy az OSO-k kínálta kockázatcsökkentési eljárások figyelembe vehetők, de nem a megfelelő robusztussággal teljesülnek, ekkor az adott repülés már nem hajtható végre a speciális műveleti kategória keretein belül.

Mivel a jelenlegi szabályozás a nyílt és a speciális kockázati kategória kiindulási kereteit teremti meg, célszerű a repülés helyszínét úgy megválasztani, hogy az a sűrűn lakott településektől, a kritikus infrastruktúrától távol legyen kijelölve. Ezzel garantálni lehet a művelet speciális és engedélyköteles kategóriában maradását, ami a hagyományos légi járművekkel egyenrangú tanúsítási eljárás alá vonná az UA hatósági regisztrációját és műveleteit.

A speciális kategóriában való repüléshez a távpilótának jogszabályban³ előírt hatósági vizsgálattal kell rendelkeznie, emellett kellő jártassággal is, ami lehetővé teszi a felmerülő kockázatok csökkentését. A jártasság, illetve a kompetencia ez esetben azt jelenti, hogy a távpilóta nem csak a normál repülési műveletek végrehajtására képes, hanem a váratlan helyzetekben a vészhelyzeti eljárást leíró forgatókönyv alapján tud eljárni. Továbbá a távpilótának ismernie kell nemcsak az UA típus műszaki jellemzőit, hanem az üzemeltető szervezet által végzett feladatok jellemzőit is, különös tekintettel a kockázatelemzés tárgyát képező műveletfajtákra. Emellett tud csapatban dolgozni, a repülést érintő adatok tekintetében koordinálni, együttműködni a légtér gazdálkodásban és légiforgalomban érintett szolgáltatókkal.

³ 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

Fontos megemlíteni, hogy a speciális kockázati kategória bevezetésekor az unió első körben csak az STS-1 és STS-2 forgatókönyvek szerinti repülések végrehajtásához adja hozzájárulását, amelyeket kizárólag a 120 m alatti repülésekre definiáltak. A kockázatértékelési és -kezelési eljárások azonban egy másik módszer alkalmazását is lehetővé teszik, a már említett EASA (2022) kiadvány alapján, mégpedig a PDRA (Pre-defined Risk Assessment) szerinti kockázatértékelési eljárást.

Míg az STS-ek részletesebben írják le a műveleti kockázatokat és az azok enyhítését célzó módszereket a SORA alkalmazásával, a PDRA-k rendelkezései meglehetősen általánosan vannak leírva annak érdekében, hogy rugalmasságot biztosítsanak az UAS repülések számára. Az üzemeltetők és az illetékes hatóságok korlátozásokat és rendelkezéseket állapíthatnak meg, amelyek igazodnak a tervezett sajátosságokhoz és tevékenységekhez. Olyan UAS operátorok számára célszerű ezt a megoldást választani, akik még nem rendelkeznek az STS-ekben a műveletekhez előírt CE⁴ besorolással vagy saját építésű eszközzel repülnek.

1. táblázat PDRA G02 összefoglaló táblázata

PDRA	Kiadás dátuma	UAS karakterisztikája	BVOL/VLOS	Terület jellege	Távoli pilótától való távolság	Maximális magasság	Légtér	AMC
PDRA G02	2021. július	3 m fesztávolság alatt és 34 kJ alatti kinetikai energia	BVLOS	ritkán lakott	N/A	Amit a lefoglalt légtér magassága lehetővé tesz	Műveletre lefoglalt légtér	AMC 3

Forrás: EASA (2022) 39. o. alapján

A fenti összefoglaló táblázatban is látható, illetve maga a 120 méter AGL feletti repülési magasság is alátámasztja, hogy a szükséges kockázatelemzés elvégzése, és a repülés végrehajtásához szükséges hatósági engedély rendelkezésre állásának ellenére a műveletet csak az erre a célra kijelölt légtérben lehet lebonyolítani. Mivel a felszállási terület, esetünkben a zalaegerszeg-andráshidai repülőtér, nem rendelkezik saját légtérrel, amit UAS repülésekre is lehetne használni, amennyiben azt a hatóság által elfogadott repülőtérrendben feltüntetik, egyetlen megoldásként az eseti légtér kijelölése szolgálhat. Az eseti légtér – ami az egyéb, légiközlekedési tevékenységektől eltérő repülésekre jelölhető ki – az egyetlen megoldás jelenleg az olyan repülésre veszélyes tevékenységek végrehajtására, amelyeket az ország területe felett bárhol, a rendeletben⁵ veszélyes tevékenységekre kijelölt légterek helyén és felhasználási idején kívül szeretnének végrehajtani.

A jelen alfejezetben kifejtett indokok alapján a Polgári Légiközlekedési Hatóságnál az érintett műveletek vonatkozásában műveleti engedély kiadását kezdeményeztük. A hatósági eljárás jelenleg a hiánypótlás fázisában van, várhatóan 2022 novemberében zárul le. Ezt követően a repülések végrehajtásához igényelt eseti légtérben a tervezett mérési feladatok a műveleti engedélyben meghatározott magasságig teljesíthetőek lesznek.

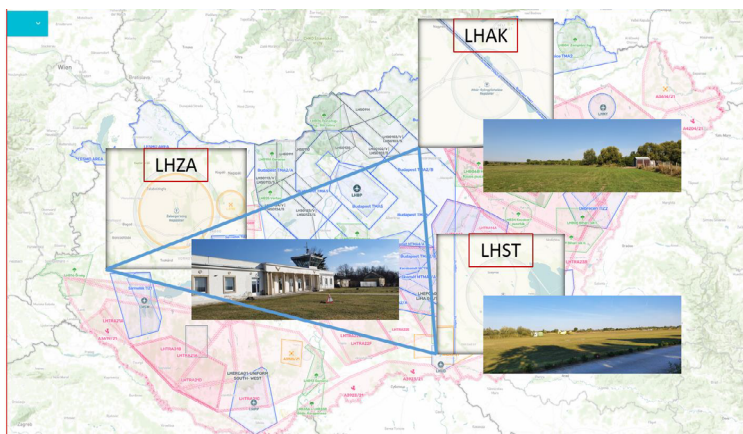
A mérési helyszínek kiválasztása

A mérési helyszínek kiválasztása során a legfontosabb szempontok azok voltak, hogy a mérési protokoll végrehajtásához kellően nagy és jól megközelíthető nyílt terület álljon rendelkezésre, továbbá az üzemeltetéshez szükséges infrastruktúra is elérhető legyen. A repüléshez kötődő szoros kapcsolatunkból azonnal adódott a lehetőség, hogy a mérési helyszínek repülőtereken legyenek kijelölve. Ugyanakkor a mérési és egyben repülési feladat jellegéből adódóan olyan alacsonyabb kategóriájú repülőtereket volt szükséges választani, ahol nem jelentős a forgalom, így

⁴ A BIZOTTSÁG (EU) 2019/945 FELHATALMAZÁSON ALAPULÓ RENDELETE (2019. március 12.) a pilóta nélküli léggépjármű-rendszerekről és a pilóta nélküli léggépjármű-rendszerek harmadik országbeli üzemeltetéséről

⁵ 26/2007. (III. 1.) GKM-HM-KvVM együttes rendelet a magyar légtér légiközlekedés céljára történő kijelöléséről

az üzemeltetés sem jelent túlzott mértékű biztonsági kockázatot. Ennek megfelelően a mérőrendszer állomása-
inak elhelyezése a tervek szerint IV. kategóriás repülőtereken kerül megvalósításra. A kezdeti 3 kijelölt repülőtér
LHZA (Zalaegerszeg-Andráshida), LHST (Szatymaz) és LHAK (Atkár), amelyek elhelyezkedése a 6. ábrán látható.



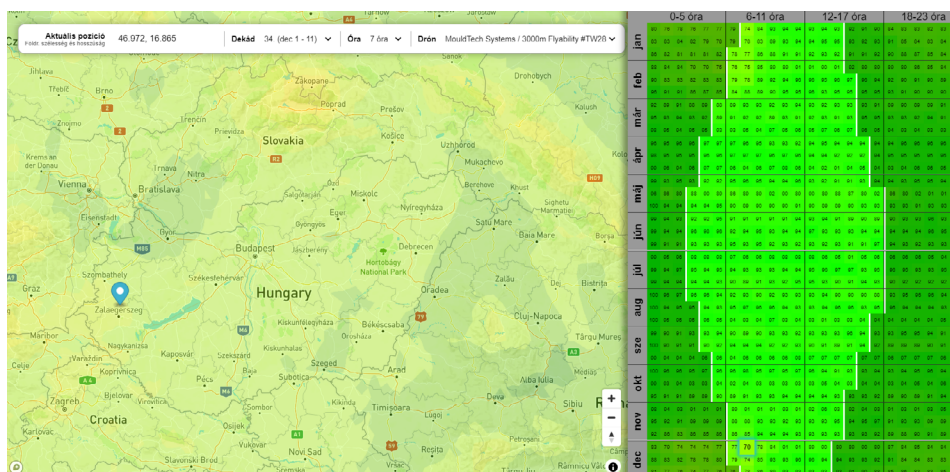
7. ábra A tervezett mérőhálózat első helyszínei

Forrás: Saját szerkesztés

A mérődrón rendelkezésre állása

A drón mérőhálózat tervezésekor figyelembe kellett vennünk, hogy a rendszer igen széles időjárási tartomány-
ban legyen képes repülni és mérni, hiszen az operatív működés során a rendelkezésre állás tekintetében a rádió-
szondázó rendszerek paramétereit kell megközelítenünk. A mérleg másik serpenyőjében ezzel szemben a mérési
feladat biztonságos végrehajtása volt, ami a költséghatékonysági megfontolásokkal együtt nem engedhette meg
a mérődrón elvesztésének vagy károsodásának kockázatát. Ezért a repülési időjárási tartományt úgy határoztuk
meg, hogy az év során a rendelkezésre állás lehetőleg egyenletesen magas értékű legyen (éves átlagban 90% felet-
ti), és emellett a drón ne kerüljön olyan környezeti feltételek közé, amelyek a fent említett kockázatokkal járhatnak.

Az üzemeltetésre vonatkozóan ezért már a tervezés folyamatában meghatároztuk azokat a műveleti határérté-
keket, mint a hőmérséklet, a nedvesség, az intenzívebb csapadék és a jegesítő körülmények, amelyek átlépését
nem tartottuk megengedhetőnek. Mindezekre vonatkozóan a Középtávú Időjárás-előrejelzések Európai Központja
(ECMWF) ERA5 publikus re-analízis adatbázisainak felhasználásával a Kárpát-medence térségére elvégeztük a ha-
tárértékeknek való megfelelés ellenőrzését a 2006-2022 közötti időszakban órás időlépcsővel. Ráadásul a repülés
karakterisztikáihoz igazodva ezeket nem csak a felszínre vagy annak közeli környezetére vonatkoztatva, hanem
egészen 3000 méteres tengerszint feletti magasságig, 16 magassági szint figyelembevételével határoztuk meg.
Az így előálló kompakt kimutatások több száz GB, speciális formátumú nyers meteorológiai adat feldolgozását
igényelték.



8. ábra A mérődrón rendelkezésre állása a Kárpát-medencében (balra) a december eleji reggeleken és a Zalaegerszeg-Andráshida repülőtérre
vonatkozó éves táblázata

Forrás: Saját szerkesztés

A kapott eredmények (7. ábra) mindhárom tervezett helyszínen 90-95% közötti átlagos rendelkezésre állást mutatnak, és még a legalacsonyabb értékekkel bíró dekádok esetében is 85%-ot meghaladó a napi átlagos érték. Ez utóbbi információ azt jelenti, hogy átlagosan körülbelül minden 8. mérést kell időjárás okok miatt törölni vagy elhalasztani.

Ezek az eredmények ugyan némileg elmaradnak a rádiószondás rendelkezésre állás szintjétől, de a velük nyerhető többletinformáció messze kompenzálja ezt a különbséget.

Várható eredmények

A korlátos tartományú prognosztikai modellek meteorológiai előrejelzéseihez szükséges kezdeti feltételeket a globális előrejelzésekből származó mezők saját modellrácsra történő interpolálásával származtathatjuk. A kis- és közepes léptékű folyamatok által befolyásolt rövid távú előrejelzések minősége nagy mértékben növelhető oly módon, ha a globális modell inicializációs idejét követő időpontban a planetáris határretegéből származó profil mérések adatait asszimiláljuk a kezdeti feltételekbe. Ezáltal 6 óránként szolgáltatathatók az integrált globális modell outputok, mint kezdeti és peremfeltételekre vonatkozó korlátos tartományú modell előrejelzés alternatívájaként +3 óra időelőnyvel futtatott előrejelzés, amely már csak az operatív rádiószonda és a felszíni szinoptikus mérési adatok figyelembevételével is rendszeresen minőségi javulást biztosít a korábbi előrejelzésekhez képest. A drón platformon végzett megfigyelések további jelentős minőségi javulást ígérnek az előrejelzésekben, olyan időelőnyvel, amivel nem rendelkezik egyik globális szolgáltató sem. A jelen cikkben is felvázolt megoldás ezt a szegmenst célozza meg.

A megoldás eredményessége szinte garantált, annak technikai megvalósítása azonban számos kérdést vet fel. Ezek technikai kivitelezése is része a jelen cikkben ismertetett projektnek.

A profil mérési adatokat igen nagy idő- és térbeli felbontásban lehetséges előállítani: 2 Hz-es felbontásban 8 m/s emelkedési és 4 m/s süllyedési vertikális sebesség esetén ez 4, illetve 2 méteres vertikális felbontást jelent, de mint minden mérési adat, ezek az adatok is véletlenszerűnek tekinthető mérési hibával terheltek. Ezt a fajta hibát kell kiszűrni, és a gyakoriságból származó túlzott reprezentáltságot kell a mérések megbízhatóságának szintjére redukálni a megfelelő mintavételezéssel. Emellett az adatokat olyan formátumba szükséges konvertálni, amelyek megfelelő bemenő adatformátumúak az előrejelző meteorológiai modell számára. A fentiek biztosítására a mért profiladatokat a meteorológiai előrejelző modell vertikális integrálási rácpontjainak megfelelő szintjeire interpoláljuk másodfokú polinom illesztéssel. A planetáris határretegben mért és a fentiek szerint illesztett vertikális profilmérési adatokat asszimilálva jelentős minőségi javulás várható az előrejelzési adatokban.

Tekintettel arra, hogy a drón platformon végzett rendszeres planetáris határreteg-mérési adatok a műveleti engedély hiányában még nem állíthatók elő, ezért a modellelőrejelzések verifikációja jelenleg még nem hozzáférhető. Az viszont már most elmondható, hogy az adatok fogadásához szükséges rendszer technikailag rendelkezésre áll, és a közeljövőben várhatóan megszerzett hatósági engedély birtokában elérhetővé váló meteorológiai mérési adatokkal azonnal ellenőrizhető lesz, hogy a rendszer milyen hozzáadott értékkel rendelkezik (Szirocák et al., 2022).

Jövőbeli kihívások, tervek

Talán a cikk tartalma alapján is egyértelmű: a drónos mérőhálózat kialakítása és az operatív működést akadályozó nehézségek kiküszöbölése jól halad, de még számos feladat vár megoldásra a célállapot eléréséig. A teljesség igénye nélkül az alábbiakban ismertetünk néhány ránk váró kihívást, illetve a kihívásokra adott válaszainkat és terveinket is.

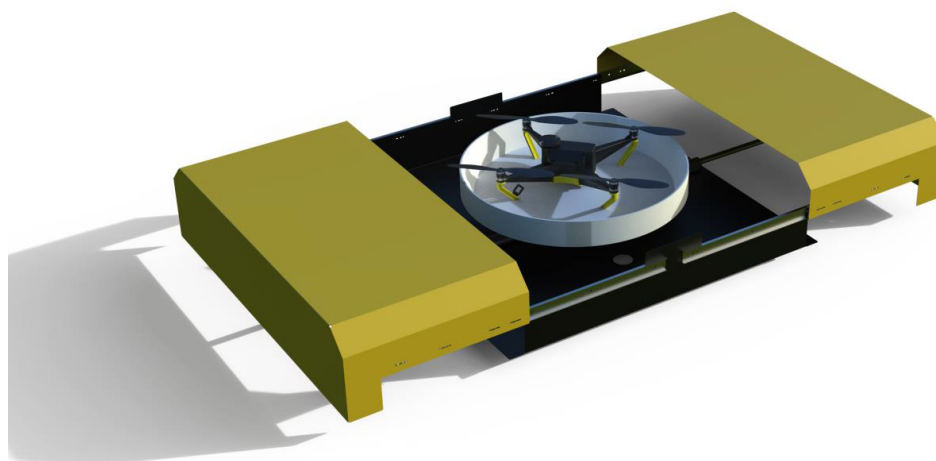
Ahogy a bevezetésben is említettük: a WMO 2024 márciusától fél év időtartamú, globális drónos mérési kampányt tervez. Ebben a mérési kampányban már a legalább három helyszínen operatíván működő mérőhálózatunkkal szeretnénk részt venni adatszolgáltatói szerepkörben.

A kezdeti három helyszín után az adatasszimilációs tesztek eredményei alapján a jövőben szeretnénk meghatározni a mérőhálózat helyszíneinek optimális számát, valamint javaslatot megfogalmazni azok lokációjára vonatkozóan.

Bár kezdetben az eseti légterek segítségével a folyamatos kísérleti üzem megvalósulhat, de hosszútávon egy hatékonyabb megoldásban gondolkodunk. Az eseti légtér ugyanis egy rugalmatlan, a légtérgazdálkodási egységek számára előre nem tervezhető, de jelen helyzetünkben a légi kockázatok csökkentésére az egyedül rendelkezésre

álló megoldás. Mivel az eseti légtér igénylésének és kijelölésének rendje egy hosszadalmas eljárás, továbbá UAS repülések végrehajtására csak korlátozott ideig jelölhető ki, így a jövőben célszerű lenne az érintett repülőtér felett, egy a repülőtér részéről aktiválható légtér kijelölése. A légtér tulajdonságait tekintve legyen UAS repülésekre is felhasználható, a működési rendje a légtérgazdálkodás stratégiai szintjét képező jogszabályokban rögzített, a légtérhasználók számára publikus és ismert légtérfajta. Ez az újfajta légtér konstrukció hosszútávú, hatékony megoldásként szolgálhatja az UAS rendszerek kísérleti és kutatási célú repüléseit is az adott helyszínek felett. Mindemellett a meteorológiai célú függőleges profilú repülések engedélyeztetésének következő lépéseként az egy távpilóta által több drón üzemeltetésének hatósági engedélyeit célszerű elindítani. Ennek oka, hogy a speciális kategóriába tartozó repülések ezzel a felhasználással, valamint a drónraj (swarm) repülések végrehajtásával egészültek ki.

További tervünk, hogy a légköri méréseket végző drón egy speciális földi egységben (8. ábra) kerüljön elhelyezésre, amikor nem végez repülést.



9. ábra A mérődrón és a kiszolgáló/befogadó földi állomás tervének látványrajza

Forrás: Saját szerkesztés

Ez egy zárt és szigetelt teret biztosítana a drón biztonságos tárolásához, és egyben az akkumulátorok töltéséhez, cseréjéhez, valamint az adatkapcsolat fenntartásához szükséges elektromos ellátást és internetcsatlakozást is garantálná. Ebben a földi egységben kapnának helyet a drón rendszert ellenőrző szenzorok, melyek segítségével távolról is lehetségessé válna a leszállás utáni ellenőrzések végrehajtása és nyomon követése is.

Felhasznált irodalom

- Bottyán Zsolt (2016): A pilóta nélküli repülőeszközök meteorológiai alkalmazásának lehetőségeiről I.: Az időjárás-felderítés. Repüléstudományi Közlemények, 28(2), 57-70. o.
- Bottyán et al. (2022): Innovatív kihívások a drón repülések meteorológiai támogatásában, különös tekintettel az utm/u-space rendszerre. Repüléstudományi Szemelvények, Kiadás alatt.
- Bottyán Zsolt – Tuba Zoltán – Vránics Dávid Ferenc (2021): Innovatív megoldások a drón repülések meteorológiai támogatásában. In: Békési, Bertold; Buday, Tamás (szerk.) Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2021 Konferencia: Környezet- és Földtudományok, Műszaki Hidrológia és Repüléstudomány Szekció előadások kiadványa. Debrecen, Magyarország: MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, 37-41. o.
- EASA (2022): Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/110913/en> (2022.10.01)
- Károly Krisztián (2019): LoRaWAN-technológia felhasználási lehetőségei a katonai alkalmazások tükrében. Hadmérnök, 14, 101-111. o.
- Leuenberger, Daniel et al. (2020): Improving High-Impact Numerical Weather Prediction with Lidar and Drone Observations. Bulletin of the American Meteorological Society, 101(7), 1036 – 1051. o. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0119.1>
- Nikodem, Florian – Dittrich, Jörg Steffen – Bierig, Andreas (2018): The new specific operations risk assessment approach for uas regulation compared to common civil aviation risk assessment, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2018. szeptember 4-6., Friedrichshafen, 9 o. <https://elib.dlr.de/121660/> (2022. 10. 01.)
- Pinto, James O. et al. (2021): The Status and Future of Small Uncrewed Aircraft Systems (UAS) in Operational Meteorology, Bulletin of the American Meteorological Society, 102(11), 2121-2136 o. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/102/11/BAMS-D-20-0138.1.xml> (2021.12.30.)
- Sziroczák Dávid – Rohács József – Rohács Dániel (2022): Review of road weather management improved by the use of drone-based mobile meteorological measurements. Progress in Aerospace Sciences. Vol. 134. 1-20. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0376042122000513?token=D21B412540BA172E34055F0AC9CC643F84DB7EA2365AAC6CFC6FC9C38199C11866E17298F3386D88554A8F372CA93DE&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221004070320>
- Vas et al. (2021a): The flight authorization of the automatized VTOL UAS for meteorological sensor measurement, Acta Avionica Vol 23, No 2, <https://doi.org/10.35116/aa.2021.0010> (2022.10.01.)
- Vas et al. (2021b): VTOL (Vertical Take off and Landing) UAS (unmanned aircraft system) alapú meteorológiai előrejelző rendszer fejlesztésének lehetőségei és kockázatai a repülőtereken. In: Békési, Bertold; Buday, Tamás (szerk.) Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2021 Konferencia: Környezet- és Földtudományok, Műszaki Hidrológia és Repüléstudomány Szekció előadások kiadványa. Debrecen, Magyarország: MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, 49-54. o.