

Tuba Zoltán, Bottyán Zsolt

## ANALÓG ÉS HIBRID MÓDSZEREK ALKALMAZÁSA A HORIZONTÁLIS LÁTÁSTÁVOLSÁG ELŐREJELZÉSÉBEN

*A látástávolság előrejelzése a repülésmeteorológia egyik legnagyobb kihívása. Egy pontos látástávolság előrejelzés jelentősen csökkentheti vagy elkerülhetővé teheti az időjáráshoz köthető repülési veszélyeket. Ennek elérése érdekében kutatásunkban az egyes tagok lineáris kombinációjával összekapcsoljuk a fuzzy logikán alapuló analóg és a numerikus utófeldolgozott modell kimeneteket egy hibrid előrejelzésben. Ez a hibrid modell a 9 órás előrejelzési időszak során fokozatosan helyezi át a hangsúlyt az analóg előrejelzésről a numerikusra, megpróbálva megőrizni ezek előnyeit. Az eredmények megfelelő értékelhetősége érdekében részletes verifikációs vizsgálatokat végeztünk. A Heidke Skill Score (HSS) átlagos értéke nagyon hasonló eredményeket mutat az analóg és a hibrid előrejelzések esetén még az előrejelzési időszak végén is, ahol pedig az analóg modell aránya mindössze 10–20%. Alacsony látástávolságok esetén (1000–2500 m) a hibrid (0,65) és az analóg előrejelzés (0,64) szintén hasonló átlagos HSS értékeket mutat az előrejelzés első 6 órájában. Ezek jelentősen meghaladják a perzisztencia előrejelzés (0,60) és a TAF (0,56) hasonló periódusra vonatkozó értékeit.*

**Kulcsszavak:** látástávolság, hibrid, analóg előrejelzés, AHP, verifikáció

### BEVEZETÉS

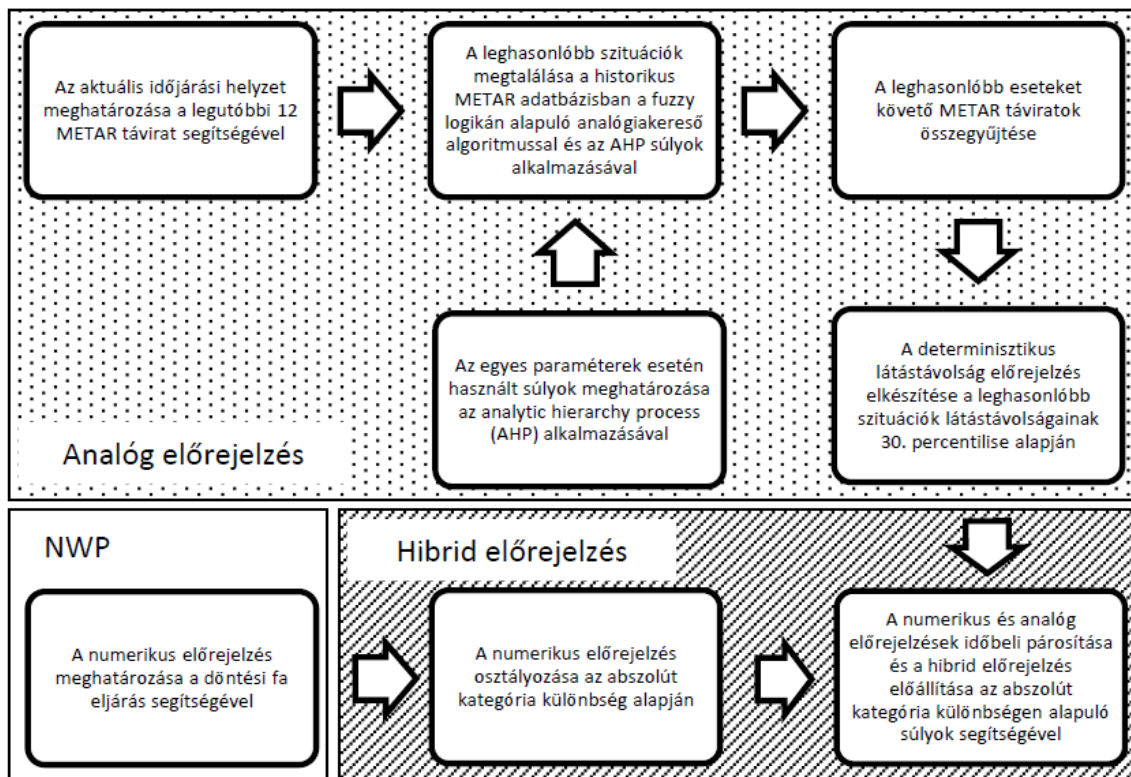
A légiközlekedés területén a meteorológiai vonatkozású határértékek többsége a felhőalap magassághoz és a látástávolsághoz kapcsolódik. Sajnos az említett paraméterek háttérben lévő összetett fizikai folyamatok és a numerikus időjárás előrejelző (NWP) modellek ma is meglévő hiányosságai különösen nehéz feladattá teszik pontos előrejelzésüket [1][2][3]. Ahogyan több korábbi tanulmány is megmutatta, a felhőalap magasság és a látástávolság emiatt lényegesen nagyobb hatással van a repülések várható költségeire [4], hatékonyságára [5] és biztonságára [6][7][8], mint a kevésbé fontos paraméterek. Mindez a speciális katonai feladatok végrehajtása során még hangsúlyosabban jelentkezhet, hiszen ott gyakran nem is maga a repülést korlátozó határértékek átlépése, hanem például a speciális felderítési feladat vizuális akadályozása jelenti a korlátozó tényezőt [9]. Ez ismételtén ráirányítja a figyelmet a pontos és megbízható látástávolság előrejelzések fontosságára. Az előrejelzések pontosabbá és megbízhatóbbá tételének számos útja van [10], amelyek közül mi a statisztikai alapú előrejelzések fejlesztését és numerikus produktumokkal való kombinálását választottuk.

Cikkünkben a fuzzy logikán alapuló analóg előrejelző modell fejlesztése [11] adja az alapját annak a hibrid modellnek, amely a pontosabb determinisztikus látástávolság előrejelzések érdekében statisztikai és numerikus outputokat kombinál össze lineárisan [12][10]. A bemutatásra kerülő verifikációs eredmények az analóg és a hibrid előrejelzések fejlesztésének hatékonyságát is igazolják. A különböző előrejelzési módszerek eredményeinek bemutatása pedig az összehasonlító elemzések révén segít meghatározni az egyes eljárások esetleges korlátait, valamint környezetükbe helyezve mutatja meg a fejlesztések értékét. Az előrejelzők hatékonyabban tudnak választani ezek részletes

ismeretében az adott helyzetben rendelkezésre álló prognosztikai eszköztárból.

## ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

Ebben a fejezetben az alkalmazott módszereket mutatjuk be. Az egyes módszerek leírása azonban csak egy áttekintő kép megértéséhez szükséges részletességű lesz, hiszen korábbi munkáinkban ezek már kellő részletességgel és mélységben bemutatásra kerültek [11][12][10]. A teljes előrejelzési folyamat főbb lépéseit az 1. ábra mutatja be szemantikusan.



1. ábra Az előrejelzési folyamat szemantikusan ábrázolt folyamata (Forrás: [10] alapján)

Az ezen felvázolt 3 szegmens közül az analóg és a hibrid előrejelzéseket fogjuk tárgyalni a már említett részletességgel. A numerikus előrejelzéssel kapcsolatos részletesebb leírások szintén a korábban már idézett hivatkozásokban találhatók.

### Felhasznált adatok

Ahogy az 1. ábrán is látható, az analóg előrejelzések készítéséhez nélkülözhetetlen egy arra alkalmas adatbázis. Ráadásul az analóg produktumokon keresztül részben ez szolgáltatja a hibrid előrejelzések alappilléret is. Az adatbázis alapját a rendszeres repülőtéri észlelő táviratok, azaz a METAR-ok adják [13]. Bár a METAR táviratok nem minden esetben a legpontosabb formában tartalmazzák az egyes meteorológiai változók értékeit (pl.: hőmérséklet, harmatpont), de az adott formátum használata egyrészt megkönnyíti az adatok elérését, másrészt jelentősen leegyszerűsíti a teljes előrejelző rendszer tetszőleges előrejelzési helyre való adaptálását.

Az adatbázisban szereplő egyedi adatok jelentős része meteorológiai szenzorok méréseiből származik (pl.: hőmérséklet, harmatpont, szélirány, szélsébség), de nem elhanyagolható a vizuális észlelések szerepe sem (pl.: uralkodó látástávolság, szignifikáns időjárás). Ugyanakkor meg kell jegyeznünk, hogy napjainkban már a látástávolság műszeresen mért értékei is rendelkezésre állnak (MOR – Meteorological Optical Range – Meteorológiai Optikai Mélység, RVR – Runway Visual Range – Futópályamenti Látástávolság), de az ezekből kialakított elérhető hosszúságú hazai adatsorok még nem alkalmasak analóg előrejelzések készítésére.

### Analóg előrejelzés

Az analóg előrejelzések alapelve a hasonlóság keresése. Ennek során az aktuális időjárási szituációhoz egy arra alkalmas adatbázisban keresünk hasonló helyzeteket, majd valamilyen módszer segítségével a hasonlóság alapján becslést adunk a vizsgált meteorológiai változó(k) jövőbeli értékére. Az előrejelzési időszak általában 6 és 24 óra között változik [14][15][16], ugyanis az analóg előrejelzések alaptézisük miatt csak homogén feltételek mellett működnek (pl.: nincsenek dinamikus időjárás változások). A fent említett időjárási szituáció alatt nem egyetlen időpont adatait, hanem egy hatórás időszak összes információját értjük, azaz az összehasonlítás is időbeli adatsorok összehasonlítását jelenti. Maga a paraméterek összehasonlítása a fuzzy logika eszköztárából ismert, szakértői konszenzussal létrehozott ún. tagsági függvények segítségével történik [16]. A tagsági függvények az adott paraméter esetében meghatározzák a hasonlóság mértékét az összevetésre kerülő értékek különbsége vagy aránya alapján. Ezek a 0 és 1 közé eső egyedi hasonlósági értékek kerülnek aztán az adott paraméter fontossága és a mérés/megfigyelés ideje szerint további súlyozásra. A paraméter fontosság szerinti súlyozása azon a feltevésen alapul, hogy az előrejelzés pontossága növelhető azáltal, ha az előrejelzendő paraméter hasonlóságát nagyobb súllyal vesszük figyelembe az összesített hasonlóság megállapításánál. Ezt az Analytic Hierarchy Process (AHP – Hierarchikus elemzési folyamat) [17] alkalmazásával valósítottuk meg, melynek hatékonyságát már korábbi munkánkban is bizonyítottuk [11].

A továbbiakban időlépcső kifejezés alatt az előrejelzési időszak kezdetétől (ami, a legutolsó észlelés ideje) az adott METAR-ig visszafelé vett távolságot értjük. Ennek megfelelően az időlépcsők a jelentől ( $t - 0$ ) a legrégebbi feldolgozott információig  $t - (k - 1)$  tartanak, ahol  $k$  az időlépcsők számát jelenti. Ezeket a jelöléseket alkalmazva az  $(t - j)$ -edik időlépcsőben a hasonlóság összesített mértéke ( $S_{TOTAL\ t-j}$ ) az alábbiak szerint számítható:

$$S_{TOTAL\ t-j} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot S_{ij} \quad (1)$$

ahol  $S_{ij}$  az  $i$ -edik paraméter tagsági függvények által meghatározott hasonlósága,  $w_i$  pedig az  $i$ -edik paraméterhez az AHP módszerrel hozzárendelt súly, míg  $n$  az összehasonlító algoritmusban vizsgált paraméterek száma.

Ezután már az időben is összesített, azaz a teljes időjárási szituációra vonatkozó hasonlósági mérték ( $S_{overall}$ ) is meghatározható. A fenti egyenletet figyelembe véve, az időlépcsőkre vonatkozott súlyozott átlag általános képlete a következő:

$$S_{overall} = \frac{\sum_{j=0}^{k-1} (2^{k-j-1} \cdot \sum_{i=1}^n w_i \cdot S_{ij})}{2^{k-1}} \quad (2)$$

ahol  $k$  az alkalmazott időlépcsők száma (esetünkben  $k = 12$ ). Ahogyan a képletből következik: a legutóbbi észlelés ( $t = 0$ ) kapja a legnagyobb időbeli súlyt, majd ahogyan az időben távolodunk a jelentől, úgy csökkennek gyorsan az alkalmazott súlyok. Ez garantálja a hasonlóság konvergenciáját a vizsgált hatórási periódusban.

A (2) egyenlet segítségével az adatbázis összes időjárás-szituációjához rendelhető egy hasonlósági mérték, ami alapján a leghasonlóbb esetek kiválaszthatók a hasonlósági mérték szerinti sorbarendezés alapján. A kiválasztott eseteket időben közvetlenül követő METAR táviratok adatai alapján pedig az egyes időlépcsőkben a látástávolság értékek 30. percentilis [10] értékével előállítható a determinisztikus látástávolság prognózis is. A 30. percentilis kiválasztását a fenti hivatkozásban bemutatott előzetes verifikációs eredményekre alapoztuk, melyek szerint a vizsgált verifikációs paraméterek percentilis szerinti függvényének itt a választást igazoló szélsőértéke van. Az előrejelzési időszak hossza 9 óra, amit a rövid TAF hosszához igazítottunk.

### Hibrid előrejelzés

Egyértelműen kijelenthető, hogy sem analóg, sem pedig numerikus modellekkel nem lehet tökéletes látástávolság előrejelzést készíteni. Mindkettőnek vannak előnyei és hátrányai egyaránt, amelyeket az 1. táblázatban foglaltunk össze.

|   | Analóg előrejelzés                                       | Numerikus előrejelzés                             |
|---|--|---|
| Futtatás gyakorisága                    | megegyezik az észlelés gyakoriságával (0,5–1 óra)        | 6–24 óránként                                     |
| Területi érvényesség                    | korlátozott: ahol mérési adatbázis elérhető              | a modell előrejelzési területén belül tetszőleges |
| Teljesítmény az előrejelzési időszakban | gyorsan csökken  | egyenletes  |
| A hatékony előrejelzési időszak hossza  | néhány óra   | néhány nap  |
| Verifikáció                             | teljes: csak ott alkalmazható, ahol észlelés is elérhető | korlátozott: csak ott, ahol észlelés elérhető     |

1. táblázat Az analóg és numerikus előrejelzések tipikus tulajdonságai (Forrás: [10] alapján)

Az analóg előrejelzések alapfeltevéséből adódik, hogy a teljesítményük időben gyorsan csökken, így az igazán hatékony előrejelzési időszak hossza mindössze néhány órára tehető. Ezzel szemben a numerikus előrejelzések teljesítménye lényegesen alacsonyabb ugyan, de időben gyakorlatilag nem változik, ahogyan ezt a később bemutatásra kerülő eredmények is alátámasztják. Annak köszönhetően, hogy az előrejelzések csak ott verifikálhatók, ahol az ellenőrzéshez szükséges észlelési adatok is rendelkezésre állnak, így mindkét esetben ugyanazokon a helyeken elérhetők a verifikációs adatok is.

Annak érdekében, hogy a fentiekben említett előnyöket megtartsuk, a hátrányokat pedig csökkentjük, egy hibrid előrejelzést alkottunk meg [18][12]. Ez az előrejelzés az analóg és a numerikus látástávolság outputok lineáris kombinációjaként a következő módon áll elő:

$$Látástávolság_{Hibrid} = a_j \cdot Látástávolság_{Analóg} + b_j \cdot Látástávolság_{Numerikus} \quad (3)$$

ahol  $a_j + b_j = 1$ ;  $a_j, b_j \in [0; 1]$  az egyes típusokhoz tartozó súlyok és  $j$  az előrejelzés időlépcsőinek a száma. Annak érdekében, hogy a numerikus modell kezdeti pontatlanságait minél nagyobb mértékben korrigálni tudjuk, a  $t + 0000$  időpontban mind az észlelt mind pedig a numerikusan előrejelzett látástávolság adatokat kategóriákba (0–1000 m; 1000–1500 m; 1500–3000 m; 3000–5000 m; 5000 m–) soroltuk. Az  $a_j$  súlyokat pedig úgy határoztuk meg, hogy a növekvő kategória különbséggel párhuzamosan nőjenek. Az analóg és a numerikus rész közötti fokozatos átmenet biztosítása érdekében az előrejelzési időszakban az  $a_j$  súlyok monoton csökkenők. A fenti feltételek figyelembe vételével az  $a_j$  és  $b_j$  súlyokat operatív repülésmeteorológiai előrejelzők határozták meg. Mivel a kategória különbségek az eltérés irányától függetlenek, ezért a súlyokat tartalmazó mátrix szimmetrikus. Ennek megfelelően az alkalmazott súlyok az abszolút kategória különbség függvényében a 2. táblázatban található egyszerűsített formában is megadhatók. A táblázatban látható kategória különbségen alapuló súlyozásbeli eltérések a numerikus modelledmények egyfajta szűrését, szelekcióját jelentik. Nagy kategória különbség esetén ugyanis a téves numerikus eredmények csak kis mértékben befolyásolhatják a hibrid előrejelzést.

|                                 |   | $t+0100$ | $t+0200$ | $t+0300$ | $t+0400$ | $t+0500$ | $t+0600$ | $t+0700$ | $t+0800$ | $t+0900$ |
|---------------------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Abszolút kategória<br>különbség | 4 | 1,00     | 1,00     | 1,00     | 0,90     | 0,80     | 0,65     | 0,50     | 0,35     | 0,20     |
|                                 | 3 | 1,00     | 1,00     | 0,90     | 0,80     | 0,70     | 0,55     | 0,45     | 0,30     | 0,20     |
|                                 | 2 | 1,00     | 0,90     | 0,85     | 0,75     | 0,65     | 0,50     | 0,40     | 0,25     | 0,15     |
|                                 | 1 | 0,90     | 0,85     | 0,80     | 0,70     | 0,60     | 0,45     | 0,35     | 0,20     | 0,10     |
|                                 | 0 | 0,90     | 0,80     | 0,70     | 0,60     | 0,50     | 0,40     | 0,30     | 0,20     | 0,10     |

2. táblázat A hibrid előrejelzés összeállításánál alkalmazott  $a_j$  súlyok az abszolút kategória különbségnek és az előrejelzés idejének függvényében (Forrás: [10] alapján)

A hibrid előrejelzés egyik legfőbb előnye, hogy amennyiben az előrejelzés módosításra szorul, akkor a módosítás kiadásához szükséges idő az analóg előrejelzés frissítési gyakoriságára csökken. Ráadásul azok a potenciális dinamikus változások, amelyek az analóg modul esetében nem előrejelezhetők, a numerikus rész növekvő részarányának megfelelően egyre nagyobb valószínűséggel jelennek meg a hibrid előrejelzésben.

## VERIFIKÁCIÓ

Ebben a fejezetben bemutatjuk a teljes verifikációs eljárást és az alkalmazott módszer eredményeit. A fejezet első felében a verifikáció idejét és helyét, valamint az alkalmazott módszert, a második felében pedig a kutatás főbb eredményeit tárgyaljuk.

## Verifikációs eljárás

Már előljáróban meg kell jegyeznünk, hogy a különböző látástávolság előrejelzések ugyanazzal a módszertannal kerültek verifikációra az összehasonlíthatóság alapelveinek megőrzése érdekében. Ennek keretében az analóg (AHP alkalmazásával és anélkül), a hibrid, a numerikus és a perzisztencia előrejelzés, valamint a TAF táviratok első kilenc órájának látástávolság értékeit ellenőriztük. Az egyes előrejelzések elemi időlépcsőinek legkisebb közös többszöröseként előálló 1 órát határoztuk meg verifikációs időlépcsőként, hogy az összehasonlíthatóság alapelvét itt is meg tudjuk őrizni.

A verifikáció megvalósítása érdekében a rendelkezésre álló adatbázist (2005. 08. 01–2014. 07. 31) két egymástól független részre osztottuk. Ennek megfelelően verifikációs időszakként a 2013. 08. 01–2014. 07. 31. közötti periódust jelöltük ki, összhangban a numerikus modell operatív időszakával. Az analóg és áttételesen a hibrid előrejelzés hasonlósági adatbázisául pedig a 2005. 08. 01–2013. 07. 31. közötti időszak szolgált. A teljes verifikációs eljárást a TAF táviratok kiadási rendjéhez igazítottuk, emiatt Szolnok (LHSN) és Kecskemét (LHKE) esetén három óránként, míg Pápa (LHPA) és Budapest (LHBP) esetén hat óránként kerültek az előrejelzések kiértékelésre. A továbbiakban a vizsgált látástávolság kategóriák egyszerűsítve, a felső kategória határral kerülnek azonosításra, ugyanis az alsó határ minden esetben 0 méter. Ez összhangban van azzal a repülési gyakorlattal, amely az eljárások alkalmazását határértékekhez köti. Ez azt jelenti, hogy ha az adott változó értéke átlép egy bizonyos határértéket, akkor a repülési eljárásokban eltérő szabályok alkalmazására van szükség (pl.: látvarepülési és műszer szerinti repülési szabályok). Ezek a határértékek többek között függhetnek a pilóta kiképzettségétől, a repülőtér felszereltségétől vagy akár az alkalmazott légijárműtől is.

Az alkalmazott verifikációs eljárás során azt vizsgáltuk, hogy az előrejelzett és az észlelt látástávolság adatok az adott vizsgálati kategóriába tartoznak-e vagy sem. Ezt a fajta verifikációs módszertant nevezzük kategorikus előrejelzések verifikációjának, amit a vizsgált értékek egy ún. kontingencia mátrixba (3. táblázat) való besorolása révén valósítunk meg.

|                      |      | Észlelt esemény      |                               |
|----------------------|------|----------------------|-------------------------------|
|                      |      | IGEN                 | NEM                           |
| Előrejelzett esemény | IGEN | <i>a</i> (találat)   | <i>b</i> (téves riasztás)     |
|                      | NEM  | <i>c</i> (mulasztás) | <i>d</i> (korrekt elutasítás) |

3. táblázat Kategorikus előrejelzése kontingencia mátrixa

Ahogy Doswell és munkatársai [19] is megmutatták: teljes értékű, mindenre kiterjedő verifikációs eljárás nem létezik. Ezért egy teljesebb összkép érdekében célszerű minél több skill score (*szabad fordításban: beválási mutató*) (pl.:  $\alpha$ , BIAS, POD, POFD, FAR, HIT, CSI, TSS, HSS, stb. – ezek részletes leírásáért lásd Nurmi munkáját [20]) alkalmazása. Az említett beválási mutatók számítása a 3. táblázatban bemutatott  $2 \times 2$  kontingencia mátrix segítségével történt. Ugyanakkor a részletes eredmények ismeretében, csak a Heidke skill score (HSS) eredményeire hagyatkozunk a továbbiakban. Egyrészt ennek értékei tükrözik a verifikáció érdemi összeredményét, másrészt a HSS, mint beválási mutató (*v. másképp verifikációs paraméter*) korrekt marad kis relatív gyakoriságú események (pl.: alacsony látástávolság) kiértékelése esetén is [21].

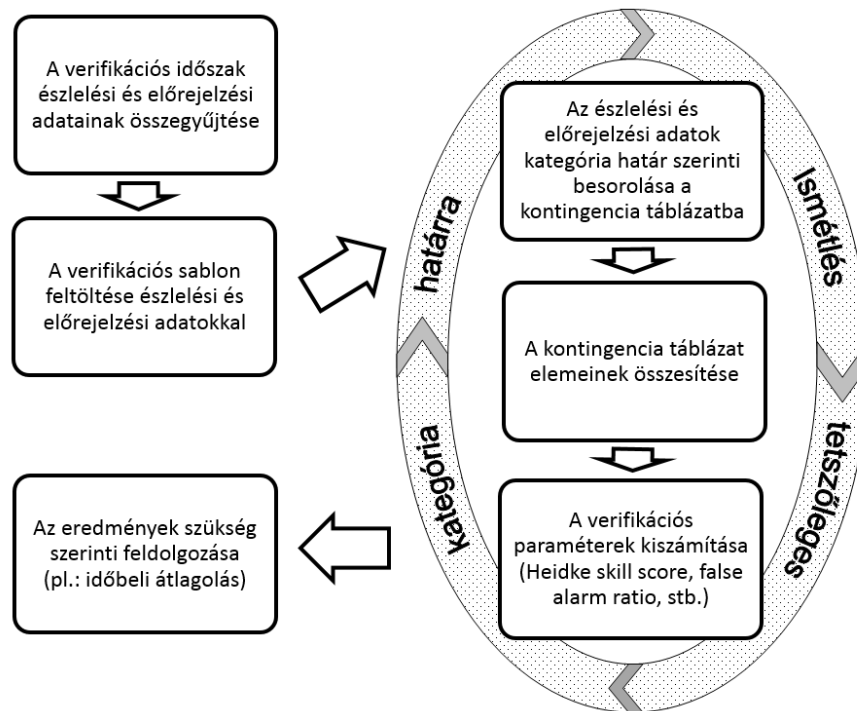
$$HSS = \frac{2 \cdot (a \cdot b - b \cdot c)}{(a+c) \cdot (c+d) + (a+b) \cdot (b+d)} \quad (4)$$

A nemzetközi TAF verifikációs gyakorlatban általános eljárás az előrejelzési időszak rövid intervallumokra való felosztása [22][23]. Az észlelések pillanatnyi látástávolság értékei miatt az ilyen eljárások szükségszerűen hibát hordoznak, ha a vizsgált kategória határok eltérnek az ICAO (International Civil Aviation Organization – Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet) által javasolt módosítási kritériumoktól [24]. Ráadásul a felszállásoknak vagy a repülési feladatok kezdetének általában pontosan meghatározott időpontja van, amit megelőzően a felhasználók már szeretnék tudni, hogy végrehajthatják-e a tervezett feladatot vagy el kell azt halasztaniuk. A fenti indokok miatt egy új megközelítést alkalmaztunk a TAF verifikációban, ami nem mellékesen az előrejelzések összehasonlíthatóságát is támogatja.

Ebben az eljárásban az adott UTC órát jellemző előrejelzett látástávolság értékhez a megelőző óra 45 perces METAR táviratának az adatait párosítottuk. A numerikus és a hibrid előrejelzések esetében ez azt jelenti, hogy az előrejelzési időtartomány  $t + 0100$ ,  $t + 0200$  stb. órai előrejelzéseit a  $t + 0045$ ,  $t + 0145$ , stb. időpontok METAR táviratai alapján verifikáltuk. Az analóg, a perzisztencia és a TAF előrejelzés vonatkozásában az előrejelzett látástávolság értékek a  $t + 0045$ , ...,  $t + 0845$  időpontokban egyértelműen párosíthatók az azonos időpontbeli észlelések adataival, még abban az esetben is, amikor változást jelentő csoport van érvényben az előrejelzésben.

A TAF táviratokban változást jelentő csoportot alkalmaznak, ha tartós („becoming” – BECMG) vagy időszakos („temporary” – TEMPO) változás várható az egyes időjárási elemek értékében vagy állapotában [24]. Ezeket a csoportokat a táviratokban az adott csoportra vonatkozó érvényességi időszak követi. A BECMG változást jelentő csoport esetében a TAF távirat beválása szempontjából kedvezőbb előrejelzési adatot (alap vagy BECMG) vesszük figyelembe a BECMG változási időszakában. Amennyiben mindkét előrejelzett látástávolság érték sikeres, vagy mindkettő sikertelen, akkor az eredeti látástávolság adat kerül kiértékelésre. A TEMPO változást jelentő csoport esetében, ha a TEMPO időszak hossza nem éri el a 3 órát, akkor a TAF távirat beválása szempontjából legkedvezőbb előrejelzési adatot (alap vagy BECMG vagy TEMPO) vesszük figyelembe. Ha a TEMPO időszak hossza eléri a 3 órát, akkor az adott előrejelzési időszak minden órájához egy 3 órás periódust rendelünk a következőképpen: az első órához a periódus első 3 óráját, az utolsó órához a periódus utolsó 3 óráját, a köztes órákhoz pedig az adott és az azt megelőző és követő órák 3 órás periódusát. Amennyiben egy adott 3 órás periódus mindhárom órája esetében beválk a látástávolság előrejelzés, akkor a TEMPO időszak adott órája (ti. amihez a 3 órás periódus tartozik) esetében az alap-előrejelzést is figyelembe vesszük (ami valószínűleg sikertelen lesz) hiszen a TEMPO helyett BECMG alkalmazása lett volna indokolt [24]. Amennyiben egy adott 3 órás periódus mindhárom órájára sikertelen lesz az előrejelzés, akkor a TEMPO alkalmazása nem lett volna indokolt. Ezért a TEMPO időszak adott órája esetében a vonatkozó időpont látástávolság előrejelzését is figyelembe vesszük (ami valószínűleg sikertelen lesz). A maradék esetekben az alap, BECMG, TEMPO értékei közül a TAF távirat beválása szempontjából legkedvezőbbet vesszük figyelembe. A PROB40 és PROB30 TEMPO változást jelentő csoportok esetében a TEMPO-

hoz hasonló eljárást alkalmazunk, azzal a különbséggel, hogy ezeket az eredményeket a verifikációs összesítésnél 40 és 30%-os súllyal vesszük figyelembe.



2. ábra A verifikáció sematikus folyamatábrája (Forrás: [10] alapján)

Ez az eljárás némiképp felülbecsli a TAF távirat verifikációs teljesítményét a változást jelentő és a valószínűségi csoportok kiértékelési módszere miatt. Ezért a TAF táviratnál jobb verifikációs eredményt elérő eljárások esetében biztosan állíthatjuk, hogy azok az előrejelzési munkafolyamat során jól alkalmazhatóak lesznek a TAF látástávolság előrejelzéseinek javításában.

A verifikációs eljárás főbb lépéseit a 2. ábra foglalja össze. A folyamat ovális keretbe foglalt része, amely a kategória határok szerinti besorolástól a verifikációs paraméterek számításáig terjed, a vizsgált kategória határok számától függően tetszőlegesen ismételhető. Az eljárás utolsó lépéseként a verifikáció végső eredménye a kiszámított paraméterek tetszőleges feldolgozásával (pl. időbeli vagy kategória szerinti átlagolás) állítható elő.

## Eredmények

Először is meg kell jegyeznünk, hogy a fejezetben bemutatásra kerülő eredmények esetében az előrejelzés ideje nem az adott előrejelzés időelőnyét jelenti. Az előrejelzés ideje alatt a TAF táviratok érvényességének kezdő időpontjától vett időbeli távolságát értjük. Nyilvánvaló, hogy ezért a TAF táviratok és a numerikus előrejelzések esetében az időelőny különbözik az előrejelzés idejétől. Az analóg és a perzisztencia előrejelzés esetén viszont a kettő között nincs különbség az előrejelzések konstrukciós háttéré miatt.

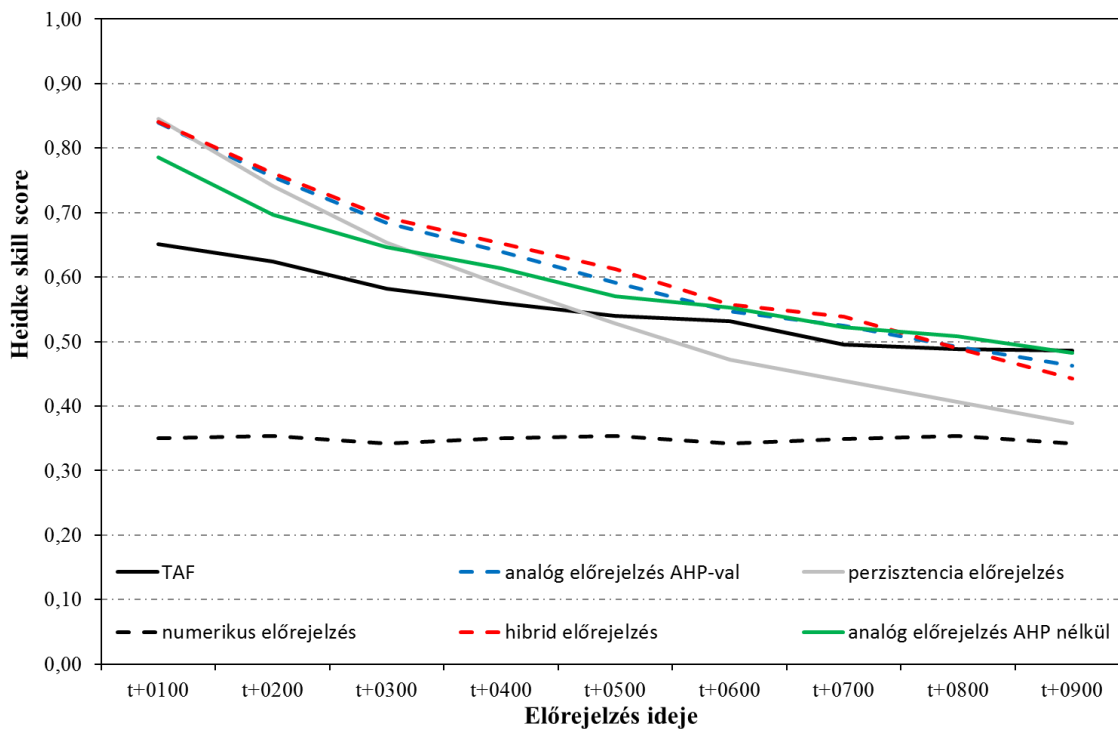
A verifikáció során vizsgált kategóriák felső határát 5000 méteres látástávolságig, 100 méterenként határoztuk meg. Ezután kiszámítottuk a verifikációs paramétereket az összes kategória határra és



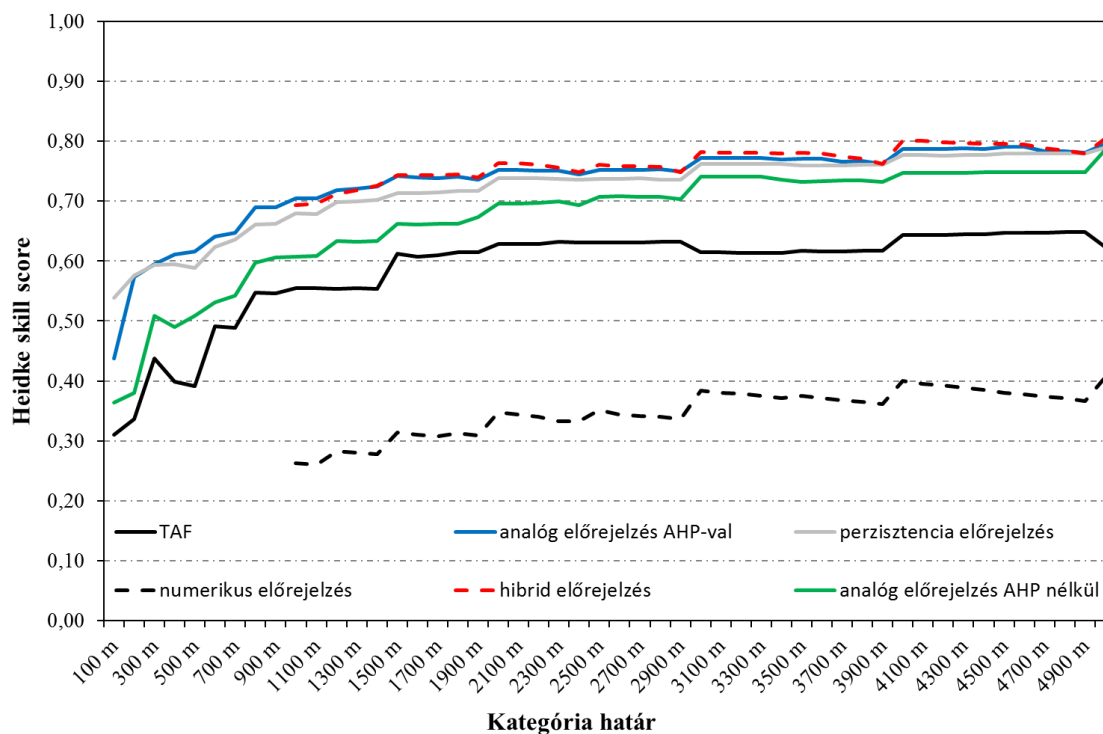
az összes alkalmazott előrejelző eljárásra. A numerikus előrejelzés esetében alkalmazott utófeldolgozó eljárás sajátosságaiból adódóan az előrejelzett látástávolság alsó határa 1000 m. Ennek megfelelően a kategória határok átlagolásánál csak az e fölötti kategóriákat vettük figyelembe, hogy az egyes eljárások eredményei összehasonlíthatóak maradjanak.

Ahogy a 3. ábrán is látszik az AHP módszerrel meghatározott súlyok alkalmazása szignifikánsan javította az analóg előrejelzéseket az előrejelzési időszak első hat órájában. Ráadásul a legnagyobb növekedés az alacsony látástávolságok esetén következett be, ahol a pontos prognózisnak még kritikusabb szerep jut.

A hibrid és az analóg modell egyébként a teljes előrejelzési periódusban hasonló teljesítményt nyújt annak ellenére, hogy az időszak végén a hibrid előrejelzésben a numerikus rész aránya már 80 – 90%. Mindkét előrejelzés grafikonja egyre meggyőzőbben előzi meg a viszonyítási alapként feltüntetett perzisztencia prognózist. A TAF teljesítménye csak az előrejelzési időszak utolsó órájában előzi meg a hibrid előrejelzést, de itt rá kell mutatnunk, hogy a feltüntetett értékek a korábban is említett kategória határookra vonatkozó átlagot jelentik. Alacsonyabb kategória határok esetén a TAF jóval hamarabb,  $t + 0400$  óra körül versenyképessé válik a hibrid előrejelzéssel.



3. ábra A különböző kategória határookra (1000–5000 méterig 100 m-es lépésekkel) és a vizsgált 4 repülőtérre (Szolnok (LHSN) és Kecskemét (LHKE), Pápa (LHPA) és Budapest (LHBP)) vonatkozó átlagos HSS értékek az előrejelzési idő függvényében (Forrás: [10] alapján)



4. ábra Az előrejelzési időszak első 6 órájára vonatkozó átlagos HSS értékek a vizsgált 4 repülőtéren az egyes kategória határok függvényében (Forrás: [10] alapján)

A tisztán numerikus előrejelzés teljesen kiegyenlített teljesítményt mutat, noha az egész előrejelzési periódusban nem éri el a perzisztencia prognózis szintjét. Ahogyan korábban is említettük, a kategorikus előrejelzések verifikációs eljárása során a különböző verifikációs paramétereket a kontingencia mátrix elemeinek segítségével számítottuk ki. Nyilvánvalóan, ha a kategória határ megváltozása nem generál változást a kontingencia mátrix elemeiben, akkor a vizsgált verifikációs paraméterek értéke is azonos marad. Ez könnyen észrevehető a 4. ábrán, ahol az egyes grafikonok vízszintes részeket produkálnak, különösen a magasabb látástávolságok esetén.

Mindez annak a következménye, hogy a látástávolság észlelési és előrejelzési gyakorlat általában az ICAO SPECI és előrejelzés módosítási kritériumokhoz, a repülőtér üzemeltetését befolyásoló határértékekhez és a látástávolság meghatározását szolgáló referenciapontok távolságához igazodik. Emiatt a látástávolság értékek relatív gyakorisága sem az észlelések, sem pedig az előrejelzések esetén nem mutat folytonos eloszlást. Ez a magyarázata a gyakrabban használt, tipikus látástávolság értékek körüli kisebb „ugrásoknak” is. Ez egyben azt is jelenti, hogy azokban az esetekben, amikor a vizsgált változó értékei nem folytonos eloszlást követnek a kategorikus előrejelzések verifikációja során különös körültekintéssel kell eljárni, hogy az ebből adódó fluktuáció kiszűrhető legyen. A 4. ábrán látható eredmények esetén egyedül a 100 méteres kategória határ esetén nem előzi meg az analóg és a hibrid (az értelmezési tartományában) a perzisztencia előrejelzést. Mindkét előrejelzés hasonló, a kategória határ emelkedésével növekvő HSS értékeket produkál. A numerikus modell gyenge eredményei ellenére a hibrid előrejelzés kiváló teljesítményt produkál a kategória eltérésnek megfelelően alkalmazott súlyok miatt. Az előrejelzési periódus első felében a

numerikus rész főleg az olyan előrejelzésekből származik, ahol a kezdeti kategória eltérés alacsony, azaz ahol a numerikus modell jól követi az időjárás alakulását. A TAF HSS értékei legjobban az alacsonyabb kategória határok esetén közelítenek az analóg és a hibrid modellek teljesítményéhez. Az előrejelzési időszak harmadik harmadában (ami már nem látszik a 4. ábrán) a TAF fokozatosan átveszi a vezető szerepet, még a magasabb kategória határok esetén is.

## ÖSSZEGZÉS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Munkánkban bemutattuk az analóg és hibrid elven működő determinisztikus látástávolság előrejelző módszereket és azok teljeskörű verifikációs eredményeit. A vázolt hibrid módszer fuzzy logikán alapuló analóg és korlátos tartományú numerikus előrejelzési modell outputok lineáris kombinációjaként áll elő. A részletes verifikációs eredmények alapján a következő következtetések vonhatók le:

1. az AHP súlyok alkalmazása az analóg előrejelzés során szignifikánsan növeli a látástávolság előrejelzés teljesítményét;
2. az előrejelzések első 6 órájában mind az analóg, mind a hibrid látástávolság előrejelzés lényegesen jobb teljesítményt nyújt a TAF-nál, ami megalapozza a repülőtéri alkalmazhatóságukat ezen az időtávon;
3. annak ellenére, hogy a hibrid előrejelzés az idővel egyre nagyobb arányban támaszkodik a numerikus előrejelzésre, az analóg előrejelzéshez hasonló verifikációs eredményeket produkált. Ez annak köszönhető, hogy az alkalmazott NWP outputok a kezdeti időpontban az észleléssel szemben fennálló kategória különbségnek megfelelően szűrésre kerülnek;
4. annak ellenére, hogy az előrejelzések HSS értékei erősen függenek a kategória határ megválasztásától, az analóg és hibrid előrejelzések minden kategória határ esetén jobb teljesítményt mutatnak, mint a többi előrejelzés. Mindez azt jelenti, hogy alkalmazhatóságuk független a kategória határ megválasztásától.

A fenti eredmények ismeretében az analóg produktumok a Magyar Honvédség katonai repülőterein szolgáló repülésmeteorológusok számára is elérhetővé váltak operatív használatra. Az első tapasztalatok azt mutatják, hogy módszer alkalmazása éppen akkor tudja a legnagyobb segítséget nyújtani, amikor a modellek pontatlansága miatt az előrejelzők kezében fogytán vannak a pontos előrejelzések készítésére alkalmas eszközök. Ezek alapján mind általános, mind pedig speciális repülési feladatok során hasznos eszközként szolgálhatnak a repülések meteorológiai támogatásában.

Az ismertetett kutatási eredmények lehetséges kiterjesztése újabb meteorológiai paraméterek bevonásával valósulhat meg. Ezek közül a legígéretesebbnek a felhőalap magasság előrejelzése tűnik, ami a látástávolsághoz hasonló súlyú paraméter a repülésmeteorológiában, ráadásul ennek előrejelzése is a látástávolsághoz hasonló problémákba ütközik a hagyományos eljárások alkalmazása során. A kutatások egy lehetséges másik folytatási iránya a valószínűségi előrejelzési produktumok létrehozása, ami a leghasonlóbb időjárási szituációk kiválasztása révén talán nem is tűnik olyan távolinak.

**FELHASZNÁLT IRODALOM**

- [1] HERZEGH, P. Development of FAA National Ceiling and Visibility products: Challenges, strategies and progress. 12th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology on 30 January – 02 February 2006, Atlanta, GA, USA, 2006
- [2] BLANKERT, R. L. – HADJIMICHAEL, M. Data mining numerical model output for single-station cloud-ceiling forecast algorithms. *Weather and Forecasting* 22: 1123–1131, 2007
- [3] GHIRARDELLI, J. – GLAHN, B. The Meteorological Development Laboratory’s Aviation Weather Prediction System. *Weather and Forecasting* 25: 1027–1051, 2010
- [4] KEITH, R. – LEYTON, S. M. An experiment to measure the value of statistical probability forecasts for airports. *Weather and Forecasting* 22: 928–935, 2007
- [5] BERGOT, T. – CARRER, D. – NOILHAN, J. – BOUGEAULT, P. Improved site-specific numerical prediction of fog and low clouds: A feasibility study. *Weather and Forecasting* 20: 627–646, 2005
- [6] GROFF, L. S. – PRICE J. M. General aviation accidents in degraded visibility: a case control study of 72 accidents. *Aviation Space and Environmental Medicine* 77.10: 1062–1067, 2006
- [7] GULTEPE, I. – TARDIF, R. – MICHAELIDES, S. C. – CERMAK, J. – BOTT, A. – BENDIX, J. – MÜLLER, M. D. – PAGOWSKI, M. – HANSEN, B. – ELLROD, G. – JACOBS, W. – TOTH, G. – COBER, S. G. Fog research: A review of past achievements and future perspectives. *Journal of Pure and Applied Geophysics* 164: 1121–1159, 2007
- [8] SOUDERS, C. G. – SHOWALTER, R. C. Transformation of NAS to NEXTGEN and FAA’s weather architecture impacts: an update. Aerospace Meteorology, AMS 88th Annual Meeting on 20–24 January 2008, New Orleans, LA, USA, 2008
- [9] DARNELL, K. M. Analysis of weather forecast impacts on United States Air Force combat operations. M.S. Thesis, Department of Meteorology, Naval Postgraduate School Monterey CA, USA, 2006
- [10] TUBA ZOLTÁN – BOTTYÁN ZSOLT Fuzzy Logic-Based Analogue Forecasting and Hybrid Modeling of Horizontal Visibility. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1–13, 2017, <https://link.springer.com/article/10.1007/s00703-017-0513-1> (2017. 03. 10)
- [11] 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 Science (AARMS)*, 12(2): 221–228, 2013
- [12] BOTTYÁN ZSOLT – GYÖNGYÖSI ANDRÁS ZÉNÓ – WANTUCH FERENC – TUBA ZOLTÁN – KURUNCZI RITA – KARDOS PÉTER – ISTENES ZOLTÁN – WEIDINGER TAMÁS – HADOBÁCS KATALIN – SZABÓ ZOLTÁN – BALCZÓ MÁRTON – VARGA ÁRPÁD – BÍRÓNÉ KIRCSI ANDREA – HORVÁTH GYULA Measuring and Modeling of Hazardous Weather Phenomena to Aviation Using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS). *Időjárás*, 119: 307–335, 2015
- [13] BOTTYÁN ZSOLT – WANTUCH FERENC – TUBA ZOLTÁN – HADOBÁCS KATALIN – JÁMBOR KRISZTIÁN Creation of a new climatic database for aviation meteorological support system of unmanned aerial vehicles (in Hungarian). *Repüléstudományi Közlemények* 24(3): 11–18, 2012
- [14] PETTY, K. – CARMICHAEL, B. – WIENER, G. – PETTY M. – LIMBER, M. A fuzzy logic system for the analysis and prediction of cloud ceiling and visibility. 9th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Orlando, Fl., American Meteorological Society, 331–333, 2000
- [15] RIORDAN, D. – HANSEN, B. K. A fuzzy case-based system for weather prediction. *Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications*, 10(3): 139–146, 2002
- [16] HANSEN, B. K. A Fuzzy Logic-Based Analogue Forecasting System for Ceiling and Visibility. *Weather and Forecasting*, 22: 1319–1330, 2007
- [17] SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15: 234–281, 1977
- [18] TUBA ZOLTÁN Selected questions of unmanned aerial vehicles (uavs) and visibility (in Hungarian). *Repüléstudományi Közlemények* 26 (2): 94–105, 2014
- [19] DOSWELL, III C. A. – DAVIES-JONES, R. – KELLER, D. L. On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables. *Weather and Forecasting* 5(4): 576–585, 1990

- [20] NURMI, P. Recommendations on the verification of local weather forecasts. ECMWF Technical Memorandum 430. 2003. <http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2003/11401-recommendations-verification-local-weather-forecasts.pdf>. (2016. 08. 10.)
- [21] BANKERT, R. L. – HADJIMICHAEL, M. Data Mining Numerical Model Output for Single-Station Cloud-Ceiling Forecast Algorithms. *Weather and Forecasting* 22: 1123–1131, 2007
- [22] KLUEPFEL, C. K. TAF verification in the U.S. National Weather Service. NWS Instruction, 10–1601, 2005, <http://www.nws.noaa.gov/directives/010/archive/pd01016001c.pdf>. (2016.08.10.)
- [23] MAHRINGER, G. Terminal aerodrome forecast verification in Austro Control using time windows and ranges of forecast conditions. *Meteorological Application* 15(1): 113–123, 2008
- [24] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO) Meteorological Service for International Air Navigation. Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation, 18th edition, Montreal, Canada, 2013
- 

**APPLICATION OF ANALOGUE AND HYBRID METHODS IN FORECASTING  
OF HORIZONTAL VISIBILITY**

*Forecasting visibility is one of the greatest challenges in aviation meteorology. At the same time high accuracy visibility forecasts can significantly reduce or make avoidable weather related risk in aviation as well. In order to improve forecasting visibility, this research links fuzzy logic based analogue forecasting and post-processed numerical weather prediction model outputs by their linear combination in hybrid forecast, which gradually shifts the focus from statistical to numerical products taking their advantages during the nine-hour-long forecast period. Complete verification of categorical forecasts was carried out. The average value of Heidke Skill Score (HSS) of examined airports of analogue and hybrid forecasts show very similar results even at the end of forecast period where the rate of analogue prediction in the final hybrid output is 0.1–0.2 only. However, in case of poor visibility (1000–2500 m) hybrid (0.65) and analogue forecast (0.64) has similar average of HSS in the first 6 hours of forecast period, and has better performance than persistence (0.60) or TAF (0.56).*

**Keywords:** visibility, hybrid, analogue forecasting, AHP, verification

---

Tuba Zoltán (MSc)  
főtiszt  
Honvédelmi Minisztérium  
Állami Légügyi Főosztály  
tuba.zoltan@hm.gov.hu  
orcid.org/0000-0002-0345-5292

Tuba Zoltán (MSc)  
senior officer  
Ministry of Defence  
State Aviation Department  
tuba.zoltan@hm.gov.hu  
orcid.org/0000-0002-0345-5292

Dr. Bottyán Zsolt, PhD  
egyetemi docens, tanszékvezető  
Nemzeti Közszolgálati Egyetem  
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar  
Katonai Repülő Intézet  
Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék  
bottyán.zsolt@uni-nke.hu  
orcid.org/0000-0003-0729-2774

Dr. Bottyán Zsolt, PhD  
Associate Professor, Head of Department  
National University of Public Service  
Faculty of Military Science and Officer Training  
Institute of Military Aviation  
Department of Aerospace Controller and Pilot Training  
bottyán.zsolt@uni-nke.hu  
orcid.org/0000-0003-0729-2774



[http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017\\_2/2017-2-16-0372\\_Tuba\\_Zoltan-Bottyán\\_Zsolt.pdf](http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-16-0372_Tuba_Zoltan-Bottyán_Zsolt.pdf)

