

Hadobács Katalin sz. hadnagy– Bottyán Zsolt százados:

PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐESZKÖZÖKKEL VÉGREHAJTOTT MŰVELETEK ALATT ELŐFORDULÓ VESZÉLYES METEOROLÓGIAI TÉNYEZŐK ÉS ELŐREJELZÉSÜK MÓDSZEREI

ÖSSZEFOGLALÓ: A katonai feladatok végrehajtását jelentősen befolyásolhatja az időjárás. Kiemelten igaz ez a pilóta nélküli repülőeszközökkel végzett műveletekre. A megfelelően gondos tervezés, a várható bekövetkező eseményekre történő felkészülés mérsékelheti vagy akár elkerülhetővé teszi az időjárás által okozott káros hatásokat, következményeket. A döntéshozók felől egyre nagyobb igény érkezik a minél pontosabb meteorológiai prognózisok iránt, azonban jelenleg a meteorológiai támogatás kizárólag a numerikus modell produktumaira épül, melyek adott időtartományon kívül nem állnak rendelkezésre, valamint a repülésre veszélyes időjárási jelenségek előrejelzésére sem alkalmasak. A szerzők kidolgoztak egy eddig még hazánkban nem alkalmazott eljárásokon és módszereken alapuló támogató szoftvert, melyben ötvözték a numerikus és statisztikus alapokon nyugvó modellek eredményeit. E tanulmányban a már teszüzemben futó Komplex Meteorológiai Támogató Rendszer struktúráját mutatják be, külön kiemelve a statisztikai modulnál alkalmazott elemző és előrejelzési módszereket, melyeket külföldön már sikeresen alkalmaznak, azonban hazai gyakorlatba való adaptálásuk még hiányzott.

KULCSSZAVAK: repülésmeteorológia, veszélyes időjárási jelenségek, meteorológiai támogatás, fuzzy logika, WRF-modell

BEVEZETÉS

A gazdaság, a közlekedés vagy akár a mindennapi élet számára gyakran rendkívül fontos a várható időjárás ismerete. A meteorológia mint szakterület egzakt tudománnyá csak a természettudományok térhódításával, a matematikai, fizikai és kémiai alapok lefektetését követően válhatott (Czelnai 1979).

A meteorológia kialakulásában és fejlődésében kiemelt szerep jutott a repülésnek. A robbanásszerű technikai fejlődés következtében a repülés is igen nagy változásokon ment keresztül. A repüléstudomány és a légkörtan elválaszthatatlanok.

A repülésmeteorológia feladata a repülés biztonságának növelése és a megfelelő repüléstechnika alkalmazása az adott időjárási szituációban (ICAO 2007). Ez azt jelenti, hogy pontos tájékoztatást ad az aktuális időjárásról és annak megváltozásáról a repülőterekre és repülési útvonalra. Természetesen teszi mindezt célszerűen adott repülőgéptípusra vonatkozóan, adott formában. Mivel a légkör jelenlegi állapota megfigyelhető és mérhető, jövőbeli állapota pedig előrejelezhető, ezért a légköri folyamatok hatásai és azok következményei számításba vehetők. Kiemelt figyelmet kell fordítani azon időjárási jelenségekre, amelyek különösen nehezen prognosztizálhatók, térben és időben kis léptékűek és gyorsan változnak. Ezek okozzák a legveszélyesebb szituációkat a repülés közben. A döntéshozó parancsnok a

meteorológiai adatok ismeretében számot vehet az időjárásnak a tervezett katonai feladat végrehajtására gyakorolt kedvező vagy kedvezőtlen hatásaival.

Az időjárás figyelmen kívül hagyása emberi, technikai és anyagi veszteségekre egyaránt vezethet. A történelem számtalanszor bizonyította, hogy a gyorsan változó meteorológiai viszonyok és a légkör különböző jelenségeinek nem megfelelő értékelése a katonai műveletek végrehajtására akár katasztrofális hatást is gyakorolhat.

A pilóta nélküli repülőeszközök katonai és civil alkalmazásának elterjedésével szükségessé válik olyan meteorológiai támogatórendszer kialakítása, melyben ötvözik a numerikus és a statisztikus alapokon nyugvó modellek eredményeit, lehetőséget adva a minél pontosabb prognózis elkészítésére, kiemelt tekintettel a repülésre veszélyt jelentő paraméterek esetén. Különösen fontos a hazánkban még nem vagy esetlegesen használt, de külföldön már széles körben, sikeresen alkalmazott, mérési adatbázison nyugvó, statisztikai megközelítéseken alapuló elemző és előrejelző módszerek kidolgozása és integrálása a fent említett rendszerbe. Ez az integráció lehetővé teszi az ún. hibrid (kombinált statisztikus és numerikus) prognózisok készítését és alkalmazását, melyek jelentős mértékben járulhatnak hozzá a repülés-meteorológiai támogatás – és ezzel együtt a repülésbiztonság – színvonalának emeléséhez.

A VESZÉLYES IDŐJÁRÁSI JELENSÉGEK ÉS HATÁSUK A REPÜLÉSRE

A pilóta nélküli eszközök már csak méretüknél és egyéb jellemzőiknél fogva is jobban ki vannak szolgáltatva az időjárásnak, kiváltképp, amikor alacsony magasságokon történik a repülés. A légkörben számos olyan veszélyes szituáció alakulhat ki, mely a repülési feladat végrehajtását korlátozza, esetleg megakadályozza, és akár a repülőeszköz megsemmisülését is okozhatja.

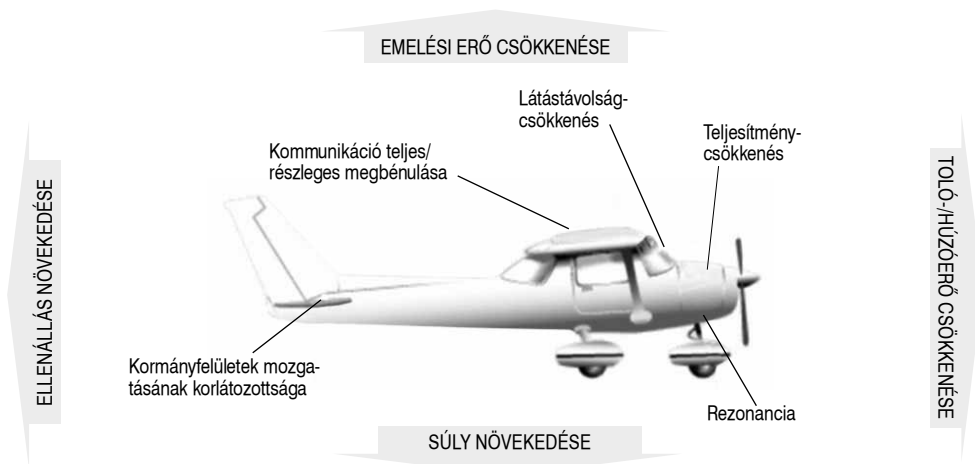
E jelenségek közé sorolható a jegesedés, turbulencia, szélnyírás, légköri elektromos hatások. Az alacsony felhőalap-magasság és/vagy látástávolság, valamint az intenzív csapadékhullás a hagyományos értelemben vett repülés során „csak” hátráltató tényezőként említendő, azonban pilóta nélküli repülőeszközök (továbbiakban: UAV – Unmanned Aerial Vehicle) esetén ezek is komoly rizikófaktorként jelennek meg.

Jegesedés

A repülés fejlődésével lehetőség nyílt a felhőn belüli hosszabb ideig tartó műszeres repülések végrehajtására, mely során egy addig kevésbé ismert jelenséggel, a felületi jegesedéssel lehetett találkozni. Felületi jegesedésen azt a jéglerakódást értjük, amely felhőben, esőben vagy nedves hóban – ritkán a felhő alatti repülésnél – a repülőgépen keletkezik fagyponot alatti hőmérsékleten a túlhűlt vízcseppek repülőgép-felszínhez való ütközésével (Sándor és Wantuch 2004). Az UAV-ok felületén megjelenő jégbevonat kialakulásának időjárás, aerodinamikai és geometriai feltételei vannak:

- áramló levegő környezeti hőmérséklete;
- a levegő repülési szinthez tartozó sztatikus légnyomása;
- a levegőben előforduló folyékony (túlhűlt) vízcseppek koncentrációja és ezek cseppméreteloszlása;
- az UAV levegőhöz viszonyított sebessége;
- az UAV felszíni hőmérséklete;
- repülési magasság;
- a repülőeszköz geometriai kialakítása, különös tekintettel a szárnyakra.

Az UAV-ok szárnykialakításánál figyelembe vett szárnyprofilok karcsúak, nagy görbülettel rendelkeznek a belépőélnél, ezáltal felhőben repülve nagy hatékonysággal gyűjtik a felületen kifagyó túlhűlt vízcseppeket (List 1977; Bottyán 2012). Meg kell azonban említeni, hogy túlhűlt vízcseppekkel nem csak felhőn belül kell számolni, ónos csapadék esetén felhő alatt repülve is intenzív jégakkumulációt szenved el a repülőeszköz. Felületi jegesedése során a repülőgépek, helikopterek felületén jég rakódik le, megzavarva a repülés számos folyamatát (Gent [et al.] 2000; Bottyán és Hadobács 2011; Hadobács 2011).



1. ábra A jegesedés repülőgépre gyakorolt hatásai

A kialakuló jégbevonat növeli a gép tömegét, csökkenti az emelőerőt és a kritikus állásszöveget, jelentősen növelheti a homlokellenállást, blokkolhatja a totális és a statikus nyomásszenzorok működését, akadályozza a kommunikációt és a feladat végrehajtását (pl. felderítés) (1. ábra). Az említett hatások a pilóta nélküli eszközt fokozottan veszélyeztetik, figyelembe véve, hogy fedélzetükön nincs jégtelenítő rendszer (anti-icing system), így az eljegesedett UAV lezuhanásának igen magas a valószínűsége. A leírtakból az következik, hogy a kezelőszemélyzetnek távolról kell úgy vezetnie a repülőgépet, hogy az semmiképpen se kerüljön jegesítő kondíciók közé repülés közben.

Szélnyírás, turbulencia

A repülést befolyásoló alapvető elemek közé sorolható a levegő térbeli (3D) áramlása. Amennyiben a szélsébségvektor kis távolságon térben megváltozik, azaz az áramlási mező homogenitása megszűnik, akkor beszélhetünk szélnyírásról. A légkör teljes vertikumában felfedezhető jelenségről van szó, azonban a legnagyobb rizikófaktort az alacsony szintű szélnyírás jelenti, mely a talajközeli 500 m-es rétegben fordul elő. Több egymástól különböző tényező idézheti elő (Czelnai [et al.] 1988):

- hegyes, dombos vidék fölötti erős talajszél;
- orografikus hullámok;
- alacsony szintű jetstreamek;
- tengeri szél frontja;
- hideg- és melegfrontok;
- zivatarok, erős termikus feláramlások.

- A turbulencia megjelenési formái:
- alacsony szintű turbulencia (LLT)
 - hegyi hullám (MWT)
 - felhő nélküli turbulencia (CAT)
 - konvektív felhő (TNT)

Az alacsony szintű, domborzathoz kapcsolódó turbulencia

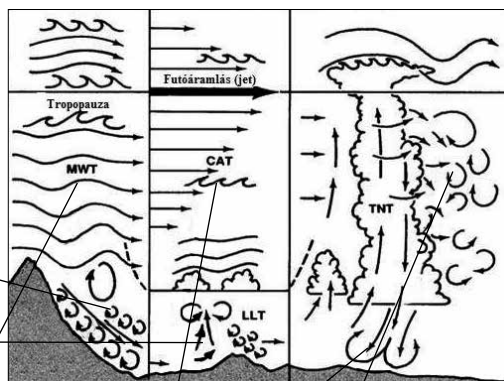
Az alacsony szintű, konvekcióhoz kapcsolódó turbulencia

Hegyioldali hullámokhoz kapcsolódó turbulencia (rotorfelhők)

Felhő nélküli turbulencia a jet közelében

Teu- és Cb-felhőben történő konvektív turbulencia

Downburst/microburst Cb-felhő esetén



2. ábra A légköri turbulencia fajtái

A szélnyírás létrejöhet csak a szél irányának, vagy csak a sebességének a megváltozásából, de akár mindkét komponens egyidejű módosulásával. Légkörünkben a folyadékok és a gázok áramlásához hasonlóan lamináris és turbulens áramlásokat különböztetünk meg. Az áramlás sebességének növekedésével, adott érték esetén a laminárisból hirtelen turbulensé válik az áramlás.

A turbulens áramlásra jellemző, hogy az elsődleges mozgási irányra merőleges irányú másodlagos mozgások is létrejönnek, amelyek a közeg állandó és gyors összekeveredését okozzák. A turbulens mozgás gyakran erősen örvényes (Lajos 2004). A levegőben, különösen talajközeli az áramlások mindig turbulensek. A szabad légkörben turbulens áramlás zivatarfelhőben, a frontok határfelületén és nagy szélnyírásokban található meg. A légköri turbulencia karakterisztikus mérete a néhány mm-es nagyságrendtől a több ezer km-es nagyságrendig terjedhet. Nagy változékonyságot mutat az energiatartalmuk (kis szellőtől a tornádóig) és az időtartamuk (néhány másodperctől több napig) is (Sándor és Wantuch 2004).

A turbulencia a teljes troposzférában, sőt még a sztratoszféra alsó részén is fellép. A 2. ábrán megtekinthetők a turbulencia alapvető fajtái (Bottyán 2013). Ezek közül a legtöbb UAV repülési feladatait elsősorban az alacsony szintű turbulencia, a hegyi hullámmozgás okozta turbulencia és a konvekció okozta turbulencia befolyásolja.

Ha bizonyos erősséget elér a szélnyírás, illetve a turbulencia nagysága, akkor letérítheti a repülőgépet a pályájáról, illetve a gépre ható erők egyensúlya is megbomlik. Optimális esetben a fedélzeten lévő pilóta kormányműveletek végrehajtásával ezt korrigálni tudja, azonban UAV-ok esetében csak a földi irányító személy képes beavatkozni. Gyakran azonban az alacsony repülési magasság miatt erre már nincs lehetőség, az eszköz irányíthatatlanná válik, és lezuhan. Különösen nehéz az alacsony szintű szélnyírás miatti korrekciót elvégezni olyan UAV esetében, amelyknél csak két tengely körül van lehetőség közvetlen kormányzás végrehajtására (pl. nincs csűrőkormány).

Légköri elektromos hatások

Ha a légkörben végbemenő elektromos jelenségeket akarjuk vizsgálni, ismernünk kell magának a légkörnek az elektromos állapotát. Egyszerű kísérletek bizonyítják, hogy a lég-

körben mindig elektromos tér van jelen, a légkör mindig gyengén ionizált állapotban van. Az elektromos térerősség merőlegesen a Föld felszíne felé mutat, tehát a pozitív töltéseket függőlegesen lefelé mozgatja (Geresdi 2004).

A légköri elektromos tér és az áram keletkezése és fennmaradása nem a Föld töltésének, hanem a légkörben lezajló zivataroknak köszönhető. Mivel a Földnek nincs töltése és a zivatarok átlagosan a Föld felszínének csak kis részét borítják, ezért a zivataros tartományokban a felfelé történő pozitív töltésáramlás sokkal nagyobb, mint a zivatarmentes helyeken a lefelé történő áramlás.

A zivatarban az elektromos tevékenység az intenzív függőleges mozgások energiájából táplálkozik.¹ Egy kifejlett zivatarfelhő közepén negatív töltésű réteg, míg a felhőtetőn pozitív töltésű, illetve a felhőalpnál is pozitív töltésű zóna figyelhető meg. Ebben a töltésszétválasztásban elsősorban a jégkristályok és jég szemek, valamint a nagy mennyiségű túlhűlt víz vesz részt. Ha a töltésszétválasztódás következtében az elektromos térerősség eléri egy bizonyos értéket, akkor kezdődik meg a töltéskisülés. Ezeknek a töltéseknek a felhalmozódása során a felhők különböző töltöttséggel rendelkező részei között töltéskülönbség keletkezik, ezt egyenlíti ki a villámlás. Ha ez a folyamat két felhőzóna között zajlik le, felhővillámról, ha a felhő és földfelszín között megy végbe, földvillámról beszélünk (Kessler 1983).²

A villám a leglátványosabb természeti jelenségek egyike, amely mindenkor csodálattal teli félelemmel tölti el az embert. A zivatarban, illetve annak környékén előforduló villámcsapások, amennyiben a pilóta nélküli repülőeszközt éri, részben vagy egészben megsemmisíthetik az eszköz fedélzetén található elektromos berendezéseket, ami a meghajtás, a navigáció és a kommunikáció együttes összeomlásával is járhat.

Alacsony látástávolság és felhőalap

Az alacsony látástávolság, illetve felhőalap nemcsak a pilóta nélküli repülőeszköz közvetlen üzemeltetését gátolják, hanem azzal párhuzamosan az egyes speciális feladatok végrehajtását is megakadályozhatják. A látástávolság csökkenése és/vagy a felhőzet alacsony szintje az UAV-ok leggyakrabban végrehajtott felderítési, megfigyelési, monitoring feladatait jelentős mértékben képes korlátozni.

A levegő sosem lehet átlátszó, mivel teljesen tiszta és száraz légkörben is szóródik a fény sugar, így gyengül is. A levegő átlátszósága nagymértékben függ a vízgőz por- és szennyezőanyag-tartalmától, a függőleges kicserélődés mértékétől, a felhőzet mennyiségétől és minőségétől, illetve a sugárzási mérleg alakulásától (Péczely 1961).

Meteorológiai látástávolság nappal az a távolság, amelyen egy megfelelő méretű, felszínhez közeli fekete tárgy látható és azonosítható az égbolt vagy a párás levegő hátterében. Ugyanez az érték éjjel az a távolság, amelyen egy megfelelő méretű fekete tárgy látható és azonosítható, ha a fényviszonyok megfelelnek a normális nappali értéknek, illetve az a távolság, amelyen az átlagos erősségű fényforrás látható és azonosítható (Gyuró 2008).

Azonban a látástávolság irányfüggő karakterisztikája miatt a repülésmeteorológiában számos egyéb látástávolság létezik. A repülésben használatos további látástávolságok:

¹ B. Nisley: Thunderstorm Anatomy and Dynamics. Naval Postgraduate School, Monterey, California. www.weatheranswer.com/public/Thunderstorm.pdf (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)

² Elmer György: Az elektromágneses tér. http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt_1_20.htm (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)

- Futópálya menti látástávolság (Runway Visual Range, RVR): az a távolság, amelyről a futópálya középvonalán lévő légi jármű vezetője a futópálya felületi jelzéseit vagy a futópálya szegélyfényeit, illetve a középvonalat jelző fényeket felismeri. Műszeresen mérik.
- Függőleges látástávolság (Vertical visibility): a repülőgépről vertikálisan lefelé észlelhető látástávolság.
- Ferde látástávolság (Slant visibility): a levegőben tartózkodó repülőgépről ferdén észlelhető látástávolság.

Az UAV-ok szempontjából a felsoroltak közül a függőleges és a ferde látástávolságot kell kiemelni. Az előbbi elsősorban az UAV-ok felderítési feladatainak sikerességére van nagy befolyással, míg az utóbbi a pilóta számára jelenthet problémát az eszköz irányítása (idevéve a fel- és leszállást is) során.

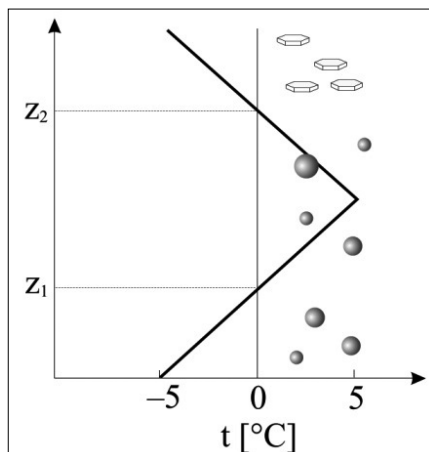
Nem szabad elfelejteni a látástávolság mellett a felhőzet szerepét sem. A felhőzeti viszonyok ismerete két szempontból fontos a repülés szemszögéből. A felhőzet egyrészt akadályozza a vizuális helyzetmeghatározást, ezzel együtt egy adott UAV irányítását, másrészt egyes felhőfajtákban való repülés különféle veszélyekkel jár, mint például a már bemutatott csapadék, jegesedés és turbulencia (Sándor és Wantuch 2004; Bottyán 2013).

A repülésmeteorológiában a felhőzet magassága rendkívül fontos tényező, azonban csak adott mennyiség fölött befolyásolja a műveleteket, így a Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (International Civil Aviation Organization – továbbiakban: ICAO) bevezette az ún. felhőalap (ceiling) fogalmát, mely annak a legalacsonyabban elhelyezkedő felhőrétegnek a talaj feletti magassága, amelynek mennyisége a 4/8-ot meghaladja (ICAO 2007).

A felhőkben való repülés annál veszélyesebb, minél alacsonyabban történik. Ez kiváltképp igaz hegyvidékeken, illetve olyan területeken, ahol több természetes és/vagy mesterséges kiemelkedő tereptárgy helyezkedik el, melynek nekiütközhet az UAV.

Csapadék

A csapadékkal, illetve repülésre gyakorolt hatásaival minden egyes feladat tervezése és végrehajtása során számolni kell. Az intenzív csapadék hullás elsősorban a látástávolságot csökkenti, de emellett az eszközbe bejutva zárlatot okozva megbéníthatja az elektromos berendezéseket is. Néhány csapadékfajta különösen veszélyes a repülésre, és a repülési feladatok tervezése során nem elhanyagolhatóak (Sándor és Wantuch 2004; Bottyán 2013).



Elsőként emlitenénk meg az ónos csapadékot. Ekkor a csapadék jellemzően túlhűlt vízcseppekből álló eső, mely szilárd felszínre hullva megfagy és összefüggő jégbevonatot képez. Jellemzőes hőmérsékleti rétegződés kell a kialakulásához (lásd a 3. ábrán).

Fontos, hogy a fagypont alatti hőmérsékletű rétegnek elég vastagnak kell lennie ahhoz, hogy a

3. ábra Ónos eső kialakulása. A folytonos, vastag fekete vonal a hőmérséklet változását mutatja a talaj felett

Forrás: Bartholy [et al.] 2013

rajta áthaladó vízcsepp 0 °C alá hűljön. A túlhűlt csapadékban előforduló jegesedés komoly veszélyt jelenthet a repülés számára.

Másik csapadékfajta, melyet komoly rizikófaktorként szoktak feltüntetni, a jégeső. Ez a csapadék egy olyan formája, ami akkor alakul ki, amikor a zivatarban jelen levő feláramlások a légkör extrém hideg rétegeibe esőcseppeket szállítanak magukkal, ahol azok szilárd halmazállapotúvá fagnak és a kialakuló jégszemek a zivatar leáramlásába kerülve a felszínre hullnak.³ Változatos formájú és méretű jégdarabokból áll. Csak konvektív felhőből – legtöbbször Cumulonimbusból (zivatarfelhőből) – hulló csapadék. A nagyobb jégszemek a becsapódási súlyuk miatt komoly károkat okozhatnak a repülőgépekben. Elsősorban horpadások keletkeznek a gépek felületén, de tényleges törést is okozhatnak.

Zivatar

A zivatar igen nagy veszélyt jelent a légi járművekre, mert a korábban említett összes veszélyes meteorológiai folyamatot, jelenséget magában foglalja, ezért a repülés során mindenképpen el kell kerülni.

Zivatarok leginkább a nyári félévben keletkeznek, de ritkábban előfordulnak a téli félévben is. A jelenség kialakulásához alapvetően három légköri tulajdonság együttes jelenléte szükséges: megfelelő stabilitás, elegendő nedvesség a teljes légoszlopban, és emelő hatás. Ez utóbbi leggyakrabban frontális emelés, vagy a napsugárzás talajmelegítő hatására meginduló konvekció, illetve orografikus tényező, pl. hegyoldalnak ütköző szél. Emelő hatású lehet a – korábbi nyomán kialakuló, a felszín mentén szétterülő – hideg és a környező melegebb levegőt elválasztó határvonal is, mely szinte miniatűr hidegfrontként funkcionál. Instabilitás alatt a levegőnek a magasság növekedésével arányos hőmérséklet csökkenését értjük, abban az esetben, ha ez a vizsgált légrétegben oly mértékű, hogy a lejjebb fekvő melegebb levegő felfelé kezd áramlani (Kessler 1983). Minden zivatarcellának, bármilyen hevességű és felépítésű zivatarhoz is tartozik, van egy életciklusa, mely három fő részre osztható (4. ábra). A fejlődő stádiumban a felhő még tornyosuló gomolyfelhőként mutatkozik, melyben teljes egészében feláramlás uralkodik. Továbbfejlődve megkezdődik a felhő felső részében a csapadékképződés. A csapadék hullani kezd, leáramlás indul meg, és a cella átlép az érett stádiumba. Az érett stádiumban egyrészt a fel- és leáramlások egyidejű megléte a meghatározó, másrészt ebben az időszakban hullik a csapadék zöme. A zivatarcellát az idő előrehaladtával egyre inkább a leáramlások jellemzik. A zivatarcellához tartozó, hosszan elnyúló gust-front⁴ megakadályozza az utánpótlást jelentő meleg levegő beáramlását, így módon nincs, ami továbbra is működtetné a cellát, így az belép az elhaló, előregedő vagy disszipáló stádiumba, amikor a csapadék lassan megszűnik, az áramlások mérséklődnek (Czender [szerk.] 2009).

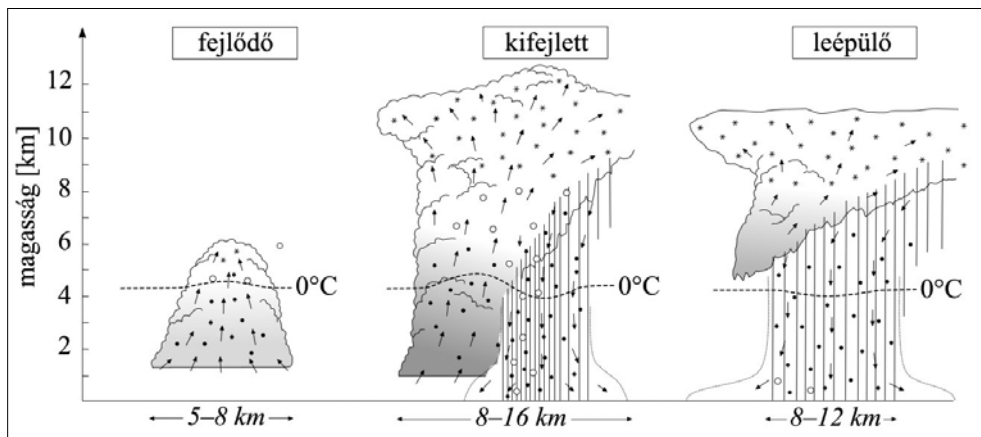
A zivataroknak három alaptípusát különböztetjük meg:

- egycellás zivatar
- multicellás zivatar
- szupercellás zivatar.

Az egyes típusok kialakulása jelentősen függ a stabilitás és a szélnyírás (a szélirány és a szélesség változása a magassággal) viszonyától. Minél nagyobb ugyanis a szélnyírás,

³ National Weather Service: Global Weather. JetStream – Online School for Weather. <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/global/precipitypes.htm> (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)

⁴ Gust-front: kifutószélfront vagy zivataros kifutószélfront. A konvektív csapadéktevékenység hatására a leáramló, majd a felszínen szétterülő hideg levegő által a talajon okozott lökéses szél vezető éle, mely a hidegebb levegőt elválasztja az azt körülvevő melegebb levegőtől.



4. ábra A zivatar életciklusa

Forrás: <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/MeteorologiaAlapismeretek/images/457df0a8.jpg>
(Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)

annál inkább gátolja az egycellás zivatarok kialakulását, viszont szupercella csak elégséges mértékű szélnyírás mellett fejlődhet ki.

Ahogy korábban már említettük, a zivatarzónában több, korábban már bemutatott, a repülésre veszélyt jelentő tényező egyszerre is fellép, mint például jegesedés, turbulencia, jégeső, villámcsapás, szélnyírás (Lester 2001). Ezért a zivatarok kialakulásának és mozgásának előrejelzése a repülésmeteorológia egyik legnagyobb kihívása.

AZ UAV-OK KOMPLEX METEOROLÓGIAI TÁMOGATÓRENDSZERE

A katonameteorológiai gyakorlatban a repülési feladatok tervezéséért felelős döntéshozók csak korlátozottan használják, építik be a döntési folyamatba a meteorológiai információkat. Ennek egyik oka lehet, hogy jelenleg a meteorológiai támogatás kizárólag olyan eseti vagy operatív előrejelzési produktumokkal tud jelen lenni, amelyek a műveletek végrehajtása előtti előkészítést segítik, és a repülésre veszélyes időjárási jelenségekről nem igazán tudnak információval szolgálni. Habár rohamosan nőtt az UAV-ok száma, meteorológiai támogatásuk külföldön is lassú fejlődést mutat (Garcia [et al.] 2013; Sun [et al.] 2014). Hazánkban az utóbbi évekig az UAV-ok meteorológiai támogatására irányuló kutatások, fejlesztések teljesen hiányoztak. Ugyanakkor nemzetközi szinten felmerült az igény egy komplex meteorológiai támogatórendszer kifejlesztésére, mely ki tudja szolgálni az UAV-okat felhasználó alkalmazók igényeit is, biztosítva ezzel meteorológiai oldalról a megfelelő szintű repülési biztonságot a pilóta nélküli repülésben is.

A Nemzeti Közlekedési Hatóság már dolgozik az UAV-ok repülése hatósági szabályainak megalkotásán, melyben definiálják az igénybe veendő meteorológiai támogatás módját is.

A meteorológiai támogatórendszer felépítése

Egy olyan szoftverrendszer kialakítását tűztük ki célul, melynek outputjaiban ötvözzük a dinamikus és a statisztikus alapokon nyugvó modellek által készített előrejelzéseket, így lehetőséget adva a pontosabb ultrarövidtávú prognózisok készítésére (Bottyán 2013).

A rendszert 3 alrendszer alkotja:

- statisztikus alapú előrejelző rendszer
- numerikus alapú előrejelző rendszer
- webalapú megjelenítő rendszer

E három alappillér mellett meg kell említeni azt a modult is, melyben a dinamikus és statisztikus előrejelzési alrendszerek eredményeit felhasználva állítjuk elő az előrejelzést. Ez a hibrid előrejelző rendszer.

A Meteorológiai Támogató Rendszer egyben egy előrejelző és utófeldolgozó szoftver is, mely a statisztikus- és a numerikusmodell-eredményeket felhasználva matematikai módszerek segítségével előállít egy hibrid látástávolságra és felhőalap-magasságra vonatkozó előrejelzést. Azért e két paramétert generálja le, mert a repülésmeteorológiában kiemelt szerephez jut e két tényező, ugyanakkor rendkívül nehezen előrejelezhető, és a numerikus időjárás-előrejelző modellek egyelőre nem tudják közvetlenül pontosan megadni az értékét (Tuba 2014; Wantuch 2001).

Statisztikus előrejelző modul

A statisztikus előrejelző modul kialakításának megkezdése előtt, mely analógiás eljárás alapul, elengedhetlenné vált valamilyen adatbázis kialakítása, ugyanis a Magyar Honvédségnél nem állt rendelkezésre olyan adattár, melyből elemi szinten lekérdezhetők az egyes paraméterek értékei. Megvizsgálva lehetőségeinket, egyértelművé vált, hogy a legalkalmasabb adatokat a szabadon elérhető METAR-táviratok⁵ tartalmazzák, amelyek célzottan az időjárás repülésmeteorológiai leírását szolgálják. Tehát egy METAR-távirat-alapú adatbázist készítettünk el, melyben jelenleg hazánk négy katonai repülőterének adatai szerepelnek 2005-től, félórás időbeli felbontásban (Bottyán [et al.] 2012; Tuba [et al.] 2012).

Miután a modell kezdeti feltételeinek előállítására megteremtettük a feltételeket, elkezdhattük a statisztikus modul kialakítását. Az analógiás rendszerhez a nemzetközileg egyre eredményesebben alkalmazott fuzzy halmazokat, logikai elméleteket használtuk (Hansen 2007; Hansen 2000; Riordan és Hansen 2002; Hansen és Riordan 2001).

A fuzzy halmaz olyan halmaz, melynél minden elemhez egy 0 és 1 közé eső valós számot rendelünk, ahol a hozzárendelést tagsági függvénynek nevezzük.

Ez a következőképpen írható fel: $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$, ahol X az univerzum és μ_A az A fuzzy halmaz tagsági függvénye.

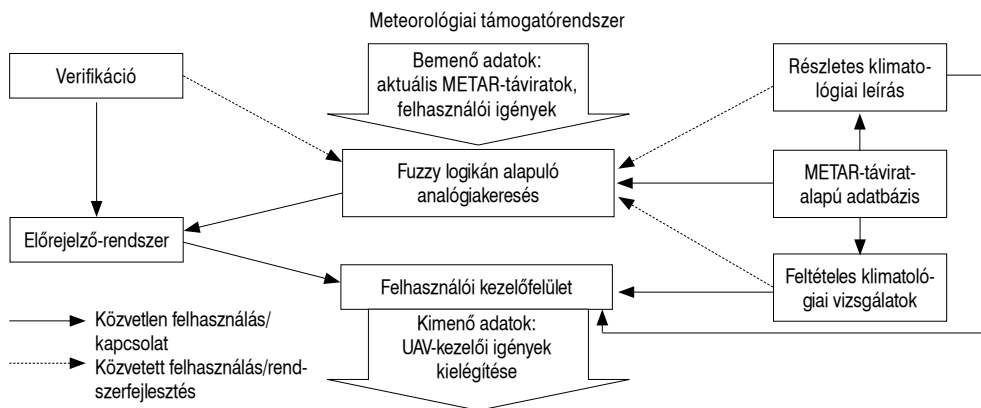
A fuzzy halmaz tagsági függvényének értékei nem valószínűségi mértéket jelölnek. Annál is inkább, mert míg valószínűségek esetén valamely az elemekhez tartozó valószínűségek összege 1, addig ez – a tagsági függvény értékeinek összegére – fuzzy halmaz esetében nem követelmény. Valószínűségek és fuzzy halmazok között a fuzzy mérték teremthet kapcsolatot (Zadeh 1965).⁶

A fuzzy logikán alapuló analóg előrejelző folyamat 3 fő lépésből áll (5. ábra):

1. Elsőként előállítja a fuzzy halmazokat a hasonlóság méréséhez.
2. Majd átvizsgálja az esetek halmazát (adatbázist) az analógiák megtalálásáért (hasonló esetek).

⁵ METAR: rendszeres időjárás-jelentés légiforgalmi meteorológiai kódban.

⁶ Várterész M.: A mesterséges intelligencia alapjai. Oktatási segédanyag. <http://users.iit.uni-miskolc.hu/~radai/MI/fuzzy.htm> (Letöltés időpontja: 2012. 11. 04.)



5. ábra A meteorológiai támogatórendszer statisztikus alapokon nyugvó moduljának felépítése

Forrás: Hadobács [et al.] 2013 (Szerkesztette: Tuba Zoltán)

3. Végül előrejelzéseket készít a megadott statisztikák felhasználásával, ami lehet például a hasonló esetek súlyozott átlaga.

Tehát a fuzzy hasonlóságvizsgáló algoritmus megkeresi és kigyűjti az adatbázisban található korábbi METAR-ok közül az éppen aktuális időjárást leíró távirathoz leghasonlóbb eseteket, és a táviratban szereplő minden paraméterre előállít egy hasonlósági mérőszámot (μ_x), ahol x az adott elemre utal, mint például hőmérséklet esetén (T).

Az adattípusok között megkülönböztetünk folyamatos és nominális, valamint ordinális változókat. A folytonos változók esetében a hasonlóság mértékének (μ_x) megadása vagy a két mennyiség különbségéhez rendelt hasonlósági mérőszámmal, vagy a két változó egymáshoz viszonyított arányának abszolút értékével történik (1. táblázat). Minél nagyobb a különbség két változó között, annál alacsonyabb a hasonlósági fok. A táblázatban a hasonlóság mértékét szövegesen adtuk meg, a szoftverben természetesen minden különbséghez egy hasonlósági mérőszám van rendelve.

1. táblázat Néhány folytonos elem esetén megadott fuzzy halmazok (Készítette: Hadobács Katalin)

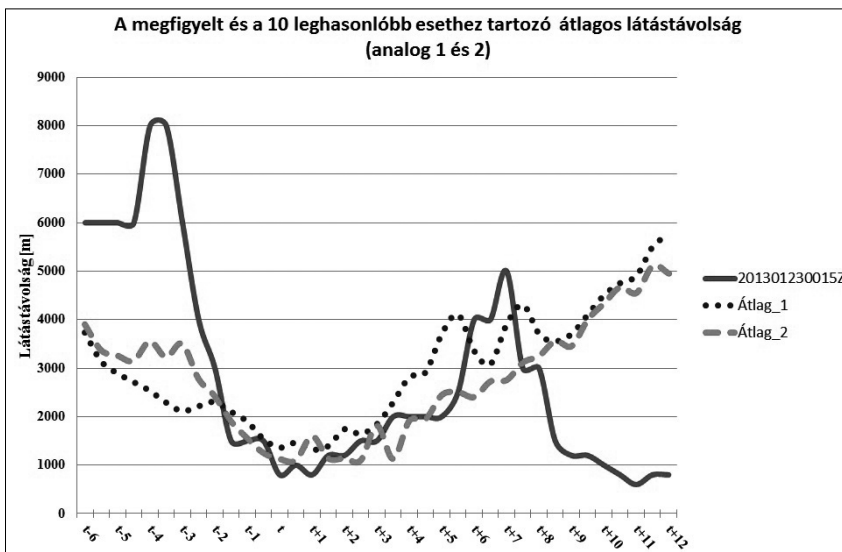
| | Részben hasonló | Hasonló | Nagyon hasonló |
|-------------|-----------------|---------|----------------|
| Dátum (nap) | 60 nap | 30 nap | 10 nap |
| Óra | 3 óra | 2 óra | 1 óra |
| Hőmérséklet | 4 °C | 2 °C | 1 °C |
| Harmatpont | 4 °C | 2 °C | 1 °C |
| Szélirány | 40° | 20° | 10° |

A nominális és ordinális változók esetén a kapcsolatot előre definiálni kell. A csapadék-nál például első lépésben létrehoztunk 5 csoportot, majd ezeket a csoportokat hasonlítottuk össze. Egy mátrixot állítottunk elő, melyben minden egyes lehetséges párra megadtuk a μ_x értékét (2. táblázat). (Hadobács [et al.] 2013; Bottyán 2013)

2. táblázat A fuzzy hasonlósági mértékek szignifikáns időjárás jelenségek esetén (TS: zivatar; SHRA: záporosó, DZ: szitálás) (Készítette: Hadobács Katalin)

| | TS | SHRA | DZ | |
|------|-----|------|------|------|
| TS | 1 | 0,75 | 0,1 | ... |
| SHRA | ... | 1 | 0,25 | ... |
| DZ | ... | ... | 1 | ... |
| | ... | ... | ... | ... |

Ha már minden elemhez tartozik egy μ_x érték, akkor többféle lehetőség létezik, hogy a két METAR-távirat hasonlóságát egyetlen értékkel tudjuk jellemezni. Esetünkben két módot építettünk be a programba. Egyik lehetőség, hogy az egyes μ_x értékeknek a súlyozott átlagát vesszük (analog_1). A súlyokat, amivel az egyes μ_x értékeket megszorozzuk, választhatjuk teljesen szubjektíven, vagy valamilyen objektívebb módon is, mint például az AHP-módszer⁷ segítségével (Rapcsák 2007; Békési 2005; Tuba [et al.] 2013). Egy másik mód a két METAR hasonlósági mérőszámának előállítására, amikor az egyes paraméterpárok hasonlósági mérőszámai közül vesszük a legalacsonyabbat, azaz a hasonlóság mértékét a legrosszabbul bevált paraméter fogja meghatározni (analog_2). Miután az adatbázisban szereplő összes távirattal megtörtént a megadott METAR összehasonlítása és hasonlósági mértékének megadása, a rendszer kigyűjti az általunk meghatározott mennyiségű „leghasonlóbb” esetet, ahol a legnagyobb μ értékkel rendelkező lesz az első helyen. Ezután már elő tudjuk állítani az adott meteorológiai kategória valószínűségi előrejelzését.



6. ábra A megfigyelt és a 10 leghasonlóbb esethez tartozó átlagos látástávolság alakulása időben a szolnoki repülőtéren (Szerkesztette: Hadobács Katalin)

⁷ AHP-módszer: (Analytic Hierarchy Process) Az AHP több szempontú döntési problémák megoldására alkalmas eljárás, ami lehetővé teszi a döntési feladatok logikus rendszerbe foglalását. Az AHP döntési problémák megoldásának az egyik alapeszköze a páros (páronkénti) összehasonlítás, amit a szempontok súlyozására és az alternatívák egyes szempontok szerinti értékelésére egyaránt alkalmaznak.

A módszer alkalmazhatóságának alátámasztására elvégeztünk számos futtatást. Egy mediterrán ciklonhoz kapcsolódó időjárási helyzetben a kapott eredmények alapján elmondható volt, hogy az első nyolc órában jól alkalmazható mindkét beépített módszer (Hadobács [et al.] 2013). (6. ábra)

Nyilvánvaló, hogy a módszernek vannak hiányosságai, ahogy azt a 6. ábra is mutatja a 9. óra után. Valamint a modell hátrányaként említhetjük a futtatáshoz szükséges repülés-klimatológiai adatbázist, amely jelentősen korlátozza a modell területi alkalmazhatóságát. Ezzel szemben külön ki kell emelni a statisztikus modellekről, hogy inkorrekt előrejelzés esetén a prognózis korrekciója gyorsan elvégezhető a futtatáshoz szükséges idő rövidsége miatt. Ez nagyban segíti az alkalmazhatóságát a repülésmeteorológiai támogatás során.

Numerikus alapokon nyugvó előrejelző modul

A numerikus modellezési alrendszer, egy Kárpát-medencére optimalizált WRF⁸-alapú numerikus modellre épül. A WRF-modell egy rendkívül hatékony, folyamatosan fejlődő univerzális eszköz, amely alkalmas a légköri folyamatok széles skálájának numerikus modellezésére. Magas rendű diszkretizációs sémái, a modellegyenletekbe beépített nagyszámú kölcsönhatások, a széles skálán mozgó parametrizációs lehetőségek és a párhuzamosítási technikákat támogató szoftver struktúrája lehetőséget ad, hogy kutatási célokra is használható legyen az operatív felhasználás mellett (Skamarock [et al.] 2005).

Két dinamikai alrendszerrel rendelkezik. Az első az NCAR (National Center for Atmospheric Research) által kifejlesztett Advanced Research WRF (ARW), amelyet elsősorban kutatási célokra használunk (Skamarock [et al.] 2001; Michalakes [et al.] 2004). Ennek magyarázata, hogy itt érhető el az idealizált esettanulmányok, regionális klímamodellezéshez szükséges kódkészletek és levegőkémiai kiegészítőrendszerek. A másik megoldó felület az NCEP (National Centers for Environmental Prediction) által kifejlesztett Nonhydrostatic Mesoscale Model (WRF NMM). Ezt főleg operatív célokra alkalmazzák. Az általunk kifejlesztett előrejelző rendszerben az ARW-alrendszer 3.5 verzióját használtuk (Gyöngyösi [et al.] 2013). A modellben a légköri folyamatokat leíró egyenletrendszer determinisztikus, ezért kezdeti feltétel szükséges ahhoz, hogy rendszer egy későbbi állapotát meghatározzuk. A differenciálegyenlet megoldásához a kezdeti feltételek mellett peremfeltételeket is meg kell határozni. A Komplex Meteorológiai Támogató Rendszer numerikus moduljának kezdeti feltételekként a GFS⁹-modell 0,5°×0,5°-os felbontású előre jelzett mezőit használtuk. Az ARW-modell lehetőséget ad horizontálisan beágyazott (esetünkben teleszkopikus domain-) tartományok készítésére.

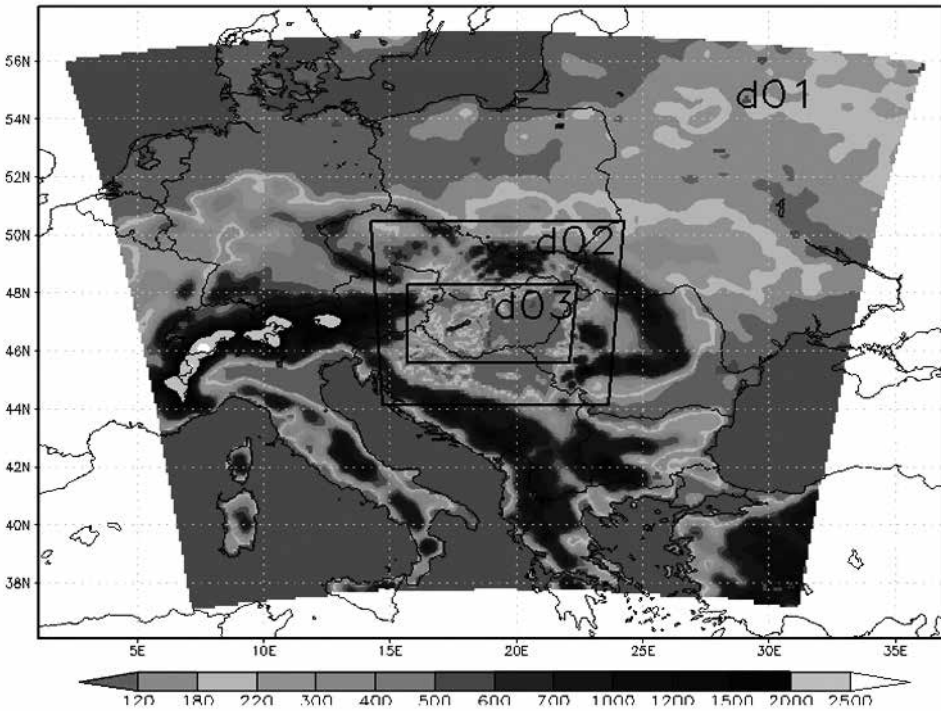
Az általunk alkalmazott leskálázási, prognosztikai tartományok adatai a 3. táblázatban, míg azok földrajzi elhelyezkedései a 7. ábrán láthatók (Bottyán 2013).

3. táblázat *A beágyazott modelltartományok adatai (Készítette: Hadobács Katalin)*

| Tartomány | GFS | d01 | d02 | d03 |
|------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| Rácpontok száma | 720×180 (globális) | 97×97 | 97×97 | 202×121 |
| Horizontális felbontás | 0,5° (~50 km) | 22' (30 km) | 7' (7,5 km) | 2' (1,8 km) |

⁸ Weather Research and Forecasting Model.

⁹ Global Forecast System.



7. ábra Az alkalmazott domain-rendszer földrajzi elhelyezkedése (Szerkesztette: Gyöngyösi András Zénó)

A futtatást 44 magassági szintre végzi a modell, amelyek közül számunkra az alsó 24 szint a legfontosabb, ugyanis az UAV-eszközökkel végzett repülési feladatok többnyire a planetáris határreteg alsó 2 km-es rétegében történnek.

Mivel a WRF-modell outputjainak egy részét is származtatott mennyiségek előállításához fogjuk felhasználni, így olyan WRF-parametrizáció-együttest kellett választani, amely kellő pontossággal közelíti, illetve figyelembe veszi a különböző mikrofizikai folyamatokat (felhőképződés, határreteg dinamika stb.). A parametrizáció optimalizációja során számos repülésre veszélyes időjárási szituációt vizsgáltunk meg. Az elemzések, valamint a verifikáció után jelöltük ki a megfelelő és a későbbiekben alkalmazandó parametrizációs együttest.

A modell futtatási eredményei között vannak direkt módon előálló és az ezekből kalkulált (utófeldolgozással) származtatott produktumok. Ez utóbbiak közé tartozik a látástávolság, a felhőalap, a turbulencia stb. is.

A numerikus előrejelzések előnye, hogy a modell domain földrajzi tartományán belül nincsenek területi korlátok, a prognózisok mindenhol előállíthatók. Azonban futtatás viszonylag ritkán, 12 óránként történik. Ennek következménye, hogy olykor jóval korábbról származó futtatási eredmények állnak csak rendelkezésre. Így ha a modell előrejelzése sikertelen, akkor a prognózis korrekciójára csak a következő futtatás eredményei alapján van lehetőség.

Hibrid előre jelző rendszer

A statisztikus és numerikus modell outputok előnyeinek és hátrányainak mérlegelésével, az eredmények verifikálásával egyértelművé vált, hogy külön-külön komoly előrejelzési korlátokkal bírnak. Azonban, ha ötvözzük őket, akkor egy olyan hibrid előrejelzés állítható elő, amely az előrejelzés sikertelensége esetén rövid időn belül korrigálható, hosszabb távon pedig megőrzi a numerikus modell azon előnyét, hogy képes a dinamikus változások előrejelzésére. Például látástávolság esetén a hibrid modell előrejelzése a statisztikus és a numerikus előrejelzések egyszerű lineáris kombinációjaként áll elő (Tuba 2014):

$$\text{Látástávolság}_{\text{HIBRID}} = a \cdot \text{Látástávolság}_{\text{STATISZTIKUS}} + b \cdot \text{Látástávolság}_{\text{NUMERIKUS}}$$

ahol $a+b=1$, valamint a és $b \in [0;1]$.

Emellett a következő feltételeket kellett megszabni:

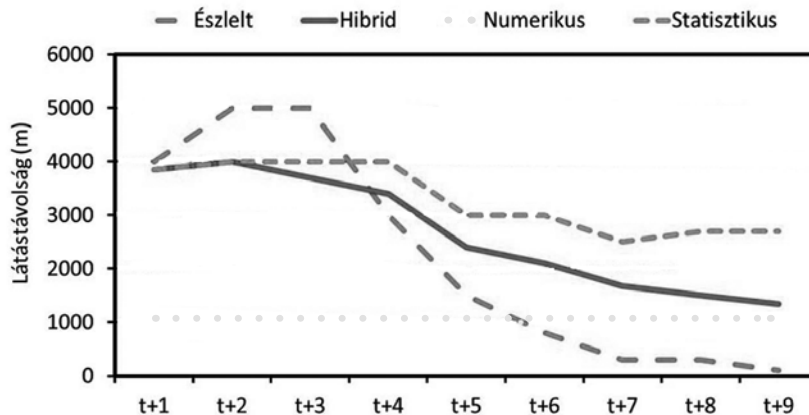
- az egyik súlynak időben és adott értéket elérve monoton csökkenőnek, a másiknak ennek megfelelően monoton növekvőnek kell lennie;
- ma numerikus modell súlyának monoton csökkenőnek kell lennie a kis kategóriakülönbségtől a nagyobb felé haladva, mely kategóriakülönbséget úgy állítottuk elő, hogy a kezdeti időpontban észlelt, valamint az arra előre jelzett numerikus modellből származó látástávolság-értékeket 5 értékkategóriába soroltuk, majd egyszerű kivonással meghatároztuk a különbséget.

Az előbbi feltételnek a célja, hogy folyamatos átmenet legyen a módszerek között, míg az utóbbi a numerikus modell kezdeti pontatlanságát hivatott korrigálni a statisztikus modell nagyobb súlyával.

Ezek alapján egy súlymátrixot lehet előállítani, aminek a sorai a kategóriakülönbségeket, oszlopai pedig az előrejelzés időlépcsőit reprezentálják. Az előrejelzés készítésénél használt súlyokat arra alkalmas verifikációs paraméterek segítségével, megfelelő optimalizációs eljárással kell véglegesíteni (Tuba 2014).

E hibrid modell alkalmazhatóságát, valamint szükségességét esettanulmányok bizonyították. Egy ilyen futtatás eredményei láthatóak a 8. ábrán is (Tuba 2014).

Megfigyelhető, hogy a látástávolság romlását az adott szituációban a három vizsgált modell közül a hibrid követte le a legjobban.



8. ábra Az észlelt és az egyes módszerek által előre jelzett látástávolság-értékek

Forrás: Tuba 2014 (Szerkesztette: Tuba Zoltán)

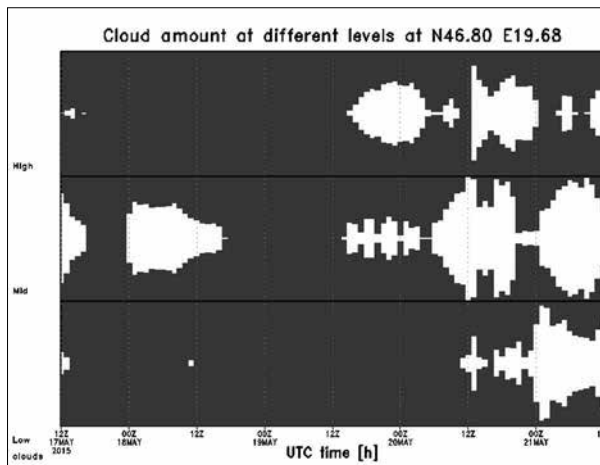
WEB-alapú megjelenítőrendszer

A Meteorológiai Támogató Rendszer kifejlesztését megelőzően számos feltételt határoztunk meg, melyeknek meg kellett hogy feleljen a szoftver. Természetesen a legfontosabb követelmény az volt, hogy támogatást tudjon nyújtani a repülési feladatok tervezésének ideje és végrehajtása alatt. Ehhez azonban elengedhetetlen, hogy könnyen elérhető és értelmezhető legyen a modell által szolgáltatott információ.

Az értelmezhetőség érdekében a meteorológiai modell kimenő adataiból repülésmeteorológiai mennyiségeket kell származtatni, és azokat úgy kell kódolni, megjeleníteni, hogy a felhasználó számára, akár nem meteorológus szakember számára is egyértelmű információkkal szolgáljon.

Azért, hogy későbbiekben a szoftver bárhol könnyen hozzáférhető és alkalmazható legyen, egy publikus webfelületre kerülnek ki az utófeldolgozást követően az adatok grafikusan és kódolt formában. A grafikus megjelenítésnek kétféle módját alkalmaztuk:

A diagramok földrajzi helyének kiválasztására több lehetősége van a felhasználónak. Amennyiben a repülési feladatvégrehajtás egy katonai vagy akár civil repülőtérén történik, akkor a repülőtér ICAO-kódját kell csak megadni. Azonban a katonai feladatok, mely során



9. ábra Felhőzet alakulása a kecskeméti repülőtérre vonatkozóan (fehér foltok jelentik a felhőzetet)

Forrás: <http://meteor24.elte.hu/wrf/> (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)

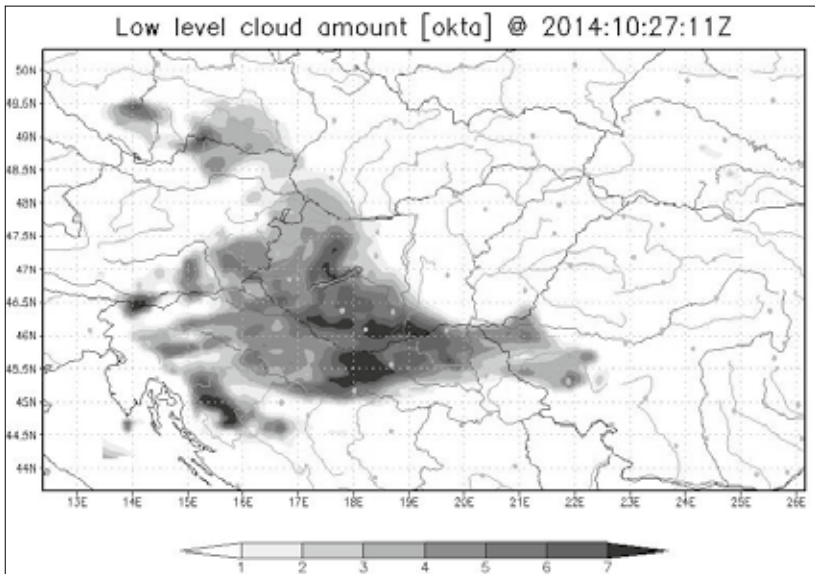
pilóta nélküli repülőeszközt használnak, többnyire nem légi bázison történnek, ezért lehetőség van a beviteli panelen földrajzi koordináták megadására, de akár grafikusan is ki lehet választani az adott pontot egy Google-térképen (Bottyán 2013).

A numerikus formában megjelenő adatok METAR- és TAF¹⁰-táviratok formájához hasonló karaktersorozatként kérdezhetők le.

A weboldal betöltését követően már a nyitóoldalon megjelennek az első információk, melyek a repülésmeteorológiai viszonyok alakulásáról tájékoztatják a felhasználót egy NATO-szinkódtérkép segítségével.

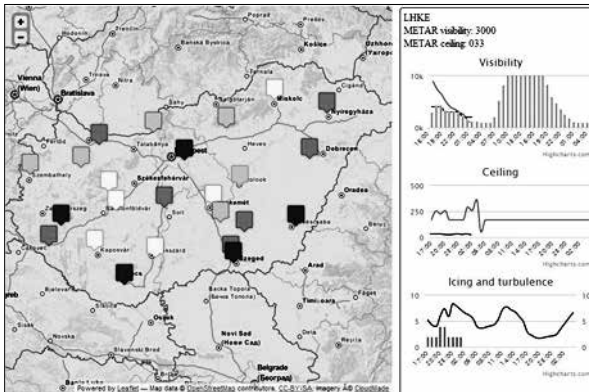
Természetesen a weboldalon keresztül elérhetőek a modelleredmények mellett műhold- és radarképek, rádiószonda-adatok is, melyek egy megfelelő prognózis elkészítéséhez nélkülözhetetlenek.

¹⁰ TAF-távirat: repülőtéri időjárás-előrejelzés.



10. ábra Alacsony szintű felhőzet előrejelzése

Forrás: <http://meteor24.elte.hu/wrf/> (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)



11. ábra A Komplex Meteorológiai Támogató Rendszer webfelületének részlete

Forrás: <http://meteor24.elte.hu/wrf/> (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)

Összességében e webes megjelenítőrendszerrel elmondható, hogy teljes mértékben alkalmas egy teljes körű repülésmeteorológiai prognózis elkészítéséhez. Minden szükséges adat, produktum megtalálható rajta, mind a pillanatnyi, mind a jövőbeni időjárási helyzet elemzéséhez, akár nem meteorológus felhasználók számára is.

ÖSSZEGZÉS

A repülésre veszélyes időjárási folyamatok, jelenségek helyének és intenzitásának prognózisa a legfontosabb – és egyben a legnehezebb – feladat, mivel e jelenségek számos problémát okozhatnak repülés közben és a talajon álló repülőgépek esetében is. Napjainkban a mezoléptékű numerikus előrejelzések már egyre megbízhatóbb adatokat szolgáltatnak az általános időjárásra vonatkozóan, de az említett veszélyes jelenségek kielégítő prognózisához, valamint az ultrarövidtávú előrejelzések készítéséhez speciális eljárások, modellek szükségesek. E tanul-

mányban bemutattunk egy lehetőséget, egy speciálisan UAV-okra kifejlesztett meteorológiai támogatórendszer formájában. A modellbe egy még gyerekcipőben járó, új, statisztikai modul is beépítettünk, mely a fuzzy logikán alapszik. A szoftver eredményei előzetes vizsgálatok alapján jól alkalmazhatóak lesznek a mindennapi operatív előrejelzői gyakorlatban. Ezzel lehetőséget adva arra, hogy kellően pontos, korrekt meteorológiai információkkal tudjuk ellátni a repülési feladat tervezése és végrehajtása során a döntéshozókat, illetve a hajózószemélyzetet a megfelelő döntés meghozatalához, így biztosítva a döntési szituációk egyszerűbbé és rövidebbé válását. Mindezek teljesülése esetén tovább tudjuk növelni a repülés biztonságosságát, valamint nem utolsósorban hozzájárulhatunk a repülés gazdaságosabbá tételéhez is. Az ilyen statisztikai modellekhez kapcsolódó kutatások jelenleg hazánkban még kezdetlegesek, így számtalan probléma és feladat vár megoldásra. További terveink közé tartozik új módszerek kidolgozása, valamint a külföldön már alkalmazott eljárások Kárpát-medencére való adaptálása. Ki kell emelni, hogy ezek a módszerek, modellek a megfelelő átalakításokkal, nemcsak a katonai repülési feladatok, de akár szárazföldi hadműveletek, feladatok támogatásában is széleskörűen alkalmazhatóak lehetnek.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Bartholy Judit – Mészáros Róbert – Geresdi István – Matyasovszky István – Pongrácz Rita – Weidinger Tamás: *Meteorológiai alapismeretek*. Budapest, 2013. <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/MeteorologiaiAlapismeretek/book.pdf> (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)
- Békési Bertold: *Harcászati repülőgépek összehasonlítására használható Analytic Hierarchy Process*. Repüléstudományi Közlemények, 24, 2, 2005, 1–5. http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2005_cikkek/bekesi_bertold.pdf (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)
- Bottyán Zsolt: *A pilóta nélküli repülőeszközök alkalmazásának meteorológiai aspektusai*. 193–214. In: Palik Mátás (szerk.): *Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek*. Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Budapest, 2013.
- Bottyán Zsolt: *A szárnyprofil-geometria és az ütközési hatékonyság kapcsolata a repülőgépek felületi jégesedésének folyamata során*. Repüléstudományi Közlemények, 24, 2012, 43–50. http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2012_1/Bottyán_Zsolt.pdf (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)
- Bottyán Zsolt – Hadobács Katalin: *A repülőgépek felületi jégesedésének termodinamikai folyamatairól – A repülési sebesség hatása*. Repüléstudományi Közlemények Különszám, 2011, 1–10. http://epa.oszk.hu/02600/02694/00055/pdf/EPA02694_rtk_2011_2_Bottyán_Zsolt_Hadobacs_Katalin.pdf (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)
- Bottyán Zsolt – Wantuch Ferenc – Tuba Zoltán – Hadobács Katalin – Jámbor Krisztián: *Repülésmeteorológiai klíma adatbázis kialakítása az UAV-k Komplex Meteorológiai Támogató Rendszeréhez*. Repüléstudományi Közlemények, 24, 3, 2012, 11–18. http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2012_3/2012-3-02-Bottyán_Zsolt_es_a_tobbiek.pdf (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)
- Czelnai Rudolf: *Bevezetés a meteorológiába I. – Léggéztani alapismeretek*. Egyetemi jegyzet, ELTE-TTK, Tankönyvkiadó, Budapest, 1979.
- Czelnai Rudolf – Götz Gusztáv – Iványi Zsuzsanna: *Bevezetés a meteorológiába II. – A mozgó léggör és óceán*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1988.
- Czender Csilla (szerk.): *Kézikönyv meteorológiai asszisztensek részére*. MH GEOSZ kiadvány, 2009.
- Elmer György: *Az elektromágneses tér*. http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt_1_20.htm (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)

- Garcia, M. – Viguria, A. – Ollero, A.: *Dynamic Graph-Search Algorithm for Global Path Planning in Presence of Hazardous Weather*. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 69, 2013, 285–295.
- Gent, R. W. – Dart, N. P. – Cansdale, J. T.: *Aircraft Icing*. Philosophical Transactions of The Royal Society. 358, 2000, 2873–2911.
- Geresdi István: *Felhőfizika*. Dialóg Campus Kiadó, Budapest–Pécs, 2004.
- Gyöngyösi András Zénó – Kardos Péter – Kurunczi Rita – Bottyán Zsolt: *Development of a complex dynamical modeling system for the meteorological support of unmanned aerial operation in Hungary*. Proceedings of International Conference on 28–31 May 2013, Atlanta, GA, USA, 2013. http://meteor24.elte.hu/~zeno/publications/20130529_ICUAS_Atlanta/ICUAS13_0125_FI.pdf (Letöltés időpontja: 2014. 11. 29.)
- Gyuró György: *A szinoptikus időjárás analízis eszközei*. Kézirat, Eötvös Kiadó, Budapest, 2008.
- Hadobács Katalin: *Repülésre veszélyes időjárás helyzetek rekonstrukciójának alkalmazási lehetőségei – Felületi jegesedés becslése és a hozzá tartozó szimulációs környezet kialakítása*. Diplomamunka, ELTE-TTK, 2011.
- Hadobács Katalin – Tuba Zoltán – Wantuch Ferenc – Bottyán Zsolt – Vidnyánszky Zoltán: *A pilóta nélküli légi járművek meteorológiai támogató rendszerének kialakítása és alkalmazhatóságának bemutatása esettanulmányokon keresztül*. Repüléstudományi Közlemények, 25, 2, 2013, 405–421. http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2013_cikkek/2013-2-31-Hadobacs_Katalin_es_a_tobbiek.pdf (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)
- Hansen, B. K.: *Analog forecasting of ceiling and visibility using fuzzy sets*. 2nd Conference on Artificial Intelligence, American Meteorological Society, 2000, 1–7. http://www.leg.ufrpr.br/~eder/Artigos/Wather/Hansen_2000b.pdf (Letöltés időpontja: 2014. 11. 29.)
- Hansen, B. K.: *A Fuzzy Logic-Based Analog Forecasting System for Ceiling and Visibility*. Weather Forecasting, 22, 2007, 1319–1330.
- Hansen, B. K. – Riordan, D.: *Weather Prediction Using Case-Based Reasoning and Fuzzy Set Theory*. http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/arma/bjarne/papers/paper_2001.pdf (Letöltés időpontja: 2012. 10. 24.)
- Hérincs Dávid: *Általános összefoglaló a zivatarokról*. <http://zivipotty.hu/zivatar.html> (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)
- <http://meteor24.elte.hu/wrf/> (Letöltés időpontja: 2014. 10. 27.) ICAO: Meteorological Service for International Air Navigation, Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation. 2007. <http://www.icao.int/> (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)
- Kessler, E.: *Thunderstorm Morphology and Dynamics*. University of Oklahoma Press, 1983.
- Lajos Tamás: *Az áramlástan alapjai*. Műegyetem Kiadó, Budapest, 2004.
- Lester, P.: *Aviation Weather*. JEPPESEN Sanderson Training Products, 2001.
- List, R.: *Ice accretions of structures*. Journal of Glaciology, 19, 81, 1977, 451–465.
- Michalakes, J. – Dudhia, J. – Gill, D. – Henderson, T. – Klemp, J. – Skamarock, W. – Wang, W.: *The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance*. To appear in proceeding of the Eleventh ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology, (Ed. George Mozdzyński), Reading, U.K., 25–29 October 2004. http://www.wrf-model.org/wrfadmin/docs/ecmwf_2004.pdf (Letöltés időpontja: 2014. 11. 29.)
- National Weather Service: Global Weather. JetStream – Online School for Weather. <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/global/precipitypes.htm> (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)
- Nisley, B.: *Thunderstorm Anatomy and Dynamics*. Naval Postgraduate School, Monterey, California. www.weatheranswer.com/public/Thunderstorm.pdf (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)

- Péczely György: *Magyarország makroszinoptikus helyzeteinek éghajlati jellemzése*. OMI Kisebb Kiadványai, 1961, 32.
- Rapcsák Tamás: *Többszemontú döntési problémák. AHP modellek*. Budapesti Közgazdaságtudományi és Államigazgatási Egyetem MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézetben kihelyezett Gazdasági Döntések Tanszék, 2007.
- Riordan, D. – Hansen, B. K.: *A fuzzy case-based system for weather prediction*. Engineering Intelligent Systems, 10, 3, 2002, 139–146.
- Sándor Valéria – Wantuch Ferenc: *Repülésmeteorológia*. OMSZ kiadványa. Budapest, 2004.
- Skamarock, W. C. – Klemp, J. B. – Dudhia, J.: *Prototypes for the WRF (Weather Research and Forecasting) model*. 2001. http://www.mmm.ucar.edu/individual/skamarock/meso2001pp_wcs.pdf (Letöltés időpontja: 2013. 08. 15.)
- Skamarock, W. C. – Klemp, J. B. – Dudhia, J. – Gill, D. O. – Barker, D. M. – Wang, W. – Powers, J. G.: *A Description of the Advanced Research WRF Version 2*. NCAR Mesoscale and Microscale Meteorology Division, NCAR Technical Note, 2005. http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)
- Sun, X. – Cai, C. – Shen, X.: *A New Cloud Model Based Human-Machine Cooperative Path Planning Method*. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2014.
- Tuba Zoltán: *Pilóta nélküli repülőeszközök (UAV-k) és a látástávolság egyes kérdései*. Repüléstudományi Közlemények, 26, 2, 2014, 94–105. http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2014_cikkek/2014-2-09-0158_Tuba_Zoltan.pdf (Letöltés időpontja: 2014. 10. 20.)
- Tuba Zoltán – Vidnyánszky Zoltán – Bottyán Zsolt – Wantuch Ferenc – Hadobács Katalin: *Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) in fuzzy logic-based meteorological support system of unmanned aerial vehicles*. Academic and Applied Research in Military Sciences, 12, 2, 2013, 221–228.
- Tuba Zoltán – Wantuch Ferenc – Bottyán Zsolt – Hadobács Katalin – Jámbor Krisztián: *Repülésmeteorológiai klíma adatok felhasználásának lehetséges aspektusai pilóta nélküli repülőeszközök (UAV-k) meteorológiai támogatásában*. Szolnoki Tudományos Közlemények, 16, 2012, 192–197.
- Várterész Magda: *A mesterséges intelligencia alapjai*. Oktatási segédanyag. <http://users.iit.uni-miskolc.hu/~radai/MI/fuzzy.htm> (Letöltés időpontja: 2012. 11. 04.)
- Wantuch Ferenc: *Visibility and fog forecasting based on decision tree method*. Időjárás, 105, 2001, 29–38.
- Zadeh, L. A.: *Fuzzy sets*. Information and Control, 8, 1965, 338–353.