10.17625/NKE.2019.033

PhD értekezés

Tuba Zoltán őrnagy

- 2019 -

NEMZETI KÖZSZOLGÁLATI EGYETEM
KATONAI MŰSZAKI DOKTORI ISKOLA

Tuba Zoltán őrnagy

Analógiás elven alapuló korszerű látástávolság előrejelző eljárások kidolgozása és értékelése a katonai repülés meteorológiai támogatásához

Doktori (PhD) Értekezés

Témavezető: dr. habil. Bottyán Zsolt őrnagy, PhD

BUDAPEST, 2019.

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS 5

A TUDOMÁNYOS PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA 5

KUTATÁSI CÉLKITŰZÉSEK 7

KUTATÁSI HIPOTÉZISEK MEGFOGALMAZÁSA 7

KUTATÁSI MÓDSZEREK 8

I. A KATONAI REPÜLÉSMETEOROLÓGIAI TÁMOGATÁS RENDSZERE 9

I.1. Szabályozói háttér 9

I.2. A támogatás alapelvei 16

I.3. A támogatás meteorológiai szervezeti elemei 22

I.3.1. Katonai repülőterek meteorológiai csoportjai 24

I.3.2. Központi repülésmeteorológiai szolgálat 27

I.3.3. Missziós katonai műveletek meteorológiai támogatása 30

I.4. Következtetések 32

II. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS 33

II.1. Bevezetés 33

II.2. A látástávolságról általában 35

II.3. A látástávolság előrejelzése 43

II.4. Egyéb repülésre veszélyes jelenségek 64

II.5. Következtetések 74

III. A REPÜLÉSMETEOROLÓGIA REPÜLÉSBIZTONSÁGI ASPEKTUSAI 75

III.1. Bevezetés 75

III.2. A repülésbiztonság és a repülésmeteorológia kapcsolódása 77

III.3. A repülésbiztonság és a repülésmeteorológia kapcsolódásának gyakorlati kérdései 82

III.4. Következtetések 89

IV. ANALÓGIÁS ÉS HIBRID MÓDSZEREK ALKALMAZÁSA A HORIZONTÁLIS LÁTÁSTÁVOLSÁG ELŐREJELZÉSÉBEN 90

IV.1 Bevezetés 90
IV.2. Az analóg előrejelzés 91
IV.3. Az Analytic Hierarchy Process módszer 95
IV.4. Hibrid előrejelzés 100
IV.5. Felhasznált adatok 103
IV.6. Következtetések 106
V. A LÁTÁSTÁVOLSÁG ELŐREJELZŐ MÓDSZEREK ÖSSZEHASONLÍTÓ VERIFIKÁCIÓJA 107
V.1. A verifikációs módszer bemutatása 107
V.1.1. Bevezetés 107
V.1.2. Felhasznált adatok 111
V.1.3. Alkalmazott eljárások 114
V.2. Verifikációs eredmények 126
V.3. Következtetések 136
ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK 137
ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK 140
AJÁNLÁSOK 140
TÉMAKÖRBŐL KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓIM 141
LEKTORÁLT FOLYÓIRATBAN MEGJELENT CIKKEK 141
IDEGEN NYELVŰ KIADVÁNYBAN MEGJELENT CIKKEK 142
KONFERENCIA KIADVÁNYBAN MEGJELENT ELŐADÁS 142
FELHASZNÁLT IRODALOM/IRODALOMJEGYZÉK 143
FOGALMAK ÉS RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE 158
FÜGGELÉK/ MELLÉKLETEK 160

BEVEZETÉS

A TUDOMÁNYOS PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA

A fizikai környezetnek és ezen belül az időjárásnak a katonai műveletekre gyakorolt hatását már az ókorban is megfigyelték. Hosszan lehetne sorolni a történelmi példákat, amikor egy-egy katonai művelet sikerességét jelentősen elősegítette vagy éppen hátráltatta az időjárás alakulása. Már az ókori hadtudósok számára is nyilvánvaló volt a fizikai környezet – ideértve természetesen a légkört is, – egyes változóinak hatása a műveletek végrehajtása során [1]. Komoly műveleti előnyt jelenthetett már csak annak pontos ismerete is, hogy az aktuális légköri állapot vagy az egyes légköri jelenségek milyen hatással bírnak a fizikai környezet más dimenzióira vagy a műveletben résztvevő élőerőre, technikai eszközökre. Tudták, hogy ez az információ befolyással bír a parancsnok döntéseire, azaz mai szavakkal megfogalmazva, fontos szerepe van a döntéshozatali folyamatban. Nyilvánvalóan abban a korban ez az információ inkább vizuális megfigyelések eredményeit és az időjárásról alkotott általános tudás felhasználását jelentette, mintsem konkrét mérési és előrejelzési adatokat. Mindezek ellenére ezen információk figyelembe vétele biztosan nem járt hátránnyal az akkori döntéshozó számára. A modern meteorológiai előrejelzések megjelenésével ez az előny még hatványozottabban jelentkezhet, ha az említett hatásokat a légkör egy jövőbeni állapotára is összegezni tudjuk. Ez lehetővé teszi, hogy a megfelelő meteorológiai információkat ne csak a műveletek végrehajtásának, hanem tervezésének fázisában is felhasználhassuk. Könnyű belátni, hogy a hasonló erőkkel, feltételekkel rendelkező szembenálló felek közül az kerekedik felül, amelyik a döntéshozatali folyamatába hatékonyabban építi be a pontosabb észlelési, előrejelzési adatokat és jobban alkalmazkodik a fizikai környezet által szabott korlátokhoz. Ez fokozottan igaz napjainkban, amikor részletes mérési mezők, távérzékelési adatok és megalapozott meteorológiai előrejelzési információk állnak rendelkezésre, és fokozottan igaz, amikor az időjárásra rendkívül érzékeny repülő technika alkalmazásáról kell döntenie a parancsnoknak. Ráadásul a repülések meteorológiai támogatása során a felhasználói oldal számára tipikusan olyan meteorológiai paraméterek (pl.: *látástávolság*, felhőalap magasság) értékei jelentik a korlátozó tényezőket, amelyek a hagyományos numerikus előrejelző modellek kimeneteiben csak származtatott mennyiségekként jelennek meg. Ennek az az oka, hogy az ezeket alakító fizikai, mikrofizikai folyamatok a numerikus előrejelző modellekben bonyolultságuknak, összetettségüknek köszönhetően legtöbbször csak erősen leegyszerűsítve, parametrizációk formájában jelennek meg.

Ez a sokrétű bizonytalanság és az említett folyamatok időjárási méretskálákon elfoglalt helye azt eredményezi, hogy a repülőtéri előrejelzők számára az egyik legnagyobb kihívásként jelentkezik az olyan általános repülésmeteorológiai paraméterek előrejelzése, mint például a látástávolság.

A fenti kettősséget figyelembe véve arra a következtetésre juthatunk, hogy a meteorológiai támogató rendszer előrejelző elemeinek fejlesztésével, azaz korszerű prognosztikai eljárások kidolgozásával és alkalmazásával a katonai repülés műveleti hatékonysága és általában a repülésbiztonság fokozható. Ennek azonban elengedhetetlen feltétele, hogy az alkalmazandó új eljárások olyan meteorológiai paraméterekhez kapcsolódjanak, amelyek relevanciája a műveletek szempontjából megkérdőjelezhetetlen.

Ezen gondolatmenet eredményeként döntöttem úgy, hogy az értekezésemben a látástávolság előrejelzésének problémakörével, mint a modern repülésmeteorológia egyik legnagyobb kihívásával kívánok foglalkozni, hiszen a légiközlekedés területén a meteorológiai vonatkozású korlátozó határértékek közül az egyik legtöbb a látástávolsághoz kapcsolódik. Ez egyben azt is jelenti, hogy a kidolgozásra és alkalmazásra kerülő prognosztikai eljárások sikere ezen a szűk szakmai területen kecsegtet a legnagyobb pozitív hatással. Döntésemet a fentiek mellett az operatív előrejelzőként eltöltött évtizedes gyakorlat tapasztalatai is megkönnyítették. A repülésmeteorológiai prognózisok készítésekor ugyanis számos alkalommal szembesültem a látástávolság előrejelzésének nehézségeivel. Az előrejelzések hibáit a saját belső indíttatásomon túl a repülési feladatokban érintett állomány is minden alkalommal igyekezett feltárni, ami így teljesen kizárta annak lehetőségét, hogy a kérdéses prognózisok legalább szubjektív verifikáció nélkül maradjanak. Mindez egyértelművé tette az előrejelzések folyamatos és minden részletre kiterjedő ellenőrzésének, verifikációjának szükségességét is, ami az operatív gyakorlati megfontolások mellett az új prognosztikai eljárások validációjához is elengedhetetlenül hozzátartozik. Ennek megfelelően az alkalmazásra kerülő modern eljárások hatékonyságának bizonyításához használt módszertani megközelítések is az értekezésemben megfogalmazott tudományos probléma szerves részét képezik.

KUTATÁSI CÉLKITŰZÉSEK

A fentiekben megfogalmazott tudományos probléma alapján értekezésem kutatási célkitűzéseit az alábbiakban határozom meg:

1. A kutatási területemhez kötődő szakirodalmi vonatkozások felkutatása, áttekintése. A megfogalmazott tudományos probléma megoldását lehetővé tevő, hatékony látástávolság előrejelző módszer kiválasztása.
2. A kiválasztott modern előrejelző módszer hazai környezetben való adaptálása, kialakítása, valamint potenciális fejlesztése.
3. Saját verifikációs módszertan kidolgozása az előrejelző eljárások hatékonyságának bizonyítására és összehasonlító elemzésére.
4. Összetett verifikáció végrehajtása, a módszerek részletes összehasonlító elemzése, alkalmazhatóságuk igazolása a független ellenőrzés alapján.
5. Kutatási hipotéziseim igazolása vagy elvetése, majd összefoglaló következtetések és ajánlások megfogalmazása.

KUTATÁSI HIPOTÉZISEK MEGFOGALMAZÁSA

Tekintettel a megfogalmazott tudományos problémára és kutatási célkitűzéseimre, értekezésemben az alábbi hipotéziseket kívánom igazolni:

1. Feltételezem, hogy az Analytic Hierarchy Process módszer segítségével meghatározott súlyok alkalmazása az analóg előrejelzés során növeli a látástávolság előrejelzés teljesítményét.
2. Úgy vélem, hogy a hibrid előrejelzések teljesítménye a numerikus előrejelzés növekvő súlya ellenére sem mutat szignifikáns visszaesést az analóg előrejelzéshez képest az abszolút kategória eltérést figyelembe vevő súlyozás miatt.
3. Feltételezésem szerint ultrarövid időtávon mind az analóg, mind pedig a hibrid látástávolság előrejelzések gyakorlati alkalmazása magas hozzáadott értéket jelentene a katonai repülések meteorológiai támogatása során.
4. Feltételezem, hogy az analóg és a hibrid látástávolság előrejelzések alkalmazhatósága értelmezési tartományukban független a kategória határ megválasztásától.
5. Úgy vélem, hogy a csökkent látástávolság, mint veszélyforrás pontosabb előrejelzése hozzájárul az ehhez kapcsolódó biztonsági kockázat mérsékléséhez és így a repülések biztonságos végrehajtásához.

KUTATÁSI MÓDSZEREK

Értekezésem összeállításához szükséges tudományos kutatómunkám során az alábbi kutatási módszereket alkalmaztam:

- A szakirodalmi kutatás módszerét alkalmazva – a kutatásomhoz szükséges mértékben – megvizsgáltam és értékeltem a feltételes klimatológiai vizsgálatok alkalmazott módszertanát, elméleti hátterét. Vizsgáltam továbbá a látástávolság előrejelzésével kapcsolatos kutatások és kísérletek eredményeit, különös tekintettel az analógiás módszerek metodikájára. Széleskörűen áttekintettem az Analytic Hierarchy Process eljárás matematikai hátterét részletező szakcikkeket, valamint a módszer gyakorlati alkalmazását bemutató szakirodalmi vonatkozásokat. Alaposan tanulmányoztam a meteorológiai szakterület verifikációs eljárásaihoz kapcsolódó szakcikkeket, különös tekintettel a különböző típusú repülésmeteorológiai produktumok összehasonlító ellenőrzésére.
- A feltárt szakirodalmi ismeretanyagra alapozva az analízis–szintézis módszerét alkalmazva összefüggéseket állapítottam meg a különböző meteorológiai paraméterek feltételes klimatológiai gyakoriságai között, majd a feltárt összefüggéseket felhasználtam az analóg előrejelzések fejlesztésénél használt súlyok meghatározása során. Szintén az elemző vizsgálataimra alapozva választottam ki a verifikációs időszak kijelölése előtt az esettanulmányok lefolytatására alkalmas időjárási szituációkat, melyekkel előrevetítettem az alkalmazott eljárások jövőbeli hatékonyságát.
- Matematikai módszerek alkalmazásával modelleztem az előrejelzési folyamatot. Majd hosszabb időszakra vonatkozó szimuláció segítségével előállítottam a tézisek igazolásához szükséges verifikációs adathalmazt.
- A verifikációs eljárások eredményeinek összehasonlító elemzésére alapozva az indukció módszerét alkalmazva igazoltam hipotézisem megalapozottságát.
- Mind hallgatóként, mind pedig előadóként részt vettem repülésmeteorológiai előrejelzések témakörét érintő hazai és nemzetközi konferenciákon, illetve előadásokon. Kutatómunkám során felhasználtam az azokon szerzett tapasztalatokat.
- A kutatásom során a hazai és nemzetközi konferenciákon, szakmai előadásokon és személyes megkereséseket követően is konzultáltam a témában jártas szakemberekkel. Véleményeiket, tanácsaikat, saját meglátásaimmal ötvözve folyamatosan finomhangoltam kutatási irányaimat, javítottam az esetleges hibás elképzeléseket.

I. A KATONAI REPÜLÉSMETEOROLÓGIAI TÁMOGATÁS RENDSZERE

I.1. Szabályozói háttér

A katonai repülések meteorológiai támogatása során a szabályozói környezet elemeit két fontos szempont szerint csoportosíthatjuk. Egyrészt megkülönböztethetjük a meteorológiai vagy repülésmeteorológiai előírásokat, ajánlásokat, másrészt a katonai szervezeti struktúrával és feladatokkal összefüggésben azonosíthatjuk a különböző katonai szabályozókat. A szabályozói környezet elemei azonban az esetek egy részében nem választhatók egyértelműen külön, azaz a két területet összevontan kezelik. Mindez azt jelenti, hogy a két halmaznak vannak közös elemei, így azok nem tekinthetők diszjunktnak. A katonameteorológia, mint a meteorológiai szakterületen belül elhelyezkedő önálló szakág feladata pedig a szabályozói környezet közös elemei által meghatározott terület szakmai feladatainak ellátása.

A katonai terület szabályozása alapdokumentumainak a Magyar Honvédség különböző szintű doktrínáit tekintjük, amelyek feladata az adott szint vonatkozásában meghatározni azokat a követendő irányító elveket, amelyek a műveletek sikerének leghatékonyabb elérését szolgálják. Jelen keretek között ezek részletes bemutatása nem cél ugyan, de a meteorológiai támogatás katonai doktrínákban elfoglalt helye egyértelműen jelzi, hogy a meteorológiai támogatás fontossága megkérdőjelezhetetlen. Amellett ugyanis, hogy a meteorológiai támogatás alapelvei önálló doktrínában jelennek meg [2], a legmagasabb szintű hazai katonai doktrínák is rendelkeznek a meteorológiai információk felhasználásának mikéntjéről [3][4]. Mindezek természetesen szoros összhangban vannak a szövetségesi standardokban megfogalmazott alapelvekkel, ahol hasonlóan magas doktrinális szinteken [5][6] jelennek meg a meteorológiai támogatás alapelvei a saját önálló támogatási doktrínájuk mellett [7]. A jól tisztázott elméleti háttér mellett azonban nem minden esetben található meg egyértelműen a gyakorlati, technikai megvalósítás leírása. Azaz annak a pontos meghatározása, hogy a döntéshozatali folyamatba mikor, hol és milyen adatok valamint technikai eszközök felhasználásával kapcsolódik be a meteorológiai támogatás. Szövetségesi szinten ezek az információk NATO egységesítési egyezmények (STANAG), technikai leírások (Techniques publication), harcszabályzatok (Field manual) vagy munka- és eljárásrendek (Standard operational procedures) szintjén jelennek meg. Sajnos hazai vonatkozásban ugyanez nem minden esetben lelhető fel. Jó példa erre, hogy míg hazai vonatkozásban a munka és eljárásrendek a meteorológiai csoport által előállított produktumok mintáit mutatják be, addig az amerikai légierő meteorológiai

egységeinél ezek a szabályozók a prognózisok készítésének technológiai leírását és az alkalmazott módszereket is részletesen tartalmazzák. Ráadásul az eltérő technikai eszközrendszer és a gyakran nem egyformán értelmezett vagy alkalmazott szabványos meteorológiai formátumok nem teszik lehetővé a szövetségesi szinten meglévő szabályozók közvetlen átvételét.

A meteorológiai szakterület vonatkozásában csak a STANAG-ek szintje jelenik meg hazai jogszabályokba iktatva. Az elfogadott egységesítési egyezmények ratifikálása és alkalmazásának előírása Honvéd Vezérkar főnök helyettesi szakutasítások útján történik.

STANAG száma	**Ratifikált és implementált egységesítési egyezmény megnevezése**
2507	ALLIED JOINT DOCTRINE FOR METEOROLOGICAL AND OCEANOGRAPHIC SUPPORT TO JOINT FORCES - AJP-3.11 EDITION A
4044	ADOPTION OF A STANDARD ATMOSPHERE
6013	NATO METEOROLOGICAL SUPPORT MANUAL - AMETOCP-2 EDITION A
6014	NATO METEOROLOGICAL AND OCEANOGRAPHIC (METOC) COMMUNICATIONS MANUAL - AMETOCP-3 EDITION A
6015	NATO METEOROLOGICAL CODES MANUAL - AWP-4 (B)
6022	ADOPTION OF A STANDARD GRIDDED DATA METEOROLOGICAL MESSAGE

1. táblázat: A Magyar Honvédség meteorológiai támogató tevékenységét érdemben érintő ratifikált és implementált egységesítési egyezmények

Ahogyan az az 1. táblázat alapján is látható, a ratifikált és implementált egységesítési egyezmények témái a meteorológiai támogatás doktrinális kérdéseitől kezdve, a tényleges megvalósítás technikai részleteit tartalmazó leírásokig terjednek. Ezekben részletesen tárgyalásra kerülnek például az alkalmazott meteorológiai kódformátumok is, amelyek – ahol alkalmazható – természetesen összhangban vannak azokkal a polgári szabályozókkal, amelyek később ismertetésre kerülnek.

A tisztán katonai szabályozói háttér mellett a legmagasabb szintű jogszabály, ami a repülésmeteorológia tárgykörével foglalkozik a Légiközlekedésről szóló 1995. évi XCVII. törvény (Lt.) és a hozzá tartozó, a végrehajtásáról szóló 141/1995. (XI. 30.) kormányrendelet.

A Lt. 50. § mondja ki, hogy „a repülőtéren a biztonságos használat érdekében külön jogszabályban meghatározott szolgálatokat (légiforgalmi-, repülőtéri koordinációs-, repülésmeteorológiai-, tűzoltó-, mentő-, elsősegélynyújtó-, repülőegészségügyi-, műszaki-mentő-, rendőri-, repülésvédelmi-, közegészségügyi- stb. szolgálat), továbbá távközlő-, rádiónavigációs-, fénytechnikai- stb. berendezéseket kell működtetni.” Emellett a Lt.74. § szerint az alábbiak meghatározására felhatalmazást kap: „b) a miniszter, hogy a légiközlekedés biztonságos és zavartalan végrehajtását biztosító léginavigációs, távközlő, meteorológiai és egyéb berendezések létesítésének, megváltoztatásának, megszüntetésének, üzemben tartásának a részletes szabályait, valamint hatósági felügyeletének szabályait és rendjét,”…. i) a környezetvédelemért felelős miniszter, hogy a miniszterrel és a honvédelemért felelős miniszterrel, valamint az adópolitikáért felelős miniszterrel egyetértésben a repülésmeteorológiai tájékoztatások és előrejelzések szolgáltatásával, ellenőrzésével, ezek díjazása és költségei megosztásával összefüggő feladatok rendjét és szabályait”

A két érintett rendelet közül az előbbi a 68/2011. (XI. 30.) NFM rendelet, amely a léginavigációs és a légiközlekedés biztonságát szolgáló egyéb földi berendezések engedélyezési eljárásáról és hatósági felügyeletéről rendelkezik. Az utóbbi pedig a 17/1997. (VI. 25.) KTM–KHVM–HM együttes rendelet a repülésmeteorológiai szolgáltatás rendjéről szóló szabályzat kiadásáról, amely a mellékletében részletesen szabályozza a repülésmeteorológiai szakterület működését. A melléklet 3. pontja egyértelműen tisztázza a meteorológiai kiszolgálással kapcsolatos feladatköröket, mely szerint: „A polgári repülések meteorológiai kiszolgálását az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) és a polgári repülőtér üzembentartója, a katonai repülések meteorológiai kiszolgálását a katonai repülőtereken az MH Meteorológiai Szolgálat biztosítja.” A rendelet mind a polgári, mind pedig az állami célú légiközlekedéssel kapcsolatos repülésmeteorológiai feladatokat rögzíti, azonban eltérő részletességgel. Ennek az az oka, hogy a katonai repülések meteorológiai kiszolgálásának részletes szabályainak meghatározását az MH Meteorológiai Szolgálatának főnöke (MH Geoinformációs Szolgálat (GEOSZ) szolgálatfőnök) hatáskörébe delegálja.

Ennek a hatáskörnek a birtokában került kiadásra a Geoinformációs Szolgálat kiadványaként a *Kézikönyv a meteorológiai támogatás végrehajtásáról* című főnökségi kiadvány, melyet a Honvéd Vezérkar főnökének az 50/2014 (HK 4.) HVKF szakutasítása léptetett életbe. A kézikönyv általános rendelkezései többek között meghatározzák a meteorológiai támogatás céljait, az alkalmazandó alapelveket és előírásokat, valamint a katonai szervezetek meteorológiai támogatásának szükségességét és a meteorológiai szolgálatok feladatait. A jól

definiált feladatrendszerhez ezt követően a rendelet kijelöli azt a szervezeti struktúrát, amelyben a katonai meteorológiai szolgálat a leghatékonyabban végre tudja hajtani a Magyar Honvédség meteorológiai támogatását. A katonai meteorológiai szolgálat központi szakmai irányító szerveként pedig az MH Geoinformációs Szolgálatot jelöli ki, amelyből egyenesen következik, hogy a geoinformációs szolgálatfőnök szakmai elöljárója a Magyar Honvédség teljes meteorológiai szakállományának.

A kézikönyv ezek után részletesen tisztázza az egyes szervezeti elemek és beosztások esetében a meteorológiai támogatás tervezését és végrehajtását érintő hatásköröket, jogköröket és feladatokat. Az ezekben részletezett információk nem csak a szakmai felhasználóknak szólnak, ezek alapján akár a laikus érdeklődők vagy a támogatás során érintett szervezeti elemek is részletes képet kaphatnak az elvárható szolgáltatások, támogatási formák vonatkozásában.

A tényleges meteorológiai támogatás alapelveit, végrehajtásának gyakorlati megvalósítása során követendő előírásokat a kézikönyv VIII-X. fejezetei határozzák meg, mindezt a támogató tevékenységeknek megfelelő tagolásban: észlelés, előrejelzés és tájékoztatás.

A kézikönyv XI. fejezete írja elő tételesen az egyes támogató elemek számára a vezetőik által kidolgozott munka- és eljárásrend tartalmi elemeit. Ebből következik, hogy a katonai repülőterek meteorológiai csoportjai, az LVIK repülésmeteorológiai központja és az MH GEOSZ Időjárás előrejelző és szakkiképzési osztálya egytől-egyig rendelkezik a meteorológiai támogatás legalsóbb szintű szabályozó dokumentumával, azaz a munka- és eljárásrenddel. Ezek a dokumentumok a teljesség igénye nélkül tartalmazzák a támogató elem rendeltetését és feladatait, a szolgálati alá- és fölérendeltségi viszonyokat, a munkarendjét valamint a meteorológiai szaktevékenység végrehajtásához szükséges részletes technológiai leírásokat.

A kézikönyv a tájékoztató mellékletek mellett megadja a vonatkozó referencia okmányokat is, amelyek között nyilvánvalóan nem csak katonai szabályozók találhatók. Ahogyan a fejezet elején is említettem a katonai repülésmeteorológiai támogatás rendszere polgári vonatkozású előírásokat is követ, amelyek a Meteorológiai Világszervezet (World Meteorological Organization – WMO) és a Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (International Civil Aviation Organization – ICAO) alapdokumentumai:

- Meteorological Services for Air Navigation, WMO Technical Regulations, Volume II. (WMO No. 49)
- Meteorological Service for International Air Navigation (Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation)

A fenti szervezetek az ENSZ szakosított intézményei, melyek közül az előbbi a meteorológiai szakterületért, az utóbbi pedig a polgári légiközlekedésért felelős. A repülésmeteorológia kérdéskörét más-más aspektusból közelítik meg. A WMO a meteorológiai alapok felől közelíti meg a repülések kiszolgálását, míg az ICAO a repülés szemszögéből találja meg a meteorológiai támogatás szükségességét. Ennek megfelelően a WMO az alap meteorológiai infrastruktúra és a globális meteorológiai távközlési rendszer üzemeltetésével, valamint a nem repülésmeteorológiai produktumok, információk előállításával kapcsolatos szabályok, előírások meghozataláért felelős. Ezzel párhuzamosan az ICAO a repülésmeteorológiai (gyakorlatilag repülőtéri) infrastruktúra üzemeltetésének, valamint a repülésmeteorológiai szolgáltatások és produktumok szabályozásának feladatait felügyeli. Bár teljesen független intézményeknek tűnnek, az egységes és egyértelmű szabályozás és felügyelet megköveteli szoros együttműködésüket, ami a tanácsok közötti formális kapcsolatban ölt testet. Az ennek keretében elfogadott módosítások így az elfogadó szervezetnél is átvezetésre kerülnek: az alkalmazott szabályrendszer összehangolt, konzisztens és globális szinten elfogadott módon segíti a repülésmeteorológiai támogatás szabályszerű alkalmazását.

A meteorológiai szakterület szabályozói hátterének áttekintését követően nem hagyhatjuk figyelmen kívül a hatósági felügyelet kérdését sem, hiszen ezek az üzemeltetéssel kiegészülve alkotnak egységes egészet. A hatósági felügyelet vonatkozásában a Légügyi törvény kimondja, hogy „az állami célú légiközlekedéssel összefüggő hatósági feladatokat katonai légügyi hatóság látja el.” Ezzel párhuzamosan felhatalmazza a Kormányt, hogy rendeletben jelölje ki a katonai légügyi hatóságot. A 392/2016. (XII. 5.) Korm. rendelet katonai légügyi hatóságként országos illetékességgel a honvédelemért felelős minisztert jelöli ki. A rendelet szerint a katonai légügyi hatóság hatásköre kiterjed:

a) az állami célú légiközlekedési szakszemélyzetekre és azok tevékenységével,

b) az állami légijárművekkel, és a pilóta nélküli állami légijárművekkel,

c) az állami repülések céljára szolgáló repülőterekkel és a közös felhasználású repülőterekkel,

d) a kizárólag az állami repülések céljára szolgáló repülési létesítményekkel és léginavigációs földi berendezésekkel, valamint

e) az állami légiközlekedéssel és légiközlekedéssel összefüggő tevékenységekkel kapcsolatos hatósági tevékenységre.

Ezen belül a katonai légügyi hatóság feladatai a meteorológiai szakterület vonatkozásában kiterjednek:

c) az állami repülések céljára szolgáló repülőterek, közös felhasználású repülőterek, valamint a kizárólag állami repülések céljára szolgáló földi léginavigációs berendezések üzembentartásának engedélyezése, hatósági felügyelete, indokolt esetben az üzembentartási engedély felfüggesztése vagy visszavonása, a repülőtérrendek jóváhagyása;

k) az állami célú légiközlekedésben bekövetkezett légiközlekedési események közigazgatási hatósági eljárás keretében történő vizsgálata;

t) az állami célú légiközlekedésben a repülésmeteorológiai szolgálatok, illetve szolgáltatások hatósági felügyeletének ellátása;

u) repülésmeteorológiai fejlesztések, korszerűsítések engedélyezése, megvalósításának ellenőrzése;

v) a repülésmeteorológiai tárgyú képzési tervek jóváhagyása az állami célú légiközlekedésben;

x) állami célú légiközlekedéssel összefüggő intézkedések, kézikönyvek és egyéb szabályozások jóváhagyása;

y) részvétel az állami célú légiközlekedéssel összefüggő hazai és külföldi szakmai rendezvényeken.

A fenti felsorolásból talán a c) és a k) pont az, ami némi pontosításra szorul. A c) pont meteorológiai vonatkozásai az állami repülések céljára szolgáló repülőterek és a közös felhasználású repülőterek üzemben tartásához kapcsolódóan a korábban már idézett Lt. előírásaihoz, azaz a meteorológiai szolgálat megfelelő üzemeltetéséhez, a repülőtérrendek esetében pedig az abban foglalt meteorológiai információkhoz tartozóan jelennek meg. Az állami repülések céljára szolgáló földi léginavigációs berendezések pedig maguk közé foglalják magát a repülőtéri meteorológiai mérőrendszert, beleértve ebbe a szenzoroktól kezdve, az adatgyűjtő és adatátviteli eszközökön át, a megjelenítőig bezárólag annak minden szegmensét. Ezek az eszközök természetesen nem csak hagyományos értelemben vett egyszerű meteorológiai érzékelők lehetnek, hanem ide tartozik például a teljesség igénye nélkül a meteorológiai lokátor és a villámdetektor is.

A k) pontban említett hatósági eljárás és az annak keretében lefolytatott vizsgálat pedig nem a bekövetkezett légiközlekedési esemény szakmai vizsgálatát jelenti, hanem egy olyan, szakterületi kérdéseket is tisztázó kivizsgálást, amelynek elvárt eredménye az eseménnyel kapcsolatos esetleges felelősségek megállapítása.

I.2. A támogatás alapelvei

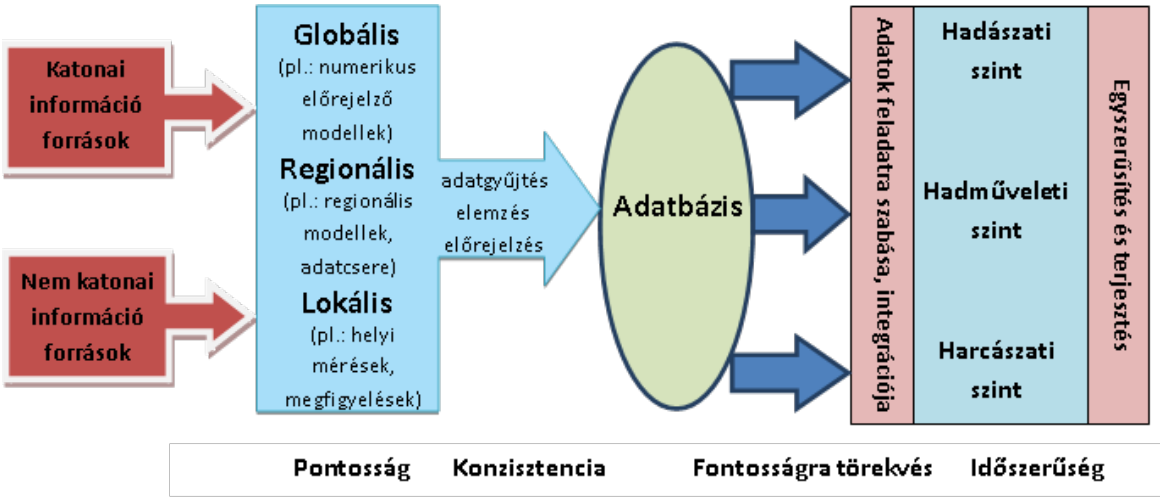
A Geoinformációs Támogatási Doktrína definíciója szerint: „a geoinformációs támogatás a katonai szervezetek feladatai tervezéséhez és végrehajtásához szükséges térképészeti és katonaföldrajzi anyagok tervezésével és biztosításával, valamint a meteorológiai támogatás tervezésével és végrehajtásával kapcsolatos tevékenységek és rendszabályok összessége, amely magába foglalja a térképészeti és katonaföldrajzi anyagok és adatok, valamint a meteorológiai információk előállítását és beszerzését, az MH, illetve a NATO szervezeteihez történő időbeni eljuttatását, valamint az anyagok és az információk használatára történő felkészítést." [2] Ezen belül a meteorológiai támogatás „a különböző katonai műveletek számára nélkülözhetetlen meteorológiai információ biztosítása a döntéshozó számára a tevékenység tervezésének és végrehajtásának elősegítése, a hatékonyság fokozása, valamint az élet- és vagyonbiztonság növelése céljából." [2] A fenti két meghatározás a meteorológiai támogatás szempontjából a gyakorlatban a meteorológiai információ gyűjtését/előállítását, feldolgozását és terjesztését jelenti. A meteorológiai információ gyűjtésén/előállításán a hazai és nemzetközi kommunikációs csatornákon érkező meteorológiai adatok (táviratok, távérzékelési, előrejelzési produktumok, stb.) fogadását valamint a mérési, megfigyelési feladatok végrehajtásán és a saját produktumok generálásán keresztül adatok létrehozását értjük. A katonai szakterület kiszolgálása azonban csak a következő feladatok végrehajtásában tér el markánsan a hagyományos nem katonai vonaltól. Esetünkben ugyanis a feldolgozás jelenti az információ – a korábbiakban már említett – egyszerűsítését, feladatra szabását, amelynek segítségével az a döntéshozatali folyamatban maximális hatékonysággal kerül felhasználásra. A terjesztés szempontjából természetesen az információ megfelelő formába alakításán túl az a legfontosabb, hogy az a döntéshozatali folyamat során alkalmazott technikai rendszerekkel kompatibilis formátumban történjen meg, lehetőség szerint olyan platformon, ami megegyezik a döntéshozatali folyamatban használt technikai háttérrel.

A NATO az Integrált Meteorológiai és Oceanográfiai támogatás (IMETOC) koncepciójában határozta meg a meteorológiai támogatással kapcsolatos irányelveket és feladatokat, amelyeknek a végrehajtását a NATO Integrált Meteorológiai és Oceanográfiai Koordinációs Központ (NIMCC) koordinálja. Az integrált támogatás végrehajtása során magának a meteorológiai támogatásnak az alapvető célja, hogy a Rapid Environmental Assessment (REA) és a Recognized Environmental Picture (REP) kialakítását meteorológiai és oceanográfiai információk biztosításával segítse. A REA egy közel valós idejű értékelése a műveleti környezetnek, amely magába foglalja az összes olyan meteorológiai oceanográfiai hidrológiai,

geológiai, stb. környezeti változót, amik hatást gyakorolnak a műveletben részt vevő erők képességeire és teljesítményére. A támogatás itt természetesen az adatgyűjtéstől az adatok továbbításán keresztül, az adatok kiértékeléséig tartó teljes meteorológiai támogató ciklust tartalmazza. A REA fontos építőkövét képezi a REP-nek, ami egy teljes, hézagmentes képet nyújt a műveleti környezetről egy adott területre és időpontra vonatkoztatva, annak érdekében, hogy növelje a műveleti hatékonyságot. Nem szabad azonban arról elfeledkeznünk, hogy a REP által hordozott információk csak és kizárólag a műveleti környezetre vonatkoznak. A REP kialakításával az alapvető cél egy olyan adategyüttes létrehozása, amelynek releváns információi biztos építőkövét képezhetik egy olyan hézagmentes, valósidejű képnek, amely a műveletben résztvevő erőkkel és technikai eszközökkel kapcsolatos összes információt tartalmazza. Haderőnemi példákkal élve létrehozható például földi (RGP – Recognized Ground Picture) vagy légi (RAP – Recognized Air Picture) kép is. Ezek alapján a REP elsősorban a stratégiai és a hadászati szintek számára nyújt iránymutatást a döntéshozatali folyamatban, de harcászati szinten is támogatja a döntéshozókat. A REP nagy előnye az elemei közötti szinergia, ami lehetővé teszi, hogy az egyes információk egyedi értékelése helyett, a döntések során a nagyobb hatékonysággal alkalmazható összesített képet vegyük figyelembe. Erre kiváló példa az ABV (atom-biológiai-vegyi) veszélyértékelés (CBRN threat analysis), ami a nagy felbontású települési adatbázisok, a meteorológiai körülmények, a kémiai diszperziós modellek kimeneti eredményei és topográfiai információk együttes figyelembe vételével állít elő a felhasználói igényekhez igazodó egyszerűsített képet a potenciális vagy valós ABV veszélyekről [10]. Nyilvánvalóan nem várható el a döntéshozótól, hogy a fentiekben felsorolt tényezők egyedi mérlegelésével azonos idő alatt és azonos szakmai színvonalon legyen képes a döntés meghozatalára.

A meteorológiai támogatás végrehajtása során nemzeti vonatkozásban a Geoinformációs támogató doktrínában meghatározott alapelvek figyelembe vételével kell eljárni, amelyek közül az alábbiakban a legfontosabbak kerülnek ismertetésre a teljesség igénye nélkül. „Az időjárási folyamatok változékonysága miatt a dinamikus meteorológiai információk természetüknél fogva rövid idő alatt elveszítik aktualitásukat, ezért törekedni kell arra, hogy a geoinformációs tájékoztatás mindig aktuális információkkal álljon készen a döntéshozatal elősegítésére.” [2] Ez teremti meg a lehetőségét annak, hogy a parancsnok a döntéshozatali folyamat során számításba vegye az időjárás műveletekre gyakorolt hatását. Ez az *időszerűség* alapelve, amelyhez elengedhetetlenül szükséges, hogy a kommunikációs rendszerek ne jelentsenek szűk keresztmetszetet a kurrens meteorológiai információ áramlása számára. A *fontosságra törekvés*

a rendelkezésre álló összes meteorológiai információ előszűrését jelenti, méghozzá oly módon, hogy azok a leghatékonyabban szolgálják a döntéshozatalt. Azaz a katonai felhasználók által előzetesen meghatározott szempontrendszer figyelembe vételével, a felhasználói igényekhez és a műveletek szükségleteihez igazodva kell végrehajtani a döntéshozók információkkal való ellátását, támogatását. Kiemelt szerepe van még a szövetséges katonai tevékenység során a *konzisztencia* elvének, amely rögzíti, hogy a „környezeti információk katonai műveletekre gyakorolt hatásainak egységes figyelembe vétele miatt a műveleti területen belül egységes geoinformációs tájékoztatásra van szükség." [2] Ez tulajdonképpen az „egy hadszíntér egy előrejelzés" elvét mondja ki, amely nélkül a döntéshozatali folyamatba objektív okokra visszavezethetően is kerülhetnek olyan egymásnak ellentmondó információk, amelyek nem hogy segítik, de egyenesen akadályozzák a döntés hatékony meghozatalát. „A geoinformációs információ csak akkor használható fel hatékonyan, ha a tájékoztatás kellően pontos és mindenkor megbízható" – mondja ki a *pontosság* alapelve [2], amely teljesen egyértelműnek és magától értetődőnek tűnik. Ugyanakkor sokszor komoly kihívást jelent a meteorológiai támogatásban résztvevő szakemberek részére, hiszen ahogyan a fentiekben is említettük, gyakran objektív okok miatt a mérési, távérzékelési és előrejelzési adatok hibával terheltek. Ez a hiba az észlelési folyamat során a mérési bizonytalanságra, a távérzékelési produktumok esetében a rendszer korlátaira, a numerikus előrejelzéseknél pedig az előrejelzési egyenletrendszer nemlineáris mivoltára és közelítő megoldására vezethető vissza.



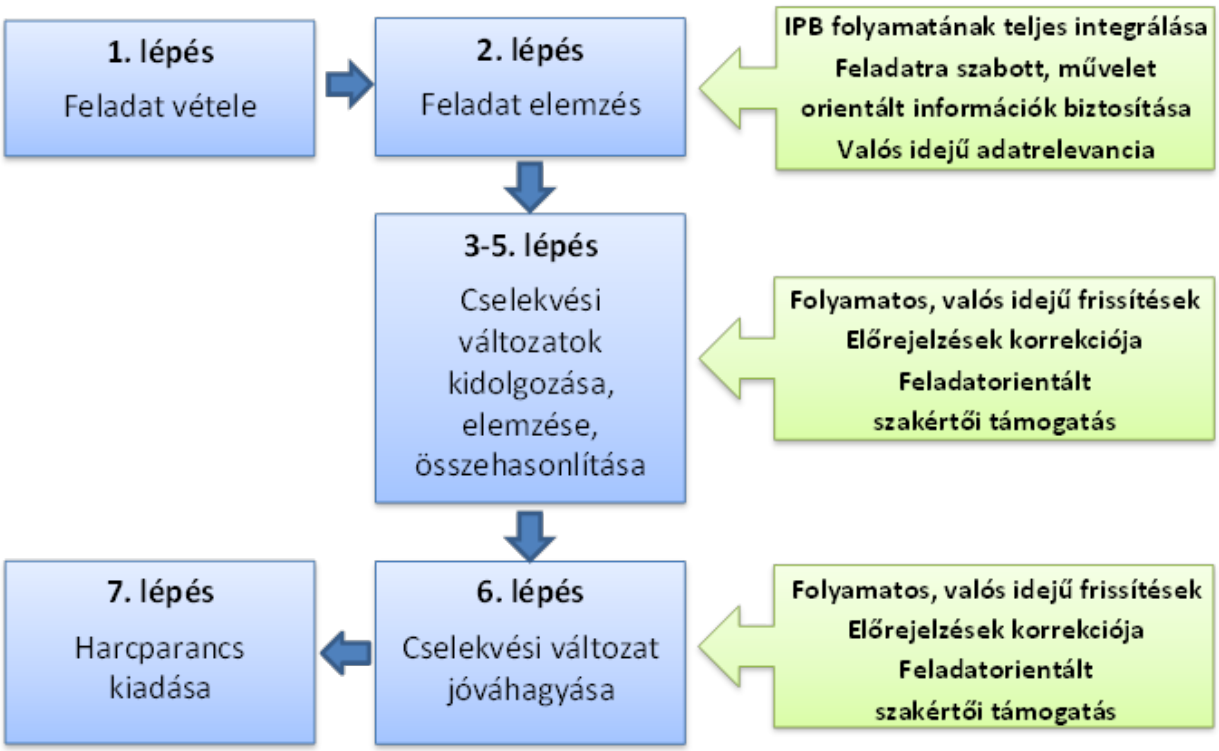
1. ábra: A meteorológiai támogatás sematikus vázlata és főbb alapelvei (Joint Publication 3-59 Meteorological and Oceanographic Operations – alapján [11])

Szövetségi szinten az *Allied Doctrine for Meteorological and Oceanographic Support to Joint Forces – AJP-3.11 (STANAG 2507)* doktrína rendelkezik a meteorológiai támogatás során követendő alapelvekről. Mivel a hazai szakterületi támogató doktrína igazodik a szövetségesi

szinten meghatározott standardokhoz, így nem meglepő, hogy a kettő alapelvei jól lefedik egymást. Ki kell azonban emelnünk, hogy itt talán az utoljára említett konzisztencia alapelve kapja a legnagyobb hangsúlyt, amely a többnemzeti támogatás végrehajtása során alapvető fontosságú.

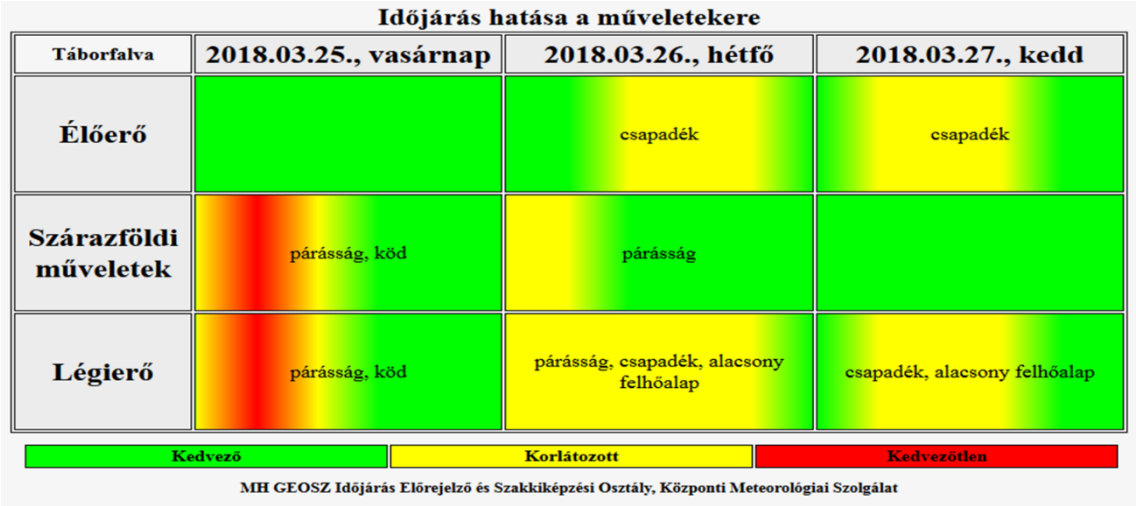
A meteorológiai támogatás pontos szerepének megértése érdekében most áttekintek egy részletesen leírt, általánosan elfogadható döntéshozatali folyamatot, ami érdemben nem tér el sem a hazai gyakorlatban, sem pedig mértékadó nemzetközi példákban (pl.: Marine Corps Planning Process – MCPP) alkalmazott eljárásoktól. Ennek kiválasztásánál az elsődleges cél nem a hazai működési környezet vagy annak alkalmazott eljárásainak bemutatása, ezért az US Army és a NATO által alkalmazott modern, katonai döntéshozatali folyamat (Military Decision-Making Process – MDMP) került kiválasztásra. Amiatt, hogy vizsgálataimat alapvetően a meteorológiai aspektusok motiválják, a döntéshozatali folyamat ismertetésének mélysége is ehhez igazodik. Ennek megfelelően a kiválasztott döntéshozatali folyamat csak vázlatosan kerül bemutatásra, a nagyobb hangsúlyt az kapja, hogy a meteorológiai információk hogyan kapcsolódnak a döntéshozatali folyamat egyes lépéseihez és hogy milyen az azokra gyakorolt hatásuk. Kiemelt figyelmet fogok azonban fordítani a hadszíntér/harcmező felderítő előkészítésének (Intelligence Preparation of Battlefield/Battlespace – IPB) szerepére, amely egyrészt szorosan kapcsolódik a katonai döntéshozatali folyamathoz, másrészt lépéseiben szervesen integrálja a meteorológiai információkat.

A döntéshozatali folyamat során a cél annak a cselekvési változatnak a kiválasztása, amely a kívánt végállapothoz legközelebb segíti a döntés meghozatalában érdekelt felet. A teljes folyamat magába foglalja annak eldöntésétől kezdve, hogy egyáltalán hozunk-e döntést, a döntés tartalmán és meghozatali idején keresztül még a döntés következményeinek megértését is. A döntéshozatali folyamat rengeteg bemeneti információt igényel, amelyek a folyamat megfelelő lépésében feldolgozásra kerülnek. Végső eredménye pedig egy harcparancsként testesül meg, melynek „célja a tervezés és a végrehajtás közötti összhang megteremtése” [12].



2. ábra: A katonai döntéshozatali folyamat egyes lépései és azok meteorológiai vonatkozásai ([11][13] alapján)

A vizsgálatom tárgyát képező katonai döntéshozatali folyamat a feladat vételével kezdődik, ahogyan ez a 2. ábrán is látható. Ezután következik a döntéshozatali folyamat meteorológiai szempontból talán legfontosabb lépése a kapott feladat analízise, a problémás területek felvázolása. Ennek során nem csak a feladat pontos megértése, a műveletek céljának tisztázása az elsődleges, hanem többek között ide tartozik a művelet szempontjából releváns összes rendelkezésre álló információ mélyreható minőségi elemzése is. Nyilvánvaló, hogy az ezen a ponton elérhető információk többsége felderítő forrásból származik és ezzel el is érkeztünk az IPB kiemelt szerepéhez. Ezek az adatok ugyanis elengedhetetlenek az aktuális helyzet teljes megértéséhez és ezáltal a folyamatban történő továbblépéshez. A hagyományos értelemben vett felderítő információk (pl.: hírszerzési adatok) mellett ide tartoznak a terepre, az éghajlatra és az időjárásra vonatkozó adatok is. Ezek azonban itt már feladatra szabott formában, műveletorientáltan jelennek meg. Erre mutat példát a 3. ábra, ahol az időjárás egyes műveletekre gyakorolt előrejelzett hatását egy úgynevezett hatásmátrixon ábrázolják.



3. ábra: Időjárási hatásmátrix (Forrás: MH Metportál)

A második lépés elemző munkája és megfelelő következtetések levonása után kezdődik meg a cselekvési változatok kidolgozása, amelynek keretében meghatározzák a parancsnoki elvárásoknak eleget tevő, elfogadható kockázatú lehetséges megoldásokat a műveletek végrehajtásához [12]. A kidolgozó munka után a cselekvési változatok elemzése/modellezése és összehasonlítása következik. A fenti lépések mindegyikének szerves részét képezi a rendelkezésre álló meteorológiai információk folyamatos aktualizálása, azaz az esetlegesen változó meteorológiai helyzet és előrejelzések frissítése. Ennek elmaradása dinamikusan változó időjárás esetén ugyanis egy kockázatosabb, extrém esetben végrehajthatatlan cselekvési változat kiválasztásához vezethet. Gondoljunk csak bele, hogy mit ér egy olyan műveleti terv, amely az adott művelet sikerességét arra a légi komponensre alapozza, amely például az erősen jegesítő körülmények miatt nem képes felszállni az éppen szakadó ónos esőben.

Ez után megszületik a döntés, azaz a cselekvési változat kiválasztása és jóváhagyása. Optimális esetben ez a lehető legalacsonyabb kockázattal jár, és végeredményben ez visz legközelebb a kívánt végállapothoz. A katonai döntéshozatali folyamatot a harcparancs kiadása zárja le, amely egyértelműen meghatározza az alárendeltek számára a tervezett művelet végrehajtásának részleteit, integrálva a korábbi lépések során összegyűlt releváns információkat és következtetéseket.

I.3. A támogatás meteorológiai szervezeti elemei

Ebben a fejezetben a meteorológiai támogatás szakmai, kiszolgáló oldalát képező szervezeti elemek kerülnek vázlatosan bemutatásra. Ennek nem célja a szervezeti struktúrák és feladatok hiánymentes bemutatása, sokkal inkább egy olyan áttekintő kép nyújtása, ami nem téveszti szem elől az értekezés témáját és megfogalmazott céljait.

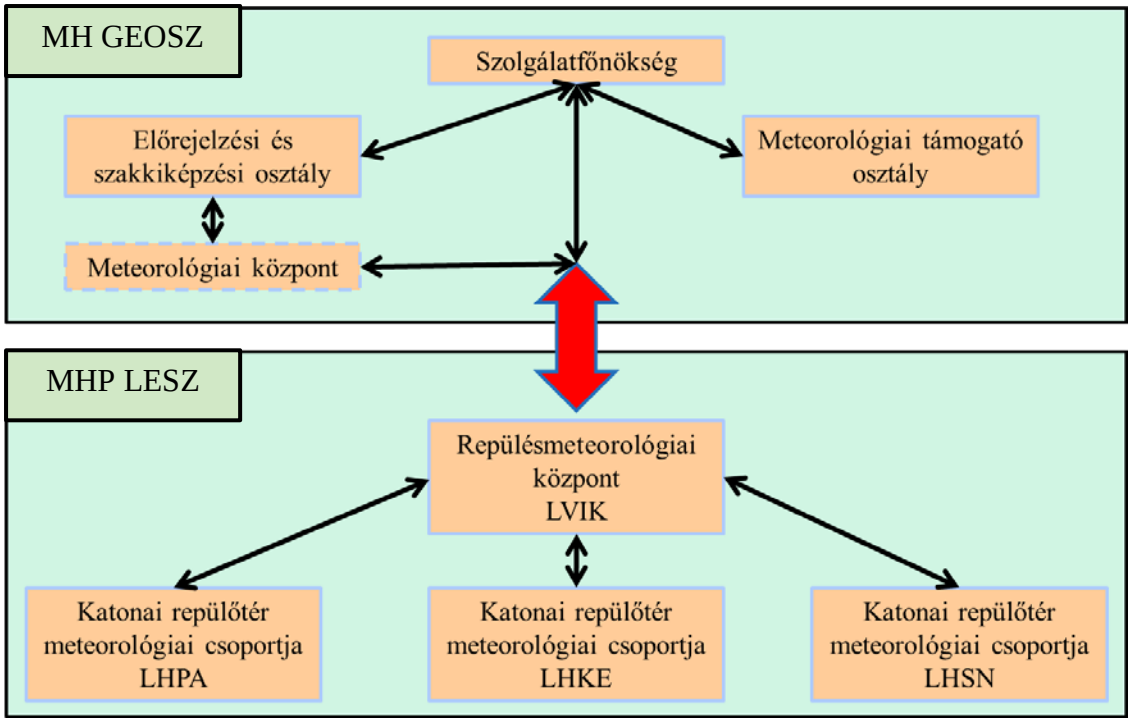
A meteorológiai támogatás végrehajtásáról szóló főnökségi kiadványt (Kézikönyv) a Magyar Honvédségnél a Honvéd Vezérkar főnökének az 50/2014 (HK 4.) HVKF szakutasítása léptette életbe. Ez a kiadvány tételesen megjeleníti a Magyar Honvédség állománytáblájában szereplő és meteorológiai támogatási feladatokat végrehajtó szervezeti elemeket [14]:

- MH GEOSZ Időjárás előrejelző és szakkiképzési osztály;
- MH GEOSZ Meteorológiai támogató osztály;
- MH Légi Vezetési és Irányítási Központ (LVIK) Meteorológiai Központ;
- MH 59. Szentgyörgyi Dezső Repülőbázis Hadműveleti Központ Meteorológiai csoport;
- MH 86. Szolnok Helikopter Bázis Hadműveleti Központ Meteorológiai csoport;
- MH Pápa Bázisrepülőtér Hadműveleti Központ Meteorológiai csoport.

A felsorolásban szereplő szervezeti elemek alapvetően önálló, a támogatott erők kiszolgálására fókuszáló feladatrendszerrel rendelkeznek, de ez nem jelenti azt, hogy feladataikat is önállóan a többi meteorológiai támogató szervezeti elemmel való együttműködés nélkül, azoktól függetlenül hajtják végre. Ez a kooperáció már csak azért is alapvető fontosságú, mert a légköri folyamatok, jelenségek az illetékességi köröket, határokat nem veszik figyelembe. Ez az egymásrautaltság, esetenként alá-fölérendeltségi viszony, olyan szinergiák létét követeli meg, amelyek az érintett szervezeti elemek számára kölcsönösen előnyösek. Természetesen a logikus és kölcsönösen előnyös megfontolásokon túl az együttműködés a Kézikönyvben rögzített módon, formálisan is előírás.

Az egyes meteorológiai támogató elemek szervezeti struktúrában elfoglalt helyét és a közvetlen vagy közvetett kapcsolataikat a 4. ábra mutatja be. A Magyar Honvédségben szolgáló teljes meteorológiai szakállomány szakmai elöljárója a geoinformációs szolgálatfőnök, aki országos hatáskörrel rendelkező vezetőként felelős a geoinformációs szakterületért. A szakmai irányvonal mellett szolgálati elöljárója a Geoinformációs Szolgálat állománytáblájába tartozó meteorológiai támogató elemeknek, azaz a Meteorológiai támogató osztálynak valamint az Előrejelzési és szakkiképzési osztálynak és az utóbbi alá tartozó Meteorológiai központnak.

A katonai repülőterek meteorológiai csoportjainak alaprendeltetése, hogy egyrészt végrehajtja a repülőtér hadműveleti központja feladatainak meteorológiai támogatását, másrészt a légiforgalmi irányítás és a repülések meteorológiai támogatását végzi a felelősségi körzeten belül. Az alaprendeltetéstől eltérő feladatok kizárólag a geoinformációs szolgálatfőnök külön engedélyével végezhetők.

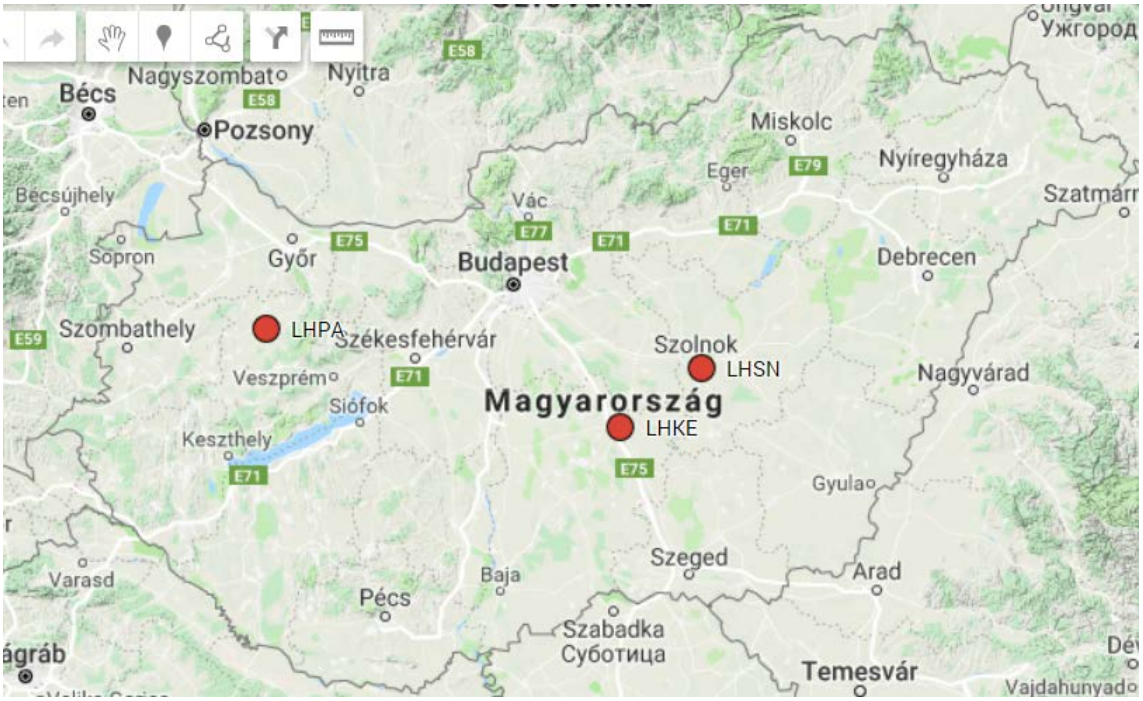


4. ábra: A meteorológiai támogatásban érintett szervezeti elemek

A Magyar Honvédség Légi Vezetési és Irányítási Központja a NATO által kijelölt felelősségi légtérben végzi feladatait. Ez nyilvánvalóan a repülésmeteorológiai támogatási feladatokat végző alegység, a Repülésmeteorológiai Központ felelősségi körzetét is érinti. A központ ebből következően az országos hatáskörrel végzett repülésmeteorológiai támogató tevékenységen túl például a szlovén légtérre vonatkozó meteorológiai jelentésekkel, veszélyfigyelmeztetésekkel és előrejelzésekkel is ellátja az LVIK érintett alegységeit. A hazai feladatok vonatkozásában az önállóan végzett központi feladatok mellett a katonai repülőterek meteorológiai csoportjai felelősségi körzetére kiadott repülésmeteorológiai produktumokkal támogatja a repülőterek feladatainak elvégzését azokban az időszakokban, amikor ott előrejelző állomány nem áll rendelkezésre. Ezek az időszakok a repülőterek vonatkozásában eltérő hosszúságúak, az állománytáblában rendszeresített előrejelzők számától és az állománytábla feltöltöttségének függvényében változnak.

I.3.1. KATONAI REPÜLŐTEREK METEOROLÓGIAI CSOPORTJAI

Ahogyan a fejezet bevezetőjében is szerepelt, a Magyar Honvédség három katonai repülőtérrel rendelkezik, melyek földrajzi elhelyezkedését az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra: A katonai repülőterek (Pápa [LHPA], Kecskemét [LHKE] és Szolnok [LHSN]) földrajzi elhelyezkedése (Forrás: Google térkép)

A meteorológiai támogatás végrehajtását mindhárom repülőtér esetében a bázis Hadműveleti Központ alárendeltségébe tartozó Meteorológiai Csoport végzi a Munka- és eljárásrendjében meghatározott felelősségi körzetén belül. A bevezetőben már megfogalmazott alaprendeltetés szerinti feladatok, azaz a katonai repülések végrehajtásának és a hadműveleti központok katonai feladatainak meteorológiai támogatása két alapvető pillérre épül. Ezek közül az első az általános és repülésmeteorológiai vonatkozású mérések/megfigyelések végzése és az ezekhez kapcsolódó egyéb adatgyűjtés és adattovábbítás. Ezek a feladatok minden esetben szigorúan meghatározott előírások szerint, a nemzetközi szabványoknak, rendelkezéseknek és a vonatkozó katonai szabályozóknak megfelelően történnek. Hazai viszonylatban ez a WMO technikai előírásait, az ICAO Annex-ekben foglalt szabályokat valamint katonai vonalon a NATO és a Magyar Honvédség által megfogalmazott előírásokat jelenti, ahogyan ez korábban is tisztázásra került. Ez nyilvánvalóan a rendszerek kialakítása során figyelembe veendő előírásoktól kezdve a végrehajtás során alkalmazott mérési pontosságon át, az egyes eszközök kalibrálási gyakoriságáig és a használt táviratformátumokig a feladatok teljes spektrumára kiterjed. A mérési programok és feladatok magasszintű automatizáltsága ellenére a folyamat

minden lépését képzett szakszemélyzet felügyeli, ami a teljeskörű adatgyűjtési és minőségellenőrzési szempontokon túl azt is biztosítja, hogy egy esetleges meghibásodás vagy rendszerleállás esetén is biztosított legyen a folyamatban lévő vagy tervezett katonai feladatok meteorológiai támogatása és haladéktalanul megkezdődhessen a hiba elhárítása. A feladatok ilyen szintű biztosítottságára a hazai civil repülőterek közül csak a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér esetében találunk példát. A meteorológiai támogatás másik alapvető pillére az előrejelzési feladatok végrehajtása. Ennek során az egyes feladatok végrehajtásához megfelelő jogosultsággal – melyet az alábbiakban részletezek, – rendelkező állomány a jövőre vonatkozó meteorológiai információk előállításával és azok katonai műveletekre gyakorolt hatásának elemzésével és ismertetésével hajtja végre a támogatási feladatot.

A fenti feladatok végrehajtásához a három repülőtéren közel hasonló állománytábla áll rendelkezésre. A feladatok bonyolultságához illetve a szükséges magasabb képzettséghez igazodva a meteorológiai csoport szervezeti struktúrája alapvetően hármas tagozódást mutat. A meteorológiai észlelők legfontosabb feladata természetesen az észlelések, megfigyelések végrehajtása, az így előállított adatok rögzítése és távirati formába alakítása. Emellett a beérkezett és az előbb említett saját megfigyelési információk alapján tájékoztatási kötelezettségeiknek is eleget tesznek a felhasználói igényeknek megfelelően. Munkájukat speciális észlelői tanfolyam elvégzése után 24 órás váltásos munkarendben végezhetik. Szintén hasonló munkarendben tevékenykednek a meteorológiai asszisztensek, akiknek a beosztásuk ellátásához már minimum asszisztensi végzettség, de napjainkban egyre gyakrabban alap vagy mesterképzésen szerzett meteorológus diploma az általános. Az asszisztensi feladatkör az észlelői feladatokon túl magába foglalja a leszállási előrejelzések készítését és a repülőtéri veszélyjelzések kiadását is. Ezen kívül általános esetben a meteorológiai asszisztens a szolgálati váltás vezetője, tehát kötelezettségei közé tartozik az észlelői munka és a helyi meteorológiai infrastruktúra felügyelete is. Tájékoztatási feladatai az észlelőkhöz képest annyiban egészülnek ki, hogy nem csak a meteorológiai jelentések, hanem az érvényben lévő előrejelzési produktumok tartalmáról elemző, összefoglaló módon is adhat felvilágosítást a katonai felhasználók számára. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy míg az észlelők kizárólag szöveghűen átadott előrejelzési adatokkal végezhetik a tájékoztatást, addig az asszisztensek az előrejelzések tartalmának értékelését követően akár feladatra szabott információval is elláthatják az érintett felhasználókat. A látástávolság vonatkozásában tekintve mind az észlelői, mind pedig az asszisztensi feladatok alapvetően a mérési, megfigyelési oldalhoz kapcsolódnak. A repülőtéri jelentő táviratok számára az észlelési folyamat során az aktuális időjárási helyzet függvényében

akár három különböző típusú látástávolság is meghatározható. A vonatkozó WMO és ICAO előírásoknak megfelelően a repülőtéri jelentő táviratokban (METAR/SPECI – METeorological Aerodrome Report/SPECIal report) minden esetben jelenteni kell az uralkodó látástávolság értékét, amit az észlelést végző szakszemélyzet (meteorológiai észlelő vagy asszisztens) ismert távolságú tájékozódási pontok láthatóságának megállapításával és a műszeres mérések értékeinek figyelembe vételével határoz meg. Ennek az észlelési metódus állandóságának azért van kiemelt szerepe, mert az analógiás elven működő és ebből fakadóan a hibrid előrejelzések adatbázisának és bemeneti adatainak is a legfontosabb paramétere az uralkodó látástávolság. Ez a tény is megerősíti az észlelői és asszisztensi állomány képzésének, gyakorlatszerzésének és szakmai elkötelezettségének, sőt mi több repülőtéri létének fontosságát.

A meteorológiai csoport támogató munkájának vezetője a meteorológus tiszt, akinek a feladatai az asszisztensi teendőkhöz képest az előrejelzési és tájékoztatási feladatok teljes vertikumával kiegészülnek. Jelenlétekor a szolgálati váltás vezetője, de a repülőterek állománytáblás helyei illetve azok feltöltöttsége jelenleg még nem teszi lehetővé folyamatos, 24 órás váltásos munkarendben való alkalmazhatóságukat. Ugyanakkor a Magyar Honvédség szisztematikus fejlesztésével kapcsolatosan megjelenő többletfeladatok abba az irányba mutatnak, hogy a folyamatos helyszíni előrejelző képesség elérése érdekében az állománytáblákat az ehhez igazított mértékben szükséges bővíteni.

A meteorológiai csoportok az észlelési, megfigyelési feladataikat egyrészt az értékes és nem helyettesíthető humán erőforrásokra (észlelőkre, asszisztensekre) támaszkodva vizuális értékelés alapján, másrészt pedig a rendelkezésre álló komplex, automatizált mérő és megfigyelő rendszer segítségével hajtják végre. A látástávolság tekintetében ez a korábban is említett vizuális észlelést valamint többféle műszeres mérési metódust jelent. A látástávolság műszeres meghatározása a hazai katonai repülőtereken jelenleg úgynevezett *forward scatter* elven működő látástávolságmérőkkel történik. Ezeknek az eszközöknek a segítségével meghatározható a meteorológiai látás (Meteorological Optical Range – MOR) és a futópálya menti látás (Runway Visual Range – RVR) is. Ezek közül a MOR alapvetően a vizuális észleléssel meghatározott uralkodó látástávolság műszeres kiváltását hivatott végrehajtani, míg az RVR elsődleges alkalmazása a műszeres repülési eljárásokhoz kötődő hatértékek kiértékeléséhez kapcsolódik. Szerepük ma már megkérdőjelezhetetlen a repülésmeteorológiai mérési, megfigyelési eljárásokban, de az előírások szerint végrehajtott vizuális látástávolság észlelések gyakorlati értéke – már csak a mérési adatsorok hossza miatt is, – ha nem is számottevően, de magasabb.

I.3.2. KÖZPONTI REPÜLÉSMETEOROLÓGIAI SZOLGÁLAT

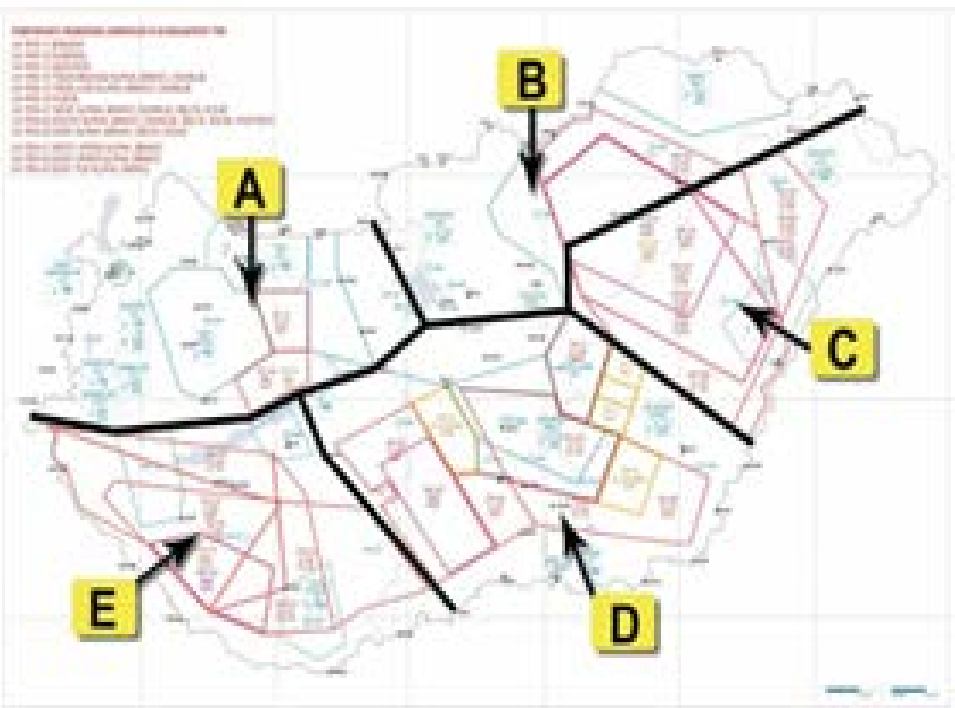
A Magyar Honvédség központi repülésmeteorológiai szolgálatát a fejezet bevezetésében is említett MH LVIK Meteorológiai Központ látja el. Alaprendeltetése többcélú: egyrészt anyaalakulatának, a Légi Vezetési és Irányítási Központnak nyújt repülésmeteorológiai támogatást, másrészt országos hatáskörrel, ténylegesen központi feladatokat ellátva „felügyeli a katonai repülőterek meteorológiai csoportjai szakmai tevékenységét, és támogatja azokat feladataik ellátásában.” [14] Ez utóbbi feladat természetesen megfelelő hatáskörrel is együtt jár, mely szerint a központi repülésmeteorológiai szolgálat meteorológus tisztje szakmai feladatokat szabhat a meteorológiai csoportok számára. Ez a gyakorlatban például a repülőtéri (kiegészítő) mérésekkel, észlelésekkel vagy előrejelzésekkel kapcsolatos feladatokat jelentheti. A repülőterek meteorológiai csoportjainak támogatása pedig nem kizárólag az adott repülőtérre vonatkozó előrejelzések (leszállási előrejelzés, TAF) elkészítésének feladataira terjed ki, hanem az országos felelősségi körzettel, de esetenként területi lehatárolással közzétett előrejelzések, veszélyfigyelmeztetések kiadására is. Ez utóbbi ugyan nem közvetlen támogatási forma, de a repülőtéri meteorológiai csoportok számára ezek a gyakorlati alkalmazása kötelező érvényű, ha a felelősségi körzetüket érinti az előrejelzés érvényességi területe.

WARNING 1 HAVP 210428 210430/210830

AREA : BCD

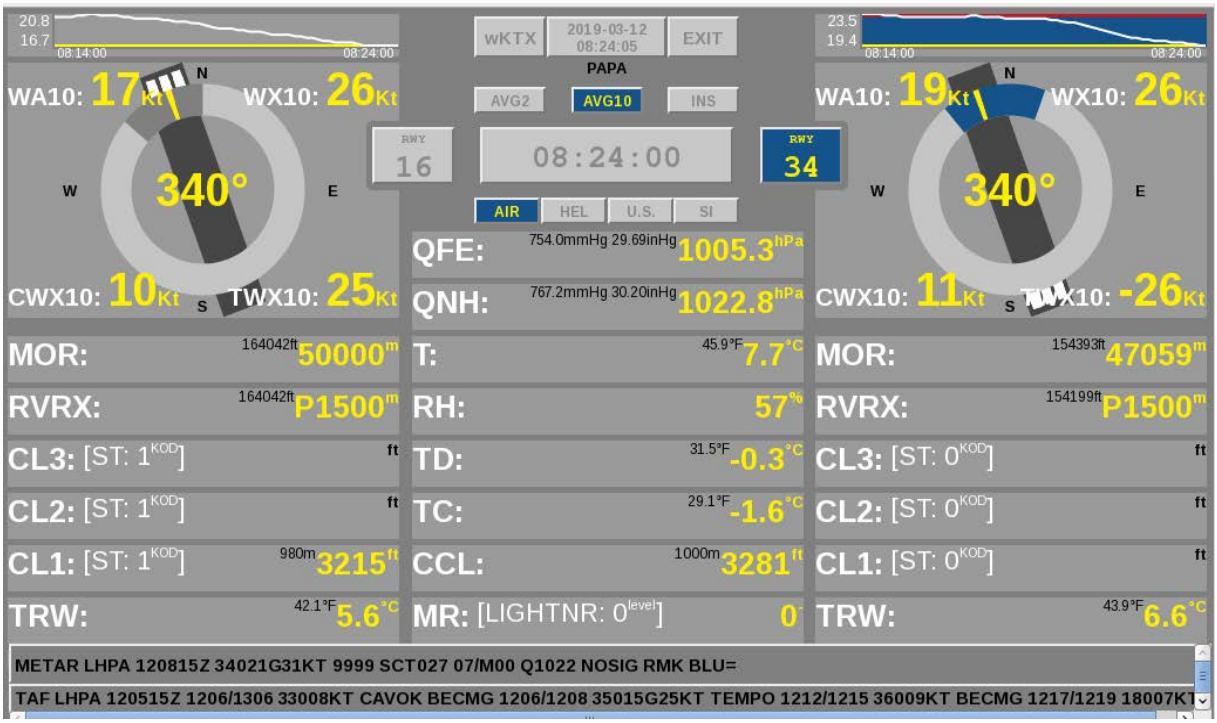
ISSUED BY : Formán Bence örgy.

WIND	
SFC VIS.	500-1500M
CLOUDS	BKN/OVC ST003-010
WEATHER PHEN.	FZRA, FZFG, BR
ICE	MOD/SEV IN LOW LEVEL CLOUDS, IN FZFG, FZRA
TURB.	
OTHERS	



6. ábra: A központi repülésmeteorológiai szolgálat által kiadott veszélyfigyelmeztetés formátuma és térképi megjelenítése

A fent nevesített feladataik végrehajtása során a központi repülésmeteorológiai szolgálat szolgálati váltása számára a repülőtéri látástávolsággal kapcsolatos észlelési adatok kiemelt fontosságúak, hiszen mind a repülőtéri előrejelzések, mind pedig a látástávolsághoz kapcsolódó határértékek átlépése miatt kiadott veszélyfigyelmeztetések készítése megköveteli az aktuális állapot alapos ismeretét. Ezekhez az információkhoz az előrejelzők több különböző forrásból is hozzájuthatnak. A repülőtereken rendelkezésre álló automatizált meteorológiai mérő és megfigyelő rendszer kijelző terminálja nem csupán az adott repülőtér meteorológiai csoportjánál és légiforgalmi irányító szolgálatánál elérhető, de a hálózatba szervezett működésnek köszönhetően a virtuális hálózat tetszőleges számítógépén, így a központi repülésmeteorológiai szolgálatnál is megtekinthető.



7. ábra: A meteorológiai mérő és megfigyelő rendszer terminálja

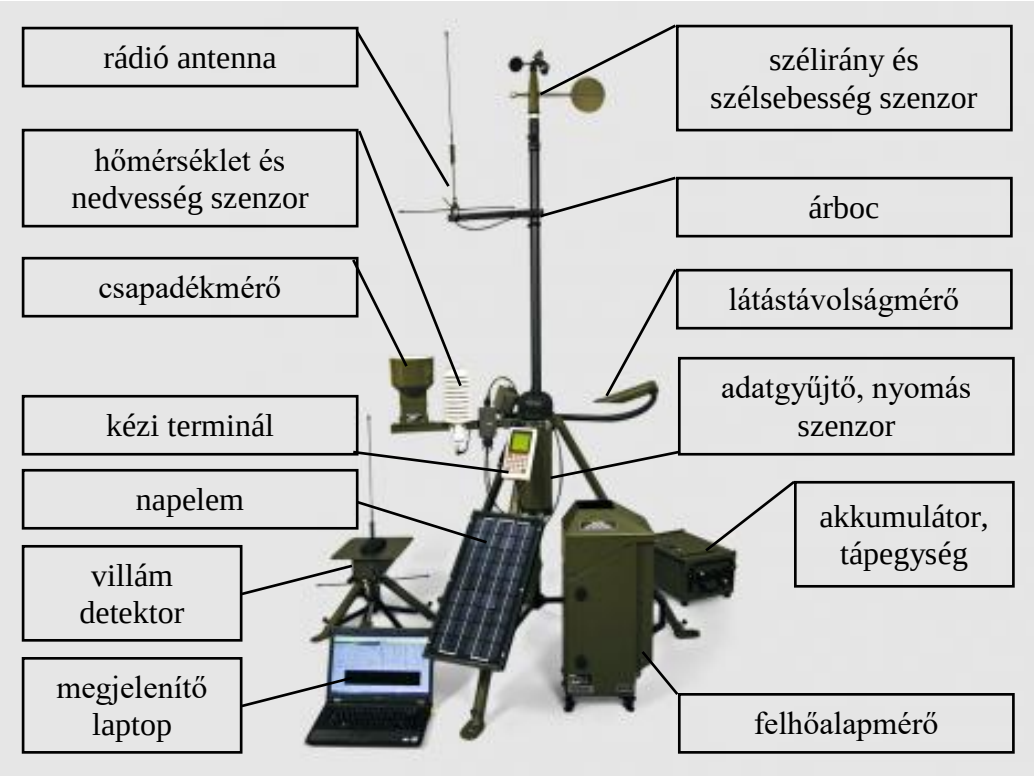
A 7. ábrán a meteorológiai mérő és megfigyelő rendszer terminálja látható, a már korábban is említett MOR és RVR értékek a futópálya földetérési zónáinál telepített mindkét műszer értékeit perces frissítési gyakorisággal reprezentálják. Ráadásul nem csupán az aktuális érték elérhető, de táblázatos vagy grafikus formában az elmúlt időszak tendenciái is megjeleníthetők igény esetén.

A kijelző terminál képét figyelmesen tanulmányozva észrevehetjük, hogy a kijelzőn az aktuális jelentő táviratok (METAR/SPECI) is megjelennek, azaz a mindenkori, hivatalosan kiadott vizuális észlelési információk is közel valós időben elérhetők. A repülésmeteorológiai központ állománya a fenti lehetőségein túl természetesen a repülőtéri munkatársakkal is egyeztethet a

látástávolság kérdéskörét illetően. Ez a konzultáció történhet a repülőtéri meteorológiai szolgálat kezdeményezésére, proaktív módon, a látástávolságot érintő kedvező vagy kedvezőtlen folyamatokat felismerve vagy akár a központi szolgálattól indítva a meteorológiai szituáció tisztázása érdekében. Végeredményben mindkét lehetőség ugyanarra az eredményre vezet: a központi előrejelző számára egy teljesebb, tisztább, a repülőtéri észlelést végrehajtó értékítéletén és szakmai helyzetértékelésén alapuló időjárási helyzetkép fog rendelkezésre állni a további munkájához.

I.3.3. MISSZIÓS KATONAI MŰVELETEK METEOROLÓGIAI TÁMOGATÁSA

A Magyar Honvédség meteorológiai támogató tevékenységében nem túl nagy, ugyanakkor annál fontosabb szerepet tölt be a hazánk határain kívül végzett katonai műveletek meteorológiai támogató tevékenysége. Ezt a feladatkört két alapvető részfeladatra bonthatjuk: egyrészt helyszíni mérések, észlelések végrehajtására, másrészt pedig az adott művelet támogatásához szükséges előrejelző produktumok előállítására. Nyilvánvaló, hogy az előbbi feladathoz a befogadó nemzeti támogatás esetlegesen hiánya esetén a meteorológiai támogató elemeknek is a műveleti területen kell lenni, hogy feladataikat elláthassák. Ebben az esetben taktikai mobil mérőrendszerre is szükség van, amelynek szerepét a Magyar Honvédségnél a rendszeresített TACMET mobil állomás tölti be (8. ábra). Az észlelést végző szakállomány munkáját a hagyományos meteorológiai mérőeszközök mellett többek között optikai szenzorokkal és villámdetektorral is segíti.



8. ábra: Teljes funkcionalitású mobil meteorológiai állomás (TACMET) és alapvető részei

Az észleléssel ellentétben az előrejelzői feladatok a műveleti területtől távol, akár hazai környezetből, a jól ismert infrastruktúra használatával is elvégezhetők. A kézikönyv előírásai szerint ezekért a feladatokért az MH GEOSZ időjárás előrejelző és szakkiképzési osztályvezetője felelős, de a feladatok tényleges végrehajtását a meteorológiai központok és esetenként a repülőterek meteorológiai csoportjai szoros együttműködésben végzik a Meteorológiai támogató osztály háttértámogatásával.

9. ábra: A mobil meteorológiai állomás (TACMET) terminálja

I.4. Következtetések

Ebben a fejezetben a katonai repülésmeteorológiai támogatás rendszerét mutattam be részletesen. A vázolt szabályozói háttér összetettsége és a szabályozói háttér meteorológiai szakmai valamint katonai elemeinek szoros összefonódása megkérdőjelezhetetlenné teszi a meteorológiai támogató tevékenység szerepét a katonai repülések biztosításában. A meteorológiai támogatás valós végrehajtása többszintű, jól felépített szervezeti struktúrára épül, ami képes modern, újszerű előrejelzési eljárások gyakorlati adaptálására.

A támogatás alapelveinek szisztematikus megtartásával a meteorológiai támogatás a felhasználói igényekhez és a műveletek szükségleteihez igazodva látja el releváns információkkal a döntéshozókat a döntéshozatali folyamat megfelelő szakaszaiban. Ahogyan korábban is megfogalmaztam: a döntéshozatali folyamat során a cél annak a cselekvési változatnak a kiválasztása, amely a kívánt végállapothoz legközelebb segíti a döntés meghozatalában érdekelt felet. Ennek érdekében a döntéshozatali folyamat bemeneti információinak minél pontosabbá tétele és ebből adódóan a lehetséges bizonytalanságok csökkentése a döntéshozó elemi érdeke.

Az értekezésemben bemutatásra kerülő látástávolság előrejelző eljárás nem sérti a korábban vázolt alapelveket, illetve nem igényli a katonai repülések meteorológiai támogatását végző szervezeti struktúra legkisebb mértékű átalakítását sem. Mind a repülőtéri, mind pedig a központi támogató elemek munkafolyamataiba egyszerűen integrálható.

II. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

II.1. Bevezetés

A legegyszerűbb megközelítés szerint a repülésmeteorológia a közlekedésmeteorológia azon területe, amely a repüléshez, mint közlekedési ághoz kapcsolódó meteorológiai mérések, megfigyelések, előrejelzések és tájékoztatások feladataival foglalkozik. A repülésmeteorológia alkalmazott meteorológiai területe mellett azonban nyilvánvalóan nagy szerep kell, hogy jusson a kutatási, fejlesztési oldalnak, hiszen a légiközlekedésben bekövetkezett óriási fejlődéssel párhuzamosan jelentősen nőttek a repülésmeteorológiai szolgáltatásokkal kapcsolatos elvárások is. Ez arra a két alapvető okra vezethető vissza, ami a repülés fejlődésének mindenkori mozgatórugója: egyrészt a repüléssel járó kockázatok csökkentésének szándéka, ami kezdetben a repülésbiztonság szintjének emelését, napjainkban viszont már a kockázatok elfogadható szintjének fenntartását jelenti; másrészt pedig a hatékonyság (repülési, műveleti, gazdasági, stb.) növelése. Mindez nem új gondolat, a hazai repülésmeteorológia úttörője, a katonai meteorológia megteremtője, dr. Hille Alfréd ezredes[1] a XX. század első felében a következőképpen fogalmazta meg: „A repüléshez csatlakozó légkörtani tevékenység célja mindig a légkörre vonatkozóan a repülő személyzet és gépek nagyobb biztonságának elérése, a légi vonalak menetrendszerű és minél gazdaságosabb kihasználása, valamint az utasok kényelme.” [15] Az idézett sorok ellenére vagy éppen ebből a nyilvánvaló megfontolásból a repülésmeteorológiai kutatásokkal foglalkozó szakemberek csak ritkán deklarálták a fentiekben megfogalmazott célokat, viszont mind gyakorlati, mind pedig elméleti, kutatási oldalon töretlen fejlődés zajlott. A repülés időjárásra való érzékenységét és az ezzel járó problémákat már a repülés hőskorában is felismerték, sőt a következő évtizedekben már többen nevesítették az alacsony látástávolságot kiváltó ködöt és az alacsony felhőalapot, mint „a repülés legnagyobb akadályozóit[2]” [16][17]. A probléma felismerését követően a lehetséges megoldások keresése is megkezdődött, nyilvánvalóan igazodva a tudomány akkori állásának lehetőségeihez. Végül ennek a folyamatnak a lépései vezettek azokhoz a modern repülésmeteorológiai támogató

---

[1] dr. Hille Alfréd ezredes (1891-1981) – katonameteorológus, a műszaki tudományok kandidátusa. Javaslata alapján szervezték meg a hazai repülőgépes légköri méréseket, amely a Trianon utáni időszakban a katonai pilótaképzés terén is nagy szolgálatot tett. A dunai és balatoni viharjelzés valamint polgári repülések meteorológiai szolgálatának szervezője, megalapítója. A repülésmeteorológia hazai úttörője, szakirodalmának megalapozója.

[2] „the greatest obstacles to aviation”

rendszerekhez, amelyek alkalmazása ma már megkerülhetetlen a repülések meteorológiai kiszolgálása során.

A következő alfejezetekben az értekezés témaválasztásához igazodó tagolásban tekintem át a repülésmeteorológiai szakterület azon mérvadó tudományos kutatási eredményeit, alkalmazott módszertani megközelítéseit, amelyek kutatásaimhoz kapcsolódnak. Ennek megfelelően először kiemelten kezelve a horizontális látástávolság témakörét mutatom be, majd azt követően a repülések szempontjából fontos egyéb meteorológiai paraméterek, jelenségek következnek.

Ezeknek a leírásoknak nem célja a teljesség igénye, sokkal inkább arra törekszem, hogy a vizsgált témakörök tudományos kutatási eredményeit áttekintő jelleggel, a főbb eredmények és a fejlődés tudománytörténeti lépéseinek bemutatásával szemléltessem. Eljutva ezzel addig a pontig, ami a korábbi fejezetekben a tudományos probléma megfogalmazását, a későbbiekben pedig az alkalmazott módszertan leírását segítette.

A látástávolságtól eltérő paraméterek esetében pedig igyekszem rámutatni arra, hogy melyek azok, amelyek az értekezésem keretében vizsgált módszertan szempontjából relevánsak, esetleges későbbi kutatások számára érdemesek.

II.2. A látástávolságról általában

A látástávolság előrejelzésével és a repülések végrehajtására gyakorolt hatásával kapcsolatos tudományos kutatási eredmények történeti és szintetizáló feldolgozását megelőzően fontosnak tartom egy rövid alfejezet keretében a látástávolság, mint meteorológiai változó és a hozzá kapcsolódó alapfogalmak összefoglalását, áttekintését. Ennek megfelelően ebben az alfejezetben tisztázásra kerülnek a látástávolsággal kapcsolatos fizikai alapok illetve minden olyan fogalom is, ami a meteorológiai szakterület vonatkozásában az értekezésem témájához kapcsolódóan felmerülhet.

A katonai repülési feladatok döntő többsége napjainkban is vizuális navigációs eljárások alkalmazásával, azaz a látvarepülés szabályait (Visual Flight Rules – VFR) megtartva kerül végrehajtásra. Különösen igaz ez a repülés két kritikus szakaszában, a fel- és leszállás alatt, valamint a speciális műveleti feladatok végrehajtása során. A VFR repüléseket alapvetően csak látási meteorológiai körülmények (Visual Meteorological Conditions – VMC) közé lehet tervezni. Ugyanakkor a VMC minimumoknál (legalább 450 m-es felhőalap és 5000 m-es látástávolság) rosszabb körülmények között (műszeres meteorológiai körülmények – Instrument Meteorological Conditions – IMC) is végrehajtható úgynevezett különleges VFR (SVFR) repülés. A VFR repülések nem zárják ki a navigációt segítő műszerek használatát (VMC-ben sem), azonban ha a repülést műszerrepülési szabályok (Instrument Flight Rules – IFR) alapján kívánják végrehajtani akkor a navigációt a műszerekre hagyatkozva kell elvégezni. Az előbbi variáció például tipikus kiképzési feladat az IMC-ben végrehajtott IFR repülésekre való felkészülés során. A meteorológiai körülmények megváltozása okán (VMC-ből IMC-be vagy fordítva) vagy akár azoktól függetlenül, például tervezett kiképzési feladathoz kapcsolódóan lehetséges a váltás az alkalmazott repülési szabályok között. Jelen keretek között ezek közül a meteorológiai viszonyokban bekövetkezett változások érdekesek, azok közül is az a szituáció, amikor a VMC-ből a látástávolság vagy a felhőalap romlása miatt IMC lesz. Egy ilyen szituáció ugyanis számos kockázatot hordozhat magával, veszélyeztetve a repülési feladat biztonságos végrehajtását.

A repülési feladatok végrehajtását a felhőalap vagy a látástávolság aktuális értékei mellett még számos tényező befolyásolja, ideértve a légijármű és a repülőtér felszereltségét, kategória besorolását ugyanúgy, mint a pilóta kiképzettségi szintjét, amelyek többsége szintén időjárási minimumok formájában jelenik meg. Az alábbiakban a látástávolsággal való közvetlen vagy közvetett kapcsolataik miatt szinte mindegyik tényező górcső alá kerül majd.

Az hogy egy tárgyat nappal, természetes fényviszonyok között látunk-e vagy sem alapvetően három tényező határozza meg: magának a tárgynak a tulajdonságai, a szemünk képességei és a kettő között elhelyezkedő levegő sugárzásgyengítési tulajdonságai. Az emberi látás fiziológiai hátterének és a szem betegségeinek bemutatására jelen keretek között nem térek ki, hiszen a probléma szempontjából érdemben csak az átlagos megfigyelői képesség vehető figyelembe. Ennek megfelelően a későbbiekben az ehhez kapcsolódó értékeket állandónak tekintem. A vizuálisan észlelni kívánt objektum tulajdonságainak a láthatóságra gyakorolt hatására a katonai álcázásnál keresve sem találnánk jobb példát. Azok a tulajdonságok vannak a legnagyobb befolyással a láthatóságra, amelyeket az álcázás során megmásítanak, hogy nehezebben észrevehetővé tegyék az adott objektumot. Gondoljunk csak az alakmásítók, az álcahálók, az álcázó festés vagy egyszerűen csak a terepszínű egyenruha használatára. Ezek a rejteni kívánt tárgy, épület vagy személy méretét, alakját, színét, a háttértől való kontrasztját módosítják a rosszabb láthatóság érdekében. De ellenpéldát is felhozhatunk: a repülőtéri jelzések, felfestések, akadályok alakját, méretét és színeit szigorú előírások határozzák meg annak érdekében, hogy könnyebben láthatók, észrevehetők legyenek, kontrasztosan kiemelkedve környezetükből (10. ábra).

10. ábra: Terepszínű egyenruhás katonák és szabványos festésű repülőtéri épület.

Kontraszt alatt egészen pontosan a vizsgált objektumnak és hátterének képi eltérését értjük, amit az alábbi egyszerű képlettel formalizálhatunk:

$$C = \frac{L_t - L_h}{L_h} \qquad (1)$$

ahol L_t a tárgy, L_h pedig a háttér képpontjainak megvilágítását jelenti. Könnyű belátni, hogy ha L_t és L_h értéke megegyezik, azaz a vizsgált objektum és a háttér megvilágítása azonos, akkor a kontraszt értéke (C) nullával egyenlő, tehát a tárgy nem különíthető el a környezetétől. Pozitív

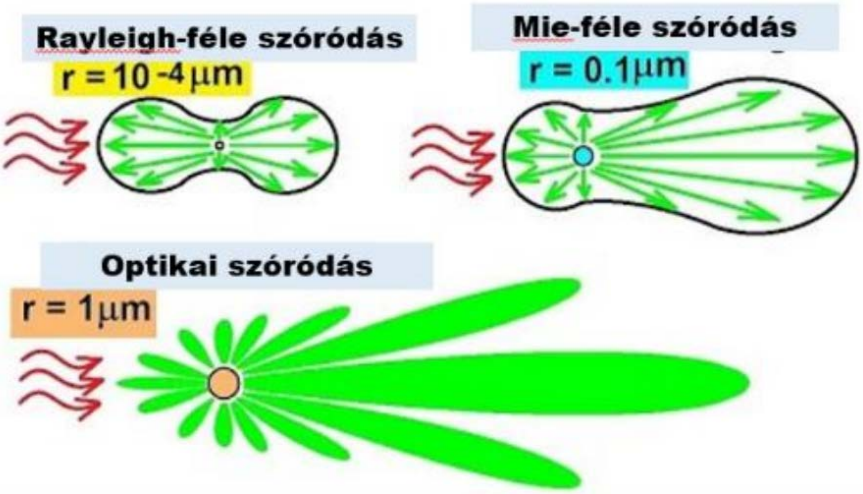
kontraszt esetén maga a tárgy, negatív esetén pedig a háttér a nagyobb megvilágítású. Ez utóbbi eset elméleti szélsőértékére vonatkozik a látástávolság, amely ebben az esetben a meteorológiai látástávolsággal (MOR – Meteorological Optical Range) jól jellemezhető vizuális észlelés előírása is. Az ICAO és a WMO vonatkozó előírásai alapján a látástávolság azt a legnagyobb távolságot jelöli, amelyről egy világos háttér előtt elhelyezkedő, megfelelő méretű, felszín közelében lévő fekete objektum látható és azonosítható [18][19]. A teljességhez hozzátartozik, hogy éjszaka ez a definícó úgy módosul, hogy a látástávolságot az a legnagyobb távolság adja meg, amelyről egy körülbelül 1000 candela fényességű fényforrás azonosítható egy megvilágítatlan háttér előtt. A definícióban szereplő azonosíthatóságot az ún. *látásküszöb* határozza meg, ami, ahogyan Bottyán megfogalmazza: az a legkisebb kontraszt, amelyet még a szemünk érzékelni képes [20]. Ez nem független ugyan a látószögtől, de a látástávolság definíciójára hivatkozva, miszerint felszínközeli tárgy észlelését hajtjuk végre, valamint hogy az emberi szem képességeinek különbségét elhanyagoljuk, a látásküszöb nappali viszonyok között konstansnak tekinthető. Értékét Koschmieder 0,02-ben határozta meg [21] de a gyakorlatban ennél magasabb, 0,05 értéket használnak [22], tekintettel arra, hogy a pilóták szemszögéből a vizsgált objektumok a horizont helyett felszíni háttérrel, azaz kisebb kontraszt értékekkel látszanak. Összefoglalva a fentieket a látástávolság tehát az a távolság, amelyről az objektumot vizsgálva a tárgy és hátterének a kontrasztja megegyezik a látásküszöbbel. Nyilvánvaló, hogy a látásküszöb alatti kontraszt értékek esetén az objektum nem lesz elkülöníthető a háttértől, míg ellenkező esetben, emelkedő kontraszt esetén egyre élesebben látható. Természetesen az adott tárgy láthatóságában a fentieken túl annak színe és alakja is fontos szerepet játszik, ahogyan ez a korábban bemutatott példákon is látható. A láthatóság ezen aspektusaitól azonban jelen keretek között eltekintek, figyelembe véve a vonatkozó definíciókban meghatározott körülményeket [18][19].

A látástávolságot meghatározó harmadik fontos tényező a levegő – beleértve a légköri aeroszolokat és a csapadékelemeket is, – extinkciós, sugárzást gyengítő hatása. Minél erősebb ez a sugárzásgyengítési hatás, azaz minél magasabb az ezt jellemző extinkciós együttható (β), egy adott távolságú objektum kontrasztja annál alacsonyabb lesz (11. ábra).

11. ábra: A növekvő extinkciós együttható (balról jobbra) kontrasztot befolyásoló hatása [23].

Ezért az összevont extinkciós hatásért több légköri sugárzástani folyamat felelős: a visszaverődés, az elnyelődés és a szóródás. A veszteség mértékét pedig a Bouguer–Lambert–Beer-törvény [24] határozza meg.

A légköri összetevők méretbeli eloszlása alapján a szóródás három alapvető fajtáját különíthetjük el, melyet jól szemléltet Bottyán ábrája (12. ábra).



12. ábra: A szóródás alapvető fajtái. Az ábra a szóródás valószínűségének irány szerinti eloszlását szemlélteti [20].

A *Rayleigh szóródás* esetén az elektromágneses sugárzás (esetünkben látható fény) hullámhossza sokkal nagyobb a szórásban részt vevő részecskék karakterisztikus méreténél. Ez a fajta jelenség játszódik le a légköri atomok és molekulák esetében. Mivel a Rayleigh szóródás a sugárzás hullámhosszának negyedik hatványával fordítottan arányos, ezért a látható fény spektrumában a különböző hullámhosszok nem egyenletesen szóródnak. A rövidebb hullámhosszú összetevők szóródása a leghatékonyabb, ennek és a részecskék számával arányos szórásnak köszönhető az égbolt kék és hosszabb légkörbeli út esetén a horizont közelében vöröses színe. A látástávolság definíciójára alapozva, a felszín közelében a légkör részecskéinek koncentrációját állandónak tekintve a Rayleigh szóródásból eredő sugárzásgyengülés szintén állandónak vehető. Amennyiben csak a Rayleigh szórás játszana

szerepet a látástávolság alakításában és a légköri gázok atomjain és molekuláin kívül más nem gyakorolna befolyást, akkor a látástávolság elméleti maximuma 300 km körül alakulna.

A *Mie szóródás* esetén a részecskék karakterisztikus mérete nagyságrendileg megegyezik a sugárzás hullámhosszával. A 12. ábrán is látható módon a részecskeméret növekedésével a szóródás egyre inkább a sugárzás irányába esik, amikor pedig már meghaladja a sugárzás hullámhosszát *optikai szóródásról* beszélünk. Mivel ez utóbbi kettő felelős a légköri extinkció meghatározó részéért, ezért ebből az is következik, hogy az aeroszol részecskék koncentrációjának, de méginkább a felhő és csapadékelemek jelenlétének jut a legnagyobb szerep a látásátvolság alakításában.

Térjünk most vissza a látástávolság definíciójához és tekintsük a korábban bevezetett jelölésekkel egy horizont közelében elhelyezkedő fekete test háttérhez viszonyított kontrasztját:

$$C = \frac{L_h\left(1-e^{-\beta R}\right)-L_h}{L_h} \tag{2}$$

ahol R a test megfigyelőhöz viszonyított távolsága. A fenti egyenletből az egyszerűsítést követően az alábbi egyenletet kapjuk:

$$C = -e^{-\beta R} \tag{3}$$

Ha a látásküszöbnek megfelelő kontraszt értéket ebbe a képletbe behelyettesítjük, a fentiekben leírtak szerint a vizsgált test távolsága a látástávolsággal egyezik meg. Az egyenletből ezt kifejezve a Koschmieder formula módosított változatához jutunk, ami ebben a formájában a látástávolságot (R_{vis}) adja meg az extinkciós együttható függvényében:

$$R_{vis} = \frac{3{,}000}{\beta} \tag{4}$$

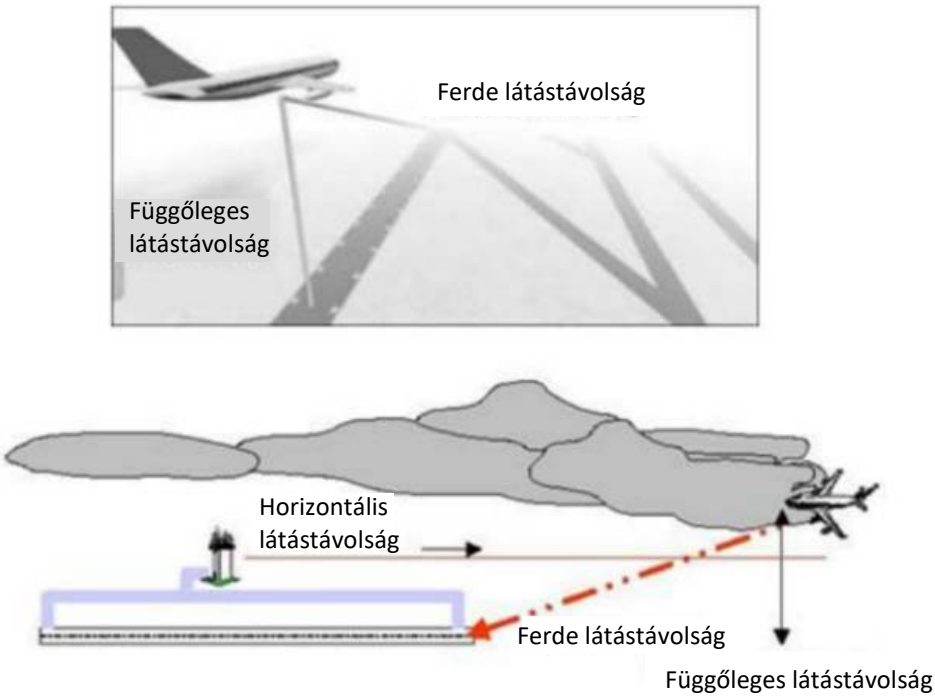
Éjszakai időszakban, ahogyan a látástávolság definíciójában is, eltérő formulát kell alkalmaznunk, figyelembe véve a fényforrás fényintenzitását is:

$$R_{vis} + \frac{1}{\beta} \cdot ln\left(\frac{0{,}05 \cdot R_{vis}^2}{I}\right) = 0 \tag{5}$$

ahol I a fényforrás intenzitása. Ez utóbbi egyenletből iterációs eljárással, a nappali időszakra vonatkozó képletből pedig egyszerű behelyettesítéssel kaphatjuk meg a látástávolságot.

A repülésmeteorológiai szakterület a horizontális látástávolság mellett megkülönbözteti a függőleges látástávolságot is, bár ez utóbbi a gyakorlati alkalmazás szempontjából inkább számít felhőalap magasságnak, mint látástávolságnak. Abban az esetben alkalmazzák, amikor

az égbolt nem látható és így a felhőalapra vonatkozó információk megadására sincs lehetőség. Ebből világosan következik, hogy használatakor a léginavigációs eljárásokban és a repüléshez kötődő minimumértékek alkalmazásánál a felhőalap magasság helyett veszik figyelembe. A maximális érték szempontjából a felhőalaphoz képest komoly korlátai vannak: a legnagyobb megadható érték 600 méter. A horizontális és vertikális látástávolság mellett, elsősorban a felhasználói oldalon használatos a ferde látástávolság fogalma. Könnyű belátni, hogy ennek értéke síkban homogén viszonyokat feltételezve a betekintés szögének függvényében a horizontális és vertikális látástávolság, mint két szélsőérték között mozog. Az operatív gyakorlatban – pár kísérleti esettől eltekintve (lásd [25]), – sem mérésére, sem pedig előrejelzésére nincs kialakult eljárás. Ennek megfelelően részletes tárgyalásától a továbbiakban eltekintek.



13. ábra: A vízszintes, függőleges és ferde látás értelmezése. [20].

A fentiekben megadott horizontális látástávolság definíció az általános meteorológiai megközelítésekben kielégíti az igényeket, azonban a repülések biztosítása esetén az operatív szempontokat figyelembe véve esetenként félrevezető lehet. Azokban az esetekben ugyanis amikor a látástávolság értéke a különböző irányokban változékonyságot mutat és a megállapított legnagyobb látástávolság eltér az adott repülőtéren jellemző értékektől, akkor egy ilyen érték publikálása akár azt is okozhatja, hogy a repülést végrehajtó állomány nem várt (akár a repülési minimumoknál is rosszabb) körülmények közé kerül. Ennek a problémának az

áthidalására a repülésmeteorológiai produktumokban (jelentések, előrejelzések egyaránt) az úgynevezett uralkodó látástávolságot alkalmazzák. Az uralkodó látástávolság az a legnagyobb, a látástávolság fenti definíciója alapján meghatározott látástávolság érték, amely a körkörös észlelés legalább felében vagy a repülőtér területének legalább felén jellemző. Az uralkodó látástávolságot vizuális észleléssel és műszeres méréssel is meg lehet határozni. Amennyiben műszeres mérési eredmény rendelkezésre áll, akkor azt figyelembe kell venni a látástávolság becslése során az észlelési sztenderdek szerint. Az uralkodó látástávolságot, ha értéke 800 méternél kisebb, akkor 50 méteres, ha legalább 800 méter, de kevesebb, mint 5 km, akkor 100 méteres, ha legalább 5 km, de kevesebb, mint 10 km, akkor pedig 1 km-es lépésközzel adják meg a METAR/SPECI táviratokban. A 10 km-es vagy azt meghaladó értékek pedig 9999 kódolással jelennek meg, amennyiben nem összevont kódolással van meghatározva a látástávolság (pl.: CAVOK használata). Az értekezésem további részében, amikor ezzel ellentétes állítás nem kerül hangsúlyozásra, a látástávolság kifejezés használata alatt az uralkodó látástávolságot értem.

Amikor a látástávolság különböző irányokban eltérő és a legalacsonyabb látástávolság eltér az uralkodó látástávolságtól, valamint kevesebb, mint 1500 méter vagy az értéke kevesebb, mint az uralkodó látás 50%-a és kevesebb, mint 5000 méter, akkor ezt az értéket minimális látástávolságként jelenteni kell, a fő és mellékégtájak által megadott jellemző irányával együtt. Ennek szükségessége az uralkodó viszonyok minél pontosabb leírásában és a csökkent látástávolságból adódó potenciálisan veszélyes időjárási szituációkra való felkészülés érdekében keresendő. Az uralkodó látástávolsággal ellentétben a minimális látástávolság, mint a repülésmeteorológiai produktumok paramétere, előrejelzésekben nem, csak jelentésekben jelenik meg.

Említést kell még tennünk a futópálya menti látástávolság (RVR – Runway Visual Range) fogalmáról is. A műszeres léginavigációs eljárások kiszolgálása során ugyanis ennek a látástávolságnak kiemelt szerepe van a le- és felszállás végrehajtása során. Az RVR azt a futópálya menti távolságot jelenti, amelyről a pilóta nézőpontjából tekintve még láthatók a pálya jelzései és a pályafények. Bár vizuális észlelés útján is meghatározható, ez az eljárás nem tipikus az észlelése során, a legtöbb helyen, műszeres úton kerül mérésre. A pilóta szemszögéből látható pályafényekre a 14. ábra mutat példát adott, 200 méteres RVR érték mellett.

14. ábra: A pilóta által látott kép 200 méteres RVR érték esetén. [26].

Az alkalmazott mérőeszközök pontos repülőtéri elhelyezését szigorú előírások határozzák meg [27], annak érdekében, hogy a futópálya látástávolsági viszonyairól minél pontosabb képet adjanak. Mindez azért kiemelt jelentőségű, mert a repülőtér kategória besorolásának megfelelően extrém alacsony, akár 50 méteres pályafény láthatóság mellett is leszállhatnak repülőgépek a műszeres leszállító rendszer alkalmazásával, ami természetesen megköveteli az RVR nagy pontosságú és megfelelő gyakoriságú mérését.

II.3. A látástávolság előrejelzése

Ahogyan a fejezet bevezető részében is említettem, nagyon korán felismerték a repülések meteorológiai vonatkozásait tanulmányozó szakemberek, hogy a csökkent horizontális látástávolság az egyik legnagyobb kockázat, ami a repülések biztonságos végrehajtását veszélyezteti. LeRoy Meisinger két tragikus, a rossz látástávolság miatt bekövetkezett légiközlekedési baleset okán hívja fel a figyelmet a probléma fontosságára már 1921-ben. Rövid cikkében az balesetek összefoglaló leírását követően megjegyzi, hogy a légügyi hatóságok egyhangú véleménye szerint a repülésre hatással bíró meteorológiai jelenségek közül a köd jelenti a legnagyobb fenyegetést. [28] Szintén ebben az évben tette közzé E. B. Calvert az Amerikai Meteorológiai Társaság (American Meteorological Society) szaklapjában, hogy a kor technikai vívmányai adta lehetőségeket kihasználva a repülés igényeinek megfelelően, kísérleti jelleggel, napi rendszerességgel időjárási helyzetjelentést és előrejelzést sugároz hat repülési körzetre vonatkozóan. Amennyiben a kísérleti adás visszajelzései pozitívak, abban az esetben a rendszert az Egyesült Államok teljes területére tervezik kiterjeszteni. [29]

Ugyanebben a számban W. R. Gregg a látástávolság észlelésének új metódusáról értekezik, amelyet a Brit Meteorológiai Szolgálatnál (British Meteorological Service) alkalmazott módszerek és skála használatával vezettek be. Téve ezt annak okán, hogy a repülők tájékoztatása során kellően részletes és egyértelmű információkkal szolgálhassanak. [30]
H. C. Willet egyenesen a repülés legnagyobb akadályának nevezi a köd és az alacsony felhőalap kérdését egy a Monthly Weather Reviewban megjelent 1928-as tanulmányában. [30] Átfogó munkájának első részében a kondenzáció fontosságának és a kondenzációs magvak szerepének kérdéskörét járja körül, aminek alapját kiterjedt európai kísérleti eredmények és alapos szakirodalmi előkészítés adják. A köddel összefüggő szinoptikus vonatkozások és klasszifikáció után tér rá a repüléshez kapcsolódóan a köd előrejelzésének lehetőségeire. Mindjárt az elején leszögezi, hogy a köd előrejelzésének vonatkozásában kizárólag elméleti megfontolásokat lehet csak figyelembe venni, tekintettel arra, hogy nem létezik a köd pontos előrejelzésére alkalmas gyakorlati eljárás. Ennek pedig az az alapvető oka, hogy a meteorológiai szervezetek elsősorban a hiánymentes, részletes időjárási helyzetkép megteremtését tartják elsődleges feladatnak a pontos mérési és megfigyelési programjukkal, az előrejelzési feladatokkal szemben. Ráadásul annak ellenére nem létezik működőképes előrejelző metódus, hogy Európa számos országában a repülések meteorológiai kiszolgálását támogató szolgálatok jelentősen fejlettebbek a hagyományos célú szervezeteknél. Tanulmánya végén Willet említést tesz még a köddel, alacsony látástávolsággal kapcsolatos gyakorisági,

statisztikai elemzések fontosságáról, amelyeket a historikus megfigyelésekre kell alapozni, de ezt nem prognosztikai aspektusok figyelembe vételével teszi, hanem a tervezett repülőterek létesítési helyének vonatkozásában. Ez utóbbi állításait egyébként Entwistle munkáira alapozza, aki a repülésmeteorológia egyik úttörőjeként a repülésmeteorológiai szolgálatok létének szükségességét a repülések útvonalainak, a repülőterek elhelyezésének tapasztalati tényeken alapuló tervezésével és az objektív mérési és előrejelzési adatok előállításával támasztja alá [31][32].

Ez utóbbi problémakörrel ráadásul nem csak a viszonylag jól ismert éghajlatú, időjárási megfigyelésekkel megfelelően követett területeken kellett szembenézni. A nagy távolságú interkontinentális repülések megjelenése újabb problémát hozott a felszínre. A Brit szigetek és az amerikai kontinens közötti repülőút kezdetben még túl hosszú volt, hogy egy felszállással végre tudják hajtani, ezért tipikusan egy grönlandi kitérővel keltek át az Atlanti óceánon. Goodenough és társai egy széleskörű egyeztetés részleteit rögzítették cikkükben, melynek egyik központi mondanivalója a köd vagy a csapadék miatti alacsony látástávolság kérdése az erős szélviharok mellett. Az egyeztetés résztvevői egyhangúan egyetértettek, hogy a menetrendszerű, Grönlandon is leszálló járatok megindítása előtt további kiterjedt meteorológiai vizsgálatok és kutatások szükségesek a tárgyalt kérdéskörben [33].

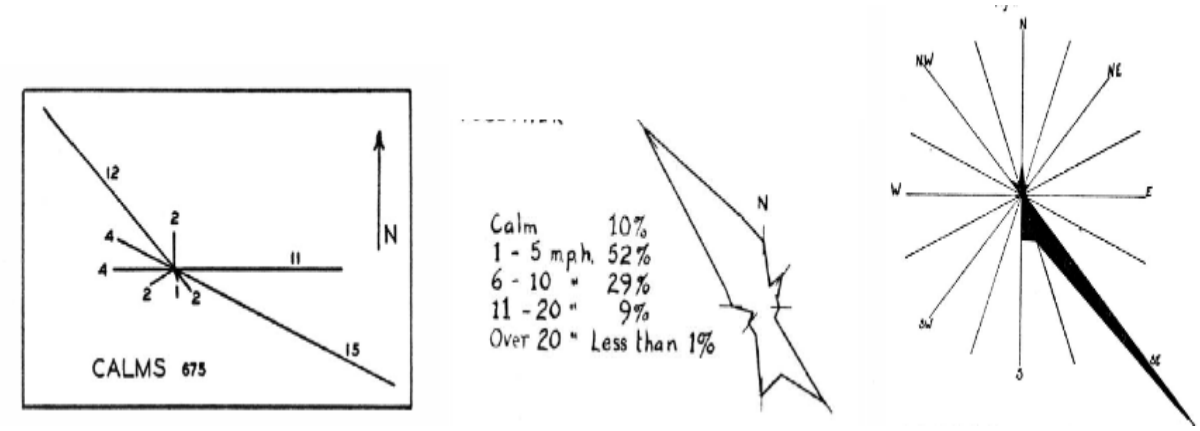
A csökkent látástávolság problémájának megoldását egyesek már az 1930-as évek elején más, a meteorológia vívmányaitól eltérő megközelítésekben látták. H. Diamond tanulmányaiban egy olyan műszeres leszállást segítő rendszer ötletéről, sőt sikeres tesztjeiről számol be, amely akár 0 méteres látástávolság esetén is biztonságos landolást tud biztosítani, függetlenítve ezzel a repülést az alacsony látástávolság okozta korlátoktól [34][35].

Hasonló megoldási lehetőséget vázol fel a NASA technikai leírása is, amely a léginavigáció számára tett óriási szolgálatként értékelné, ha köd vagy sötétség (sic!) miatt kialakult „látás nélküli” helyzetben valamilyen rádiónavigációs rendszer megfelelő segítséget nyújtana [36].

Ezek után az előzmények után nem meglepő, hogy a meteorológusok fokozott figyelemmel fordultak a köd és egyben az alacsony látástávolság előrejelezhetőségének kérdése felé. Ezek a módszerek azonban eleinte többnyire szimplán tapasztalati úton születtek, mai szemmel tekintve durván egyszerűsített megközelítésnek tűnnek. P. F. Clapp és R. G. Stone 1938-as cikkében például a köd kialakulása lehetséges szinoptikus magyarázatainak bemutatása után az előrejelezhetőséggel kapcsolatban az alacsony harmatpontdeficitet és a detektált áramlási köd esetében az észlelési hely távolságát valamint a szélirányt és a szélsebességet nevezik meg, mint használható prediktorokat. Munkájuk emellett az 1932-1936 közötti ötéves időszakra

vonatkozó köd statisztikákat is tartalmaz az adott megfigyelési helyre (Cheyenne, Wyoming, USA), aminek jelentősége abban rejlik, hogy talán egyik első alkalommal láthatók benne feltételes relatív gyakoriságok is [37]. Ezek a fajta statisztikák ugyanis az általános, feltételeket nem tartalmazó feldolgozásokkal szemben sokkal specifikusabb, az aktuális időjárási helyzethez igazodó elemzések végrehajtását teszik lehetővé, prognosztikai értékű iránymutatással támogatva a meteorológusok munkáját. A havi köd gyakoriság és átlagos csapadékmennyiség mellett a statisztika II. és III. részében a köd gyakorisága a fő- és mellékégtájaknak megfelelő szélirány függvényében illetve a köd kialakulását megelőző 24 órán belüli csapadékot is figyelembe véve kerül megjelenítésre. Ezekből az adatokból ugyan messzemenő következtetések nem kerülnek levonásra, de a szerzők felismernek kulcsfontosságú faktorokat, amelyek a köd kialakulása során fontos szerepet játszhatnak.

P. R. Krishna Rao a RAF, azaz a Brit Királyi Légierő (Royal Air Force) meteorológusa mindjárt munkájának első bekezdésében kiemeli a felhőzetet (beleértve a felhőalap magasságát is) és a látástávolságot, mint a repülések biztonságos végrehajtását legjobban befolyásoló meteorológiai tényezőket. Ráadásul, hangsúlyozva azt a tényt is, hogy a katonai repülések során a fenti paraméterek milyen fontos szerepet játszanak a légi felderítési és fényképezési feladatok végrehajtásakor. Ez azt jelenti, hogy már a múlt század harmincas éveiben egyértelművé vált, hogy a katonai feladatok végrehajtása a meteorológusok oldaláról sok esetben többlettámogatást, a speciális műveletek kivitelezése pedig az „egyszerű” repülési feladatokhoz képest kedvezőbb meteorológiai körülményeket igényel. A lokális előrejelzések sikerességének tekintetében a szerző kiemeli a különböző időjárási jelenségekről készített statisztikai összesítések fontosságát, amelyet azonban gyakorlatban is alkalmazott példákkal nem támaszt alá. [38] Nem úgy, mint Williams, Jermin és Woodward, akik munkáikban részletes statisztikai elemzéseket bocsátanak az olvasók rendelkezésére [39][40][41]. A három cikk nagyjából egy időben és hasonló elgondolás alapján születetett, ráadásul az eredmények bemutatását is hasonló grafikus ábrázolásmóddal oldották meg (15. ábra).



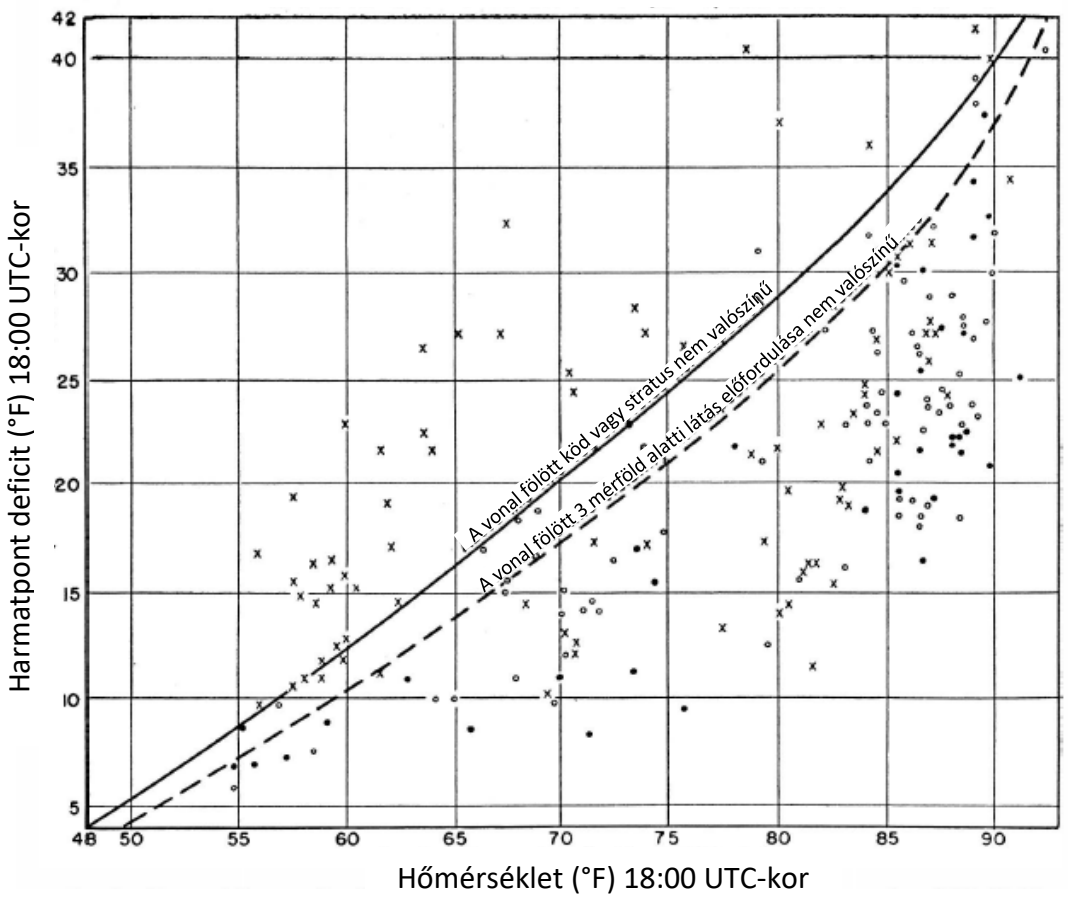
15. ábra: A szélirány szerinti relatív gyakoriságok különböző ábrázolása a Portland Columbia, a Pendleton és a seattlei Boeing Field repülőterek vonatkozásában [39][40][41]

Míg az első közlemény esetében a statisztikai elemzések segítségével Williams csak beazonosítja azokat a tipikus szinoptikus szituációkat, amelyek a köd kialakulásához vezetnek, addig Jermin ezen túlmenően az adott szinoptikus helyzet vonatkozásában az előrejelzőknek szóló tanácsot is ad. Woodward munkája a legnagyobb seattlei repülőtér, a Boeing Field ködös, alacsony felhőalapos időjárási statisztikáit boncolgatja és számos összefüggést tár fel az alacsony látástávolság és felhőalap kapcsolatában.

Mathews 1943-as tanulmányában a kisugárzás és a kondenzáció figyelembe vételével a kisugárzási ködök kialakulása várható idejének előrejelzésére alkalmas determinisztikus módszert mutat be, amelynek alkalmazhatóságát több repülőtérre vonatkozó esettanulmány prezentálásával támasztja alá [42]. A meglepően jó eredményeket azonban egyetlen későbbi tudományos publikáció vagy tanulmány sem igazolja. Részletes adatok és verifikációs eredmények hiányában pedig módszertanilag sem ellenőrizhetők a szerző állításai.

Sir Nelson Johnson, a Brit Meteorológiai Szolgálat igazgatója, korábbi vadászpilóta 1949-ben Meteorológia a háborúban címmel tartott előadást, amelyet Sir Edgar Ludlow-Hewitt a Brit Királyi Légierő vezérezredese konferált fel. Az előadás alapvetően a meteorológiai támogatás katonai aspektusait vizsgálja és az egyik legfontosabb megállapítása, hogy a legkritikusabb meteorológiai paraméterek mindhárom haderőnem vonatkozásában (légierő, szárazföld, haditengerészet) azonosak [43]. Nem meglepő módon a látástávolságot emeli ki a meteorológiai tényezők közül, amelyek hatást gyakorolnak a katonai műveletekre és itt nem csak az üzemeltetésből adódó korlátozó tényezőket veszi számításba, hanem a tényleges katonai műveleteket befolyásoló mivoltát is. Itt többek között a támadandó célok azonosítását, a légi felderítő tevékenységet és az alacsony látástávolság taktikai kihasználásának lehetőségeit említi.

Az 1950-es évekre teljesen általánossá vált, hogy a köd és az alacsony látástávolság problémakörével foglalkozó tudományos munkák a megfigyelési eredményeken alapulva mind a statisztikai, mind pedig a szinoptikus összefüggéseket górcső alá veszik. Simon hasonló felépítésű munkájában a statisztikai adatokon és a köd kialakulása számára kedvező szinoptikus szituációk bemutatásán túl rövid esettanulmányok segítségével mutat rá tapasztalati tényeken alapuló prognosztikai összefüggésekre. Ezekben a felszíni és magassági szelek, valamint a hőmérsékleti és nedvességi viszonyoknak tulajdonít kiemelt szerepet. Ennek eredményeként fel is vázol egy előrejelzési diagramot, amelynek segítségével (adott időpontbeli kiindulási feltételek mellett) prognosztizálható a stratus felhőzet és az alacsony látástávolság (16. ábra) [44]. A diagram vízszintes tengelye a 1800Z-kor mért hőmérsékletet, függőleges tengelye pedig az ugyanakkor mért harmatpont deficitet jelöli Fahrenheit fokban kifejezve. Az „x" jelek azokat az eseteket jelölik, amikor nem észleltek csökkent látástávolságot vagy stratus felhőzetet, az üres körök esetén volt stratus, de a látástávolság nem csökkent 3 mérföld alá, míg a teli köröknél mindkettő bekövetkezett.



16. ábra: Köd és stratus előrejelzési diagram Farouk repülőtér (Egyiptom) térségére [44]

A tapasztalati eredményeken alapulva a diagram segítségével a mérési adatok alapján nem várható stratus felhőzet vagy csökkent látástávolság a folytonos görbe felett, illetve

látáscsökkenésre sem kell számítani a szaggatott görbe felett. A maradék esetekben a prognózis alacsonyszintű felhőzet és csökkent látás. A cikk következtetéseiben Simon a diagram alkalmazásának eljárásrendszerű, lépésenkénti végrehajtását is részletesen megadja, amely adott esetben jelentősen segítheti az előrejelzői munkát, az említett meteorológiai jelenségek viszonylag alacsony előfordulási gyakorisága ellenére is.

A vázolt időszakban kifejlesztett előrejelzési metódusok korlátozott pontossága és visszafogott sikeressége is ösztönzőleg hatott, hogy a csökkent látástávolság okozta problémakörre más megközelítésekből is keressenek megoldást. Ilyenre mutat példát Houghton [45] szabadalma a múlt század harmincas éveiből, vagy akár Stone [46] illetve Elton és Alfred [47] találmányai a rákövetkező évtizedekből. Mindegyik megoldás az alacsony látástávolság kérdésköréhez, a kiváltó okok kémiai, fizikai megszüntetésén keresztül közelít.

Houghton eljárása a nukleációs magok manipulációjának segítségével akadályozza meg a köd kialakulását vagy segíti disszipációját. A szabadalomban a szerző az alacsony látástávolság közlekedésre, ezen belül pedig kiemelten a légiközlekedésre gyakorolt negatív hatásával indokolja eljárása alkalmazásának fontosságát. Kiemeli azonban, hogy az eljárás csupán lokális alkalmazásra alkalmas, de úgy látja, hogy akár a futópálya részleges láthatósága is jelentős segítséget nyújthat az alacsony látástávolság okozta veszélyes szituációban.

Stone szabadalma alkohol megfelelő eljárással való kipermetezését taglalja, aminek hatására adott légköri viszonyok között a köd feloszlik vagy a megnövekedett cseppméret miatt a gravitáció segítségével egyszerűen csapadékként kihullik. Az eljárás hatékonyságát sikeres terepi kísérletek eredményeivel igazolja, valamint egyúttal szorgalmazza széleskörű alkalmazását.

Elton eljárása is a cseppméret növelésével és így a köd „sűrűségének” csökkenésével illetve a nagyobb cseppek kihullásával és így a köd feloszlásával próbál érdemi eredményeket elérni. Az előző metódushoz képest azzal a különbséggel, hogy a ködbe juttatott különböző kémiai, felületaktív anyagok ebben az eljárásban a cseppek töltésének befolyásolásával segítik elő a koaguláció hatékonyságát és ezzel az előbb említett célok elérését. A kísérleti alapon kiválasztott kémiai katalizátorok kijuttatására kétféle módszert javasol: egyrészt a füstölést, másrészt pedig az érintett vegyületek mechanikai kipermetezését. Ezek közül az első eljárást alacsonyabb hatékonysága miatt csak a ködmentes területek előkezelésére, az állapot fenntartása érdekében javasolja. Az utóbbi eljárást azonban megfelelő kijuttató rendszer segítségével a köd viszonylag tartós megszüntetésére is alkalmasnak találja. A módszer hátránya, hogy csak a tényleges kijuttatási térfogatban működőképes, azaz vastagabb inverziós

réteg esetén is csak a kijuttatási magasságig szünteti meg a ködöt, földlátást nem biztosít, valamint áramlási köd esetén vagy nagyobb szélsebességeknél az elért javulás tartóssága erősen korlátozott.

A fenti szabadalmak megjelenése óta eltelt fél évszázad nem igazolta költséghatékony gyakorlati alkalmazhatóságukat, általában felhasználásuk nem jutott tovább a kísérleti fázisnál. Sőt még évtizedekkel később sem jelent meg olyan eljárás, amit operatív repülőtéri körülmények között használnának a látástávolság javítása vagy az alacsony látástávolságú időjárási szituációk megelőzése érdekében. Ugyanakkor az ezekkel kapcsolatos kutatási erőfeszítések nem voltak teljesen hiábavalók, egyes részeredményeiket, eljárási lépéseiket különböző meteorológiai projektekben ma is hasznosítják. Ilyen alkalmazásra példa a hazánkban is működő jégeső elhárító rendszer, amely ezüst-jodid égetésével füstöléses eljárással juttatja a szükséges reagenseket a zivatarfelhőkbe, módosítva ott a képződő jégszemek számát és minőségét.

A fizikai, kémiai elveken működő látástávolság javító megoldások mellett egyre nagyobb érdeklődés övezte a látástávolság műszeres meghatározásának kérdését is. Ez egyáltalán nem vagy csak részben az észlelések automatizálásának okán került a figyelem középpontjába. A fő ok elsősorban az volt, hogy a látástávolság meghatározása, mérése teljesen objektív módon, a hagyományos észlelési eljárásoktól függetlenül ismert távolságú tájékozódási pontok hiányában és a hivatalos észlelési időpontoktól függetlenül is megvalósulhasson. Nagy problémát okozott ugyanis hogy például repülőgéphordozó anyahajókon vagy partvidéki, esetleg hegyvidéki repülőterek esetében ismert távolságú tájékozódási pontok egyáltalán nem vagy csak adott irányokban állnak rendelkezésre valamint hogy az észlelési információk folytonossága csak az észlelési gyakorisággal biztosított.

Ebben az időszakban számos tudományos munka [48][49] született ebben a témában, melyek közül talán a legértékesebb próbálkozás Bibby közleménye [50], amely a Japán Meteorológiai Társaság hivatalos lapjának jubileumi számában jelent meg 1957-ben. A cikk több évtizedes fejlesztés, fejlődés végeredményét összegzi, amelynek eredményeként a gyakorlati életben is alkalmazható látástávolság mérő került kifejlesztésre. A fotoelektromos működési elven alapuló műszer a mai transzmisszométerek elődjének is tekinthető: ugyanúgy a Koschmieder formula alapján kalkulálja a látástávolság és a fénygyengítés közötti kapcsolatot. Érdemi különbség a mai műszerekhez képest csak a viszonylag nagy bázistávolságban (85 m vs. 25-30 m) és a fényforrás típusában (nagy teljesítményű reflektor v. led) van [51]. A szerző a cikkben többéves mérési adatsort helyez elemzés alá, amelynek adatait a hagyományos észlelési

módszerrel előállított látástávolság adatokkal hasonlítja össze. Az így kapott eredmények pontossága pedig egyértelműen alátámasztja a műszer operatív gyakorlati alkalmazhatóságát.

A fentiekben bemutatott gyakorlati megközelítések mellett újra egyre gyakrabban fordultak statisztikai módszerekhez a témában jártas kutatók. Az Egyesült Államok légierejének (US Air Force), mint a korszak talán legnagyobb repülő szervezetének, tudományos munkával foglalkozó munkatársai élenjárók voltak a perzisztencia és a feltételes éghajlati valószínűség gyakorlati prognosztikai alkalmazásában.

Előbbire mutat példát Restivo [52] Perzisztencia valószínűség (Persistence probability) című munkája. Ebben a szerző a perzisztenciának, azaz adott meteorológiai viszonyok, körülmények tartós fennállásának a kérdéskörét tárgyalja. Az általános felvezetést követően – melyben a szükséges mértékben tisztázza a használt fogalmakat és vázolja az alkalmazás fontosságát, – rámutat, hogy a perzisztencia alapvetően két fontos meteorológiai feladat során használható nagy hatékonysággal, ezek pedig az ultra-rövid előrejelzések (elő)készítése és az elkészült előrejelzések kiértékelése. Már Restivo is egyfajta benchmark-ként, viszonyítási alapként tekint a perzisztencia prognózisra, sőt korábbi tudományos munkákra hivatkozva adott esetben szorgalmazza is a perzisztencia prognózis alkalmazását. Az általa bemutatott eljárás lényege, hogy egy adott állomás észlelési adatait kezdetleges adatbázisba rendezve, meghatározott időpontra és kezdeti kategóriákra vonatkozóan, azaz feltételes gyakoriságokkal/valószínűségekkel dolgozva, kalkulálhatók a megadott kategória perzisztencia valószínűségei a rákövetkező órákra. Ezeket a műveleteket modern módon számítógép alkalmazásával végezték el és a 2. táblázatban látható példa szerinti eredményformátumot kapták.

		Az időjárási kategória valószínűsége 0600 LT-kor			
		A	B	C	D
Kezdeti kategória 0400 LT-kor	A	66,6%	22,2%	11,2%	0,0%
	B	29,2%	33,3%	29,2%	8,3%
	C	2,3%	9,1%	77,4%	11,2%
	D	0,0%	2,9%	15,9%	81,2%

2. táblázat: Kétórás perzisztencia valószínűségi tábla januári adatokra, 0400 LT kezdeti időpontra és a megadott kategóriákra vonatkozóan (A, B, C, D) [52]

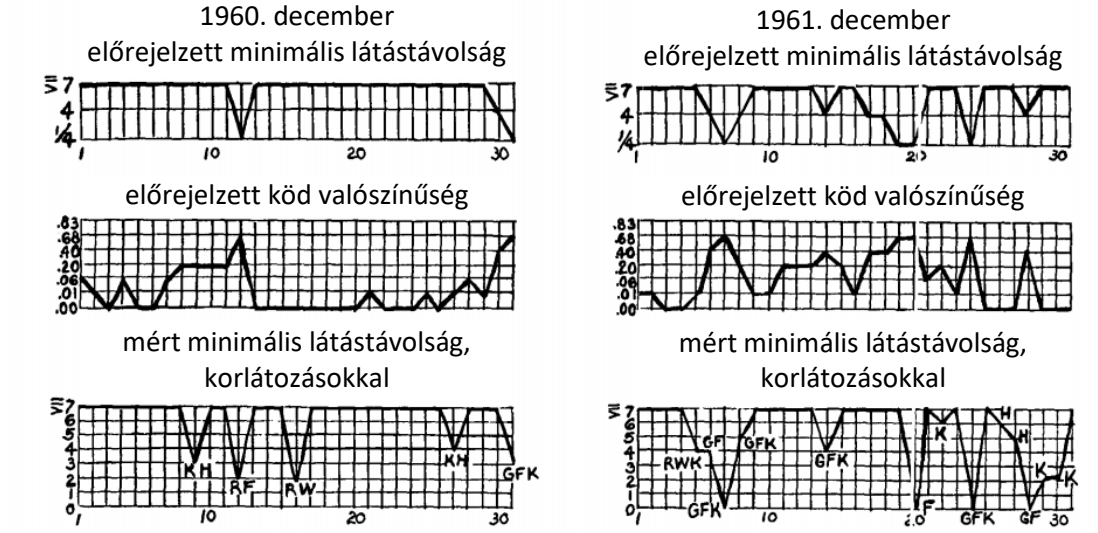
A fenti tábla azt mutatja, hogy a függőleges tengelyen szereplő kiindulási kategóriákat – amelyek lehetnek tetszőleges határokkal megadott látástávolság, felhőalap vagy kombinált kiosztások, – milyen valószínűséggel követik két órával (itt tetszőleges, értelmes időtartam megadható) később a megadott kategóriák. Felhívja azonban a figyelmet arra, hogy a perzisztenciának látszó eredmények esetenként csak látszólagosak, mivel a létrehozott adatbázis csak az órás észlelések adatait tartalmazza, a köztes fluktuációkról nem szolgáltat információt. Ennek megfelelően ezekben az esetekben nem beszélhetünk tényleges perzisztenciáról, csak az egymást követő észlelések kategóriáinak egybeeséséről, ami az eljárás prognosztikai értékét nem javítja.

Két évvel Restivo munkája után, McCabe ezredes az USAF főtisztje már egy jóval összetettebb statisztikai hátterű munkát [53] publikált a fent is vázolt témában. A kifejlesztett modell az előzőhöz hasonlóan, számítógépes kalkulációval állítja elő a kívánt paraméterek vonatkozásában az adott kategóriára a perzisztencia és feltételes valószínűség értékeket. A két eljárás közötti legnagyobb különbség abban rejlik, hogy az utóbbiban a kalkuláció során McCabe a vizsgált paraméter napon belüli változékonyságát és az aktuális szituáció előzményeit is figyelembe veszi. Az összetett statisztikai eszköztár alkalmazásával így ebben az esetben már nem csak ultra-rövid távra, hanem hosszabb időszakra (24 óra) is lehetővé válik a prognosztikai becslés.

Shafer és munkatársai az előző két módszerhez hasonló, elsősorban a látástávolság rövidtávú becslésére tervezett eljárást tettek közzé [54]. Döntési fa alapú modelljük annyiban más a fentiekben vázoltakhoz képest, hogy a historikus adatokon túl a makroszinoptikus szituációt is figyelembe veszi. Az eljárást alkalmazó előrejelzőnek először a magassági geopotenciál mező (500 hPa) alapján kell meghatározni a szinoptikus helyzettípust, majd az annak megfelelő statisztikai táblák alapján kell az előrejelzett kategóriát véglegesíteni. A fejlesztéseiket szignifikánsan eltérő földrajzi helyeken (szárazföldi vs. tengeri környezet) is tesztelték és a kapott eredmények egyértelműen pozitívak voltak.

Carson és Hardy cikkében [55] a köd előrejelzésére szolgáló eljárásukban szintén figyelembe veszik a makroszinoptikus helyzetet, de csak a köd kialakulása szempontjából legkedvezőbb három típust használják a prognosztikai módszerükben. A felszíni mérési adatok mellett az 1000’ magasban mért szélirányt és szélsebességet is figyelembe veszik a modelljükben, mégpedig oly módon, hogy a magassági szélre vonatkozó információk alapján készített köd valószínűségi táblájuk eredményeivel a telítési viszonyok alapján becsülik a várható látástávolságot. Módszerüket az 1960-as években – akkoriban nem jellemző módon -

viszonylag összetett, független adatokon alapuló verifikációs eljárással igazolják (17. ábra). Ami annak ellenére is dicséretes, hogy a kontingencia táblázaton alapuló, a verifikációban alkalmazott mérőszámokról érdemi, részletekbe menő leírást nem adnak.



17. ábra: 1960, 1961 december havi adatok verifikációs eredményei [55]

Crisci és munkatársai 1973-ban megjelent kutatási jelentésükben [56] a többszörös lineáris regressziót alkalmazó statisztikai előrejelző modelljüket mutatják be. Az Egyesült Államok meteorológiai szolgálatánál (NWS – National Weather Service) később operatív használatba is állított modell bináris észlelési adatokat használ prediktorokként. Ezek előállításhoz a mért és megfigyelt klimatikus információkat igen/nem döntés alapján kategóriákba sorolták, majd többszörös lineáris regresszió segítségével állomásonként előállították a regressziós együtthatókat. Az így előálló egyenletek segítségével a 3. táblázatban is látható prediktandusz kategóriákra készülhettek el az automatizált előrejelzések.

Kategória	Felhőalap (láb)	Látástávolság (mérföld)
1	≤ 100	≤ 3/8
2	200 - 400	1/2 - 7/8
3	500 - 900	1 - 2 1/2
4	1000 - 1900	3 - 4
5	≥ 2000	≥ 5

3. táblázat: A felhőalap és a látástávolság együttes előrejelzési kategóriái [56]

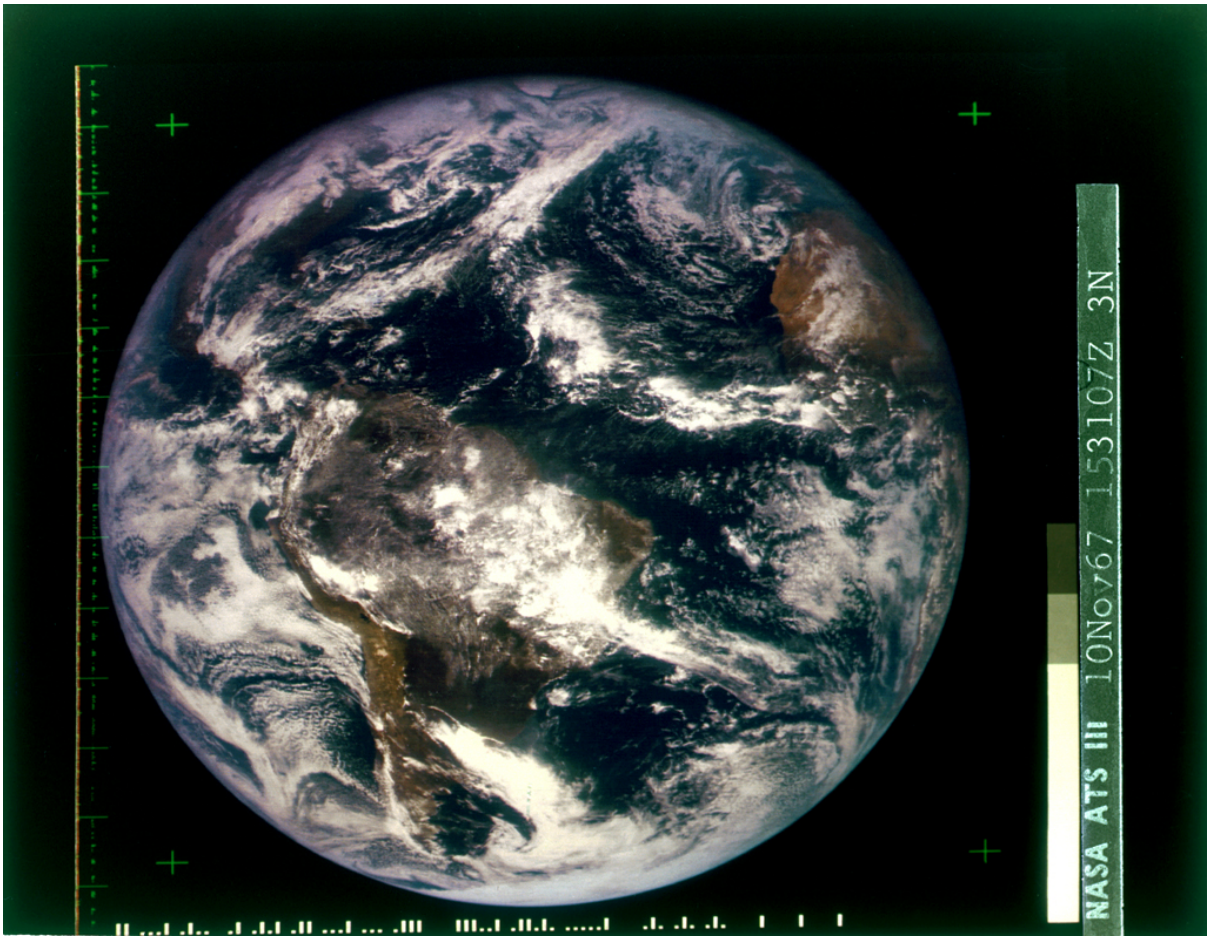
Bár a verifikációs eredmények nem kerülnek részletezésre, a szerzők annyit elismernek, hogy az eredmények még a perzisztencia prognózissal összevetve sem túl meggyőzőek. Ezzel kapcsolatban két dolgot emelnek ki: az első, hogy az előrejelzés során csak az adott állomás adatait (single station) használták fel, ami kevésbé hatékony eljárás, a második pedig az, hogy

módszerüket csak átmeneti megoldásnak szánják, míg egy hatékonyabb, numerikus előrejelzésen alapuló eljárás operatív használatba kerül.

A szerzők ugyan csak áttételesen, közvetett módon utalnak rá, de az akkori kor numerikus prognosztikai megoldásai az egyes változók vonatkozásában még igencsak gyerekcipőben jártak. A numerikus modellek outputjaiként ekkor még az esetek döntő többségében az előrejelzési egyenletrendszerből közvetlenül kifejezhető változók előrejelzési mezői jelentek csak meg. Az olyan bonyolult meteorológiai paraméter, mint a látástávolság sajnálatos módon még napjainkban is egyike azoknak a változóknak, amelyek előrejelzése az egyik legnagyobb kihívást a jelenti numerikus prognosztikában és emiatt a rá vonatkozó előrejelzések megbízhatósága is hagy kívánnivalót maga után. Ennek az okai két, egymástól nem teljesen független okban keresendők: egyrészt az említett meteorológiai paraméter alakításában rendkívül összetett fizikai, mikrofizikai folyamatok játszanak szerepet, másrészt az előrejelzés során alkalmazott numerikus modellek sem tökéletesek, számos származtatott paraméter esetében erős egyszerűsítésekkel, a bonyolultan leírható folyamatok helyettesítő fizikai parametrizációjával dolgoznak.

Annak köszönhetően, hogy a látástávolság numerikus modellezését lehetővé tévő első parametrizációs sémák csak az 1970-es évek második felében kerültek kidolgozásra, a témával foglalkozó kutatók a numerikus modellek hagyományos kimenetein alapuló statisztikai eljárások fejlesztésébe kezdtek. Mindehhez a számítástechnika egyre gyorsuló fejlődése is szükséges volt, hiszen megfelelő számítási kapacitás hiányában az egyre nagyobb adatmennyiségekkel és egyre bonyolultabb sémákkal dolgozó újszerű eljárások sem voltak többek, mint elméleti lehetőségek a hatékonyabb előrejelzésre. Ilyen előzmények után jelent meg Glahn és Lowry sokat idézett, úttörő munkája [57] 1972-ben. Az általuk alkalmazott objektív időjárás előrejelzés utófeldolgozási módszer a modell output statisztika (MOS – Model Output Statistics). A MOS a különböző perfect prognosztikai eljárásokhoz hasonlóan a prediktorok és a prediktanduszok közötti regressziós összefüggések meghatározásával állítja elő tetszőleges kimeneti paraméterre a kívánt prognózist, azzal a különbséggel, hogy a MOS esetében a statisztikai kapcsolatot a nyers modell kimenetek és az ugyanarra az időpontra vonatkozó megfigyelési adatok között keresik. Ugyan ebben a cikkben még a látástávolság ilyen eljárással való előrejelezhetőségét még nem mutatják be a szerzők, de nem sokkal később már számos publikáció született, ami bizonyította ezen a téren való gyakorlati alkalmazhatóságát [58][59][60][61].

Sikula és Haar arra mutatnak rá 1973-as tanulmányukban [62], hogy bár statisztikai módszerek alkalmazásával – a numerikus modellekkel ellentétben, – sikerült eredményeket elérni a rövid távú időjárás előrejelzések terén, az igazán meggyőző, hatékony eljárások még váratnak magukra. Annak ellenére, hogy az Egyesült Államok tudományos akadémiájának légkörtudományi tanácsa az általa javasolt kutatási prioritások között második helyen szerepeltette a „lokális időjárás rövid távú extrapolációja” című témát. A fenti okok és az előrejelzéssel nem lefedett területek ellátásának igénye együttesen ösztönözte a szerzőket a műholdas információkon alapuló előrejelzési módszer kidolgozására, amely elsősorban kisskálájú és rövid karakterisztikus idejű veszélyes időjárási jelenségek prognosztizálását tűzte ki célul. A módszer lényege ebben az esetben is többszörös lineáris regresszió alkalmazása volt, melyhez a prediktanduszok tekintetében egyesült államokbeli repülőterek előrejelezni kívánt változóit választották ki. A prediktorok szerepét pedig a NASA kísérleti geostacionárius műholdja, az ATS-3 által szolgáltatott műholdas mérési adatok töltötték be.



18. ábra: Az első színes műholdfelvétel a Földről (ATS-3, 1967. november 10.) [63]

Talán nem meglepő módon a legjobb eredményeket a felhőborítottság és a felhőalap magasság előrejelzésében érték el, míg a látástávolság prognózisa terén gyengébb eredmények születtek.

Ezt a különbséget a szerzők a statisztikai kapcsolat erősségében való eltérésnek és a műholdas információ alacsony felbontásának tulajdonították.

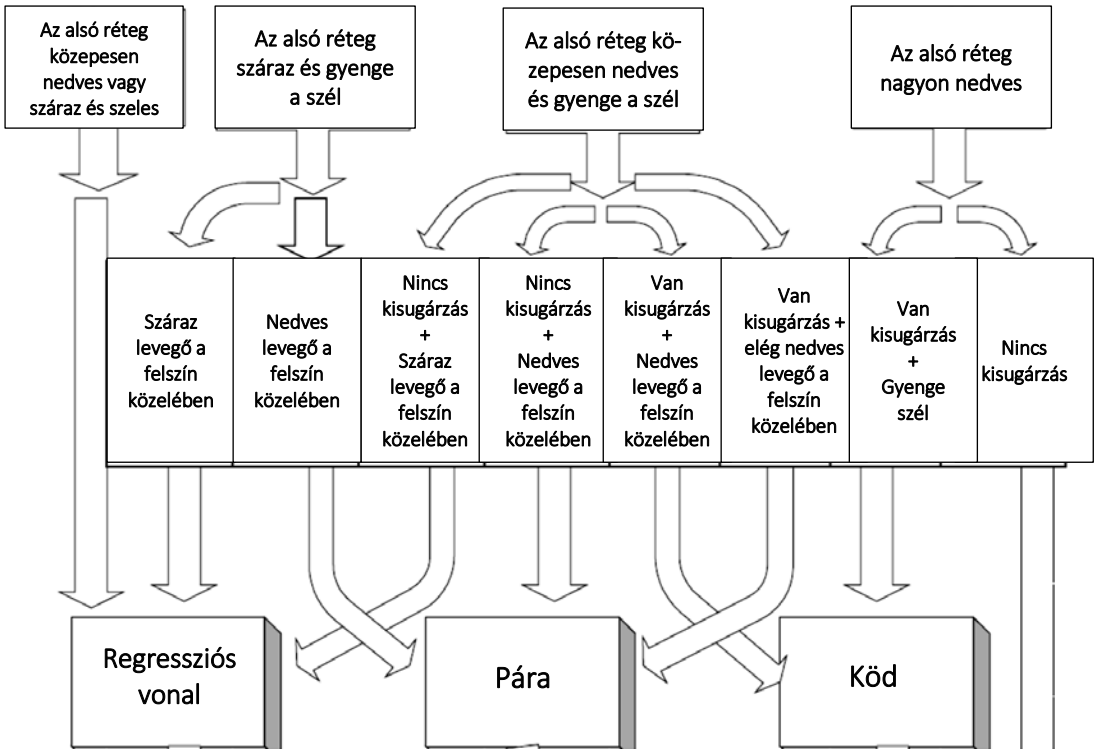
Ahogyan a korábbiakban is említettem az 1970-es évek második felében megjelentek azok az első fizikai parametrizációs sémák, amik a numerikus modellek térbeli felbontásánál kisebb méretskálájú folyamatok egyszerűsített leírására szolgáltak. Ezek közül Yamada és Mellor [64][65], valamint Oliver és társai [66] munkái érdemelnek kiemelt figyelmet. Publikációikban különböző bonyolultságú modelleket mutatnak be, amelyek a horizontális látástávolság szempontjából meghatározó réteg, a planetáris határréteg turbulens és mikrofizikai folyamatait szimulálják. Ezek az első modellek megtették a kezdő lépéseket a köd vagy a csökkent látástávolság kialakulását meghatározó folyamatok pontos numerikus prognosztikai leírása felé.

Később még részletesebb, szofisztikáltabb megközelítéseken keresztül fejlesztette tovább többek között Musson-Genon [67] és Mason [68] ezeket a parametrizációs sémákat. Az egyszerűbb megközelítések egydimenziós, míg a teljesebb leírást nyújtó eljárások háromdimenziós modellezési struktúrát alkalmaztak. Míg a háromdimenziós modellek mind horizontális, mind pedig vertikális irányban figyelembe veszik fizikai folyamatokat és kölcsönhatásokat, addig az egydimenziós esetben a feltételezett horizontális homogenitás (a turbulencia és a különböző változók tekintetében is) miatt az olyan dinamikai folyamatok, mint például az advekció negligálásra kerülnek.

A modellek nyilvánvaló fejlődése ellenére – ahogyan Burk és Thomson is megfogalmazza [69], – ebben az időszakban a határréteg modellezése inkább tölt be szimulációs, mint prognosztikai célokat. Ez elsősorban arra vezethető vissza a szerzők szerint, hogy a numerikus modellezés területén nincs meg az igény az adott kis méretskálájú jelenségek (pl.: köd, szélnyírás, stb.) előrejelzéseinek fejlesztésére, annak ellenére, hogy a határréteg modellezése már használható eredményekhez tudná őket segíteni. Szerencsére ez a felfogás azóta jelentős átalakuláson ment keresztül és napjainkban már a legtöbb korlátos tartományú modellben rendelkezésre állnak akár a látástávolság előrejelzését szolgáló közvetlen outputok is. Ennek megfelelően az elmúlt évtizedek ezirányú kutatási, fejlesztési eredményei az operatív előrejelzések szintjére is eljuthatnak. Ilyen eredményre mutat be példát Gultepe és Isaac [70], Teixeira és Miranda [71], Müller [72], Gultepe és társai [73] valamint Molnár [74] publikációja.

Annak ellenére, hogy a komplex kölcsönhatásokat és az összetett termodinamikai folyamatokat egy pontos háromdimenziós modell tudja csak teljes részletességgel modellezni, ez a modell

típus mégsem terjedt el széleskörűen [75]. Mindezt Gultepe egy részletes, áttekintő munkájában fogalmazta meg és azzal magyarázza, hogy ez extrém módon számításigényes eljárás az egydimenziós modellekkel szemben, amelynek használatára többnyire gazdaságossági okokból nem kerül sor. A széleskörben használt egydimenziós modellek mellett ugyanakkor az elmúlt évtizedben feltűntek a két említett típus kombinációját alkalmazó modellek, amelyekkel a számítási igény viszonylag alacsonyan tartható, mégis kellő részletességgel modellezik a kívánt folyamatokat [76][72].



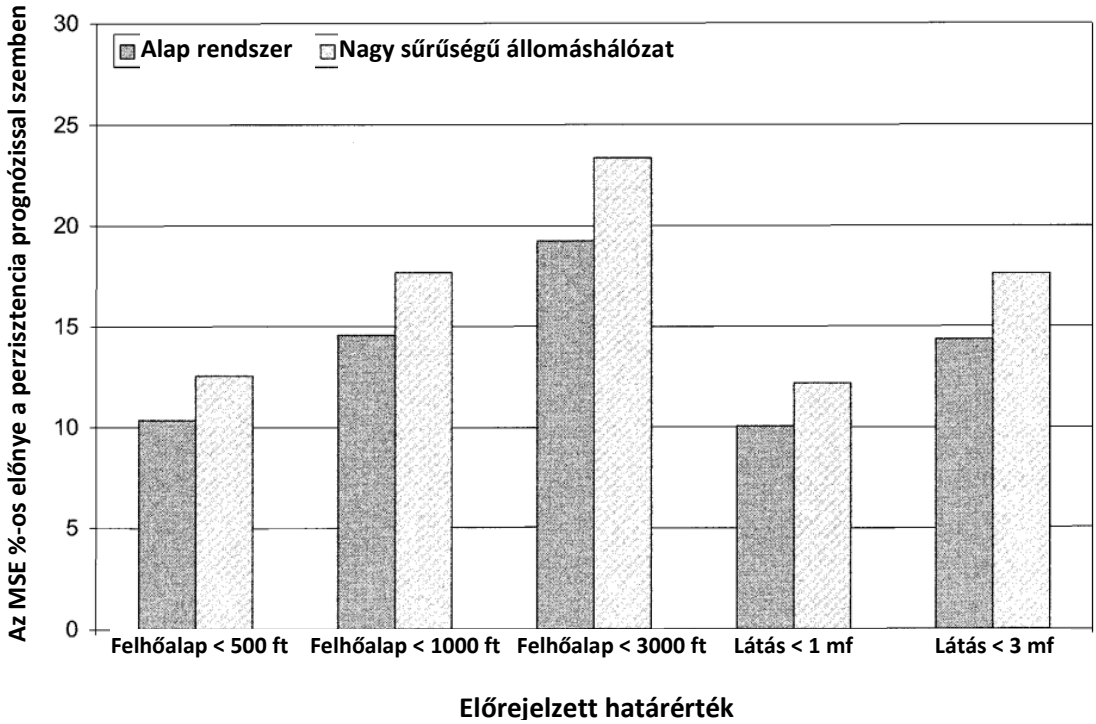
19. ábra: A Wantuch által bevezetett döntési folyamat részlete. A döntési pontok a numerikus modell kimeneti értékein alapulnak [79]

A numerikus előrejelző modellek kimeneti paramétereinek átfordítása tényleges látástávolság információkká sem egyszerű feladat, ezek az utófeldolgozó eljárások a már tárgyalt modell ouput statisztikák mellett számos statisztikai vagy akár döntéselméleti módszert alkalmaznak. Zhou és társai [77] például a Stoelinga és Warner [78] által publikált, az extinkciós együtthatót felhasználó összefüggést alkalmazták, míg Wantuch [79] eljárása döntési fa alapú modellre épült. Ez utóbbiban összetett, a numerikus modell kimeneti paraméterein alapuló automatizált döntési eljárás zajlik le, melynek részletét a 19. ábra szemlélteti. A döntési fa alkalmazását követően a látástávolság számszerű meghatározása a FOGSI index alapján, lineáris regresszióval előállított prognosztikai összefüggés segítségével történik meg a folyamat végén.

A módszer az Országos Meteorológiai Szolgálatnál operatív alkalmazásra is került a meggyőző verifikációs eredmények alapján.

Az utóbbi évtizedekben a fent bemutatott módszerekkel párhuzamosan a statisztikai eljárásokat alkalmazó előrejelzések is újabb impulzusokat kaptak. Leipper 1995-ös munkájában [80] például olyan statisztikai alapon nyugvó rövidtávú, a partmenti köd előrejelzését segítő módszert mutat be, ami a legnagyobb súllyal a parti szeleket, az inverzió erősségére vonatkozó információkat és a tengerfelszín valamint a levegő hőmérsékletét veszi figyelembe. A módszer verifikációjánál azonban sajnos csak esettanulmányokkal támasztja alá annak hatékonyságát, objektív ellenőrző eljárásokat nem vázol fel.

Vislocky és Fritsch a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazó lineáris regressziós modellt mutat be a látástávolság és a felhőalap előrejelzésére [81]. Munkájuk kiemelkedő értékét nem az alkalmazott eljárás újdonsága adja, hanem az, hogy részletes összehasonlító verifikáció keretében a bemutatott statisztikai módszer eredményeit a modell output statisztikák és viszonyítási alapként a perzisztencia prognózis eredményeivel is összeveti. A verifikáció tapasztalatai azt mutatták, hogy a statisztikus eljárás jelentősen jobb volt a perzisztencia prognózisnál a teljes hatórás előrejelzési intervallumban illetve az első három órában szignifikánsan jobb volt a MOS eredményeinél is, közel azonos eredményeket csak a periódus hatodik órájában mutattak. A kapott eredmények alapján a szerzők indokoltnak érzik a megfigyelési adatokon alapuló statisztikai eljárások további fejlesztését és minél szélesebb körű alkalmazását. Fritsch nem is tétlenkedett ezen a téren, Leytonnal együttműködve bebizonyította, hogy a korábbi munkájában bemutatott statisztikai eljárást a nagy sűrűségű állomáshálózat együttes adataira alkalmazva, a látástávolság és felhőalap előrejelzések további jelentős javulása érhető el [82]. Ez az előrelépés legszignifikánsabban az 1-3 órás előrejelzési időintervallumban jelentkezik, ezen belül is csökkennő tendenciával az idő előrehaladtával. Az egyórás előrejelzések vonatkozásában ezt a 20. ábra mutatja be. Az ábra a perzisztencia előrejelzés négyzetes hibájához (MSE) képest mutatott százalékos javulás mértéket adja meg az választott kategóriák vonatkozásában a sötétszürkével jelölt alap előrejelzésre és a világosabb színű oszloppal reprezentált együttes adatokat alkalmazó új prognózisra. Tisztán látható, hogy az utóbbi esetében mindegyik paraméter és mindegyik alkalmazott határérték tekintetében jobb eredményeket produkált az utóbbi eljárás.



23. ábra: A különböző paraméterek és határértékek vonatkozásában egy órás előrejelzés esetén a perzisztencia prognózishoz képest elért javulás az átlagos négyzetes hiba értékében. [82]

Körülbelül a kilencvenes évek második felétől kezdődően két újfajta, statisztikai alapú megközelítés is megjelent a látástávolsággal kapcsolatos tudományos kutatásokban és meggyőző eredményeik hamar népszerűvé is tették őket. Mindkét eljárás nagy mennyiségű megfigyelési információ feldolgozásán alapul, de míg az egyik a neurális hálók alkalmazására épít, addig a másik a fuzzy logika tárházát használja az előrejelzési produktumok készítéséhez.

A neurális hálókat a tudományos kutatások számos területén alkalmazzák hosszú évtizedek óta. Sikerességüknek köszönhetően a meteorológiai szakterület is érdeklődéssel fordult az irányukba, tekintettel a területet jellemző nagy mennyiségű feldolgozandó adatra. Csak idő kérdése volt, hogy a látástávolság előrejelzésének problémakörében mikor jelenik meg először. Az egyik első említései Pasinitől és társaitól származik [83][84], akik a később idézendő szerzőkhöz hasonlóan megmutatták az eljárás alapvető működési elvét, majd az alkalmazott neurális háló felépítését. Modelljük a bemeneti és kimeneti rétegek mellett egy rejtett réteget tartalmazott, ami a bemeneti (10) és kimeneti adatok (1) közötti komplex kapcsolat felderítését végzi a 10 neuron segítségével. Az utóbbi cikkben bemutatott kísérleti eset során METAR táviratokból kinyert információkat használtak fel a látástávolság, mint kimeneti adat előrejelzésére. A tanulási folyamat során használt adategyüttes mindössze két hónap táviratait tartalmazta, ennek ellenére a verifikáció eredmények a vállalt kétórás előrejelzési horizonton

azt mutatták, hogy a köd előrejelzésének kérdésében a módszer stabilan jobb eredményeket produkált, mint a perzisztencia előrejelzés.

Fabbian és társai a repülőtéri látástávolság előrejelzés gazdasági megfontolású felvezetése és a neurális hálók általános bemutatása után az előző forrásnál ismertetettnél jóval nagyobb, közel húsz éves bemeneti adathalmazról számolnak be [85]. Ezek az adatok három óránként elérhető SYNOP és órás METAR táviratokból származtak. A meteorológiai jelentésekben rendelkezésre álló 17 különböző változó közül végül 8 került kiválasztásra közvetlen bemeneti adatként. A tanulási fázisban a rendszert 3, 6, 12 és 18 órás előrejelzési időre tanították be, ami a későbbi összehasonlíthatóság miatt a TAF táviratok kibocsátási idejéhez igazodott. Alapesetben a neurális háló csak egy rejtett réteget tartalmazott, de a szerzők annak tudatában, hogy két réteg esetén már a nemlineáris függvények is elfogadható hibával közelíthetők, kísérleti jelleggel a rendelkezésre álló adatokkal különböző réteg számra megismételték a teljes folyamatot. Ez amellett, hogy a verifikációs eredmények minden esetben a módszer alkalmazhatóságát igazolták, azt az eredményt hozta, hogy míg a második réteg alkalmazása szignifikánsan javított az előrejelzések beválásán, addig a további rétegek bevezetése már nem rendelkezett hozzáadott értékkel.

Marzban és társai eltérő forrásokból származó adatok felhasználásával dolgoztak ki hasonló módszert 39 előrejelzési célállomásra [86]. Csak a 00 UTC-s időpontból származó megfigyelési adatokat és a korlátos tartományú MM5 modell azonos időlépcsőbeli információit használták fel teljeskörűen, annak érdekében, hogy a tervezett 6 és 12 órás előrejelzési időre vonatkoztatva összehasonlíthatóak legyenek az eredmények a szintén felhasznált globális GFS modell MOS kategorikus látástávolság előrejelzéseivel. A bemeneti adatok gondos előfeldolgozását követően 20 bemeneti változó került kiválasztásra, 12 az MM5 modell outputjaiból, 8 pedig az észlelési adatokból. A modell output statisztikán alapuló előrejelzések teljesítményét felülmúló eredmények bizonyították, hogy akár numerikus modell kimenetek is alkalmazhatók a neurális hálók input adataként.

A nemzetközi kutatásokkal párhuzamosan megjelentek az első hazai tudományos munkák is a témában. Hadobács és Bottyán elméleti áttekintő cikkében a téma konceptuális összefoglaló leírását és a gyakorlati alkalmazás lehetőségeit mutatja be [87]. Nagy Roland diplomamunkájában viszont már kísérleti jelleggel a valós gyakorlati alkalmazás is szerepet kap [88]. Dolgozatában egy perfekt prognosztikai és egy nowcasting megközelítésű neurális hálózatot mutat be részletesen, ugyanakkor mindkét esetre érvényes, hogy az alkalmazott

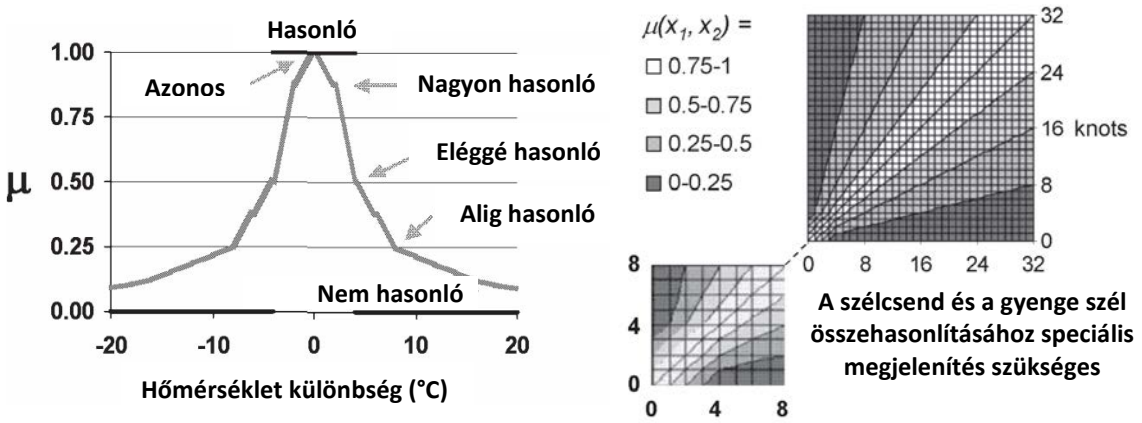
prediktorokat a [−1; 1] intervallumba transzformálta, valamint a prediktandusz természetes alapú logaritmusos értékei közötti hibát minimalizálta, a közvetlen értékekre vonatkozó hibák használata helyett. Ez utóbbira a hatékonyabb gyakorlati alkalmazhatóság érdekében került sor, ugyanis ennek köszönhetően az alacsonyabb látástávolság értékek pontosabb előrejelzése így nagyobb prioritást élvez. A módszert a különböző megközelítéseknek megfelelő prediktorokra és prediktorszámra, valamint különböző látástávolság kategóriákra alkalmazta. Az eredmények tekintetében a prediktorok számának csökkenése nem járt szignifikáns változással, ami feltehetőleg az alkalmazott változók kölcsönös függőségére vezethető vissza. A szerző szerint a verifikációs eredmények egyértelműen alátámasztották a módszer ultrarövid távú gyakorlati alkalmazhatóságát és további fejlesztésének lehetőségét.

Fricke és Kardos cikke már a tényleges gyakorlati alkalmazás megvalósításának tudományos leírását rögzíti [89]. Munkájuk céljaként egy neurális hálón alapuló és az előrejelzői gyakorlatba egyszerűen integrálható, kétórás látástávolság előrejelző módszer kialakítását jelölték meg, ami bemeneti adatokként a műszeresen mért meteorológia látástávolság (MOR) adatokat használja fel. A módszer alkalmazása során nem csak az aktuális mérési adatokat, hanem az azt megelőző rövid időszak korábbi adatait is felhasználták a tanuló adatbázis részeként. A vizsgálatokat eltérő prediktorszámra és rétegszámra is elvégezték. A verifikációs eredmények alapján a kategorikus előrejelzési formát találták a rendszer továbbfejlesztése szempontjából optimális prediktandusznak és a módszer finomhangolását követően gyakorlati alkalmazásra érdemesnek.

A neurális hálók alkalmazása mellett a másik már említett újszerű megközelítés a fuzzy logika statisztikai eljárásokban való használata volt. A fuzzy logika vagy fuzzy halmazok fogalmát Zadeh alkotta meg 1965-ös munkájában [90]. Ennek a lényege a hagyományos halmazelméleti megközelítéssel szemben, ahol egy elem vagy az adott halmazba tartozik vagy nem, a fuzzy halmazok esetében egy 0 és 1 közötti valós szám adja meg a halmazba tartozás értékét. Nyilvánvalóan ez a hagyományos halmazok kérdéskörét is lefedi: a 0 a halmazon kívüliséget, az 1 pedig a halmaz elemei közé tartozást jelenti. A fuzzy logika jelentősége abban áll, hogy ezzel a megközelítéssel olyan nem egyértelműen meghatározható dolgok is matematikailag leírhatóvá válnak, amelyek a hagyományos logika eszköztárával nehezen vagy egyáltalán nem kezelhetők.

Az első olyan publikációk, amelyek a fuzzy logika eszköztárát alkalmazták valamilyen látástávolság előrejelzési probléma megoldása során, mind Hansen illetve Riordan kutatásaihoz

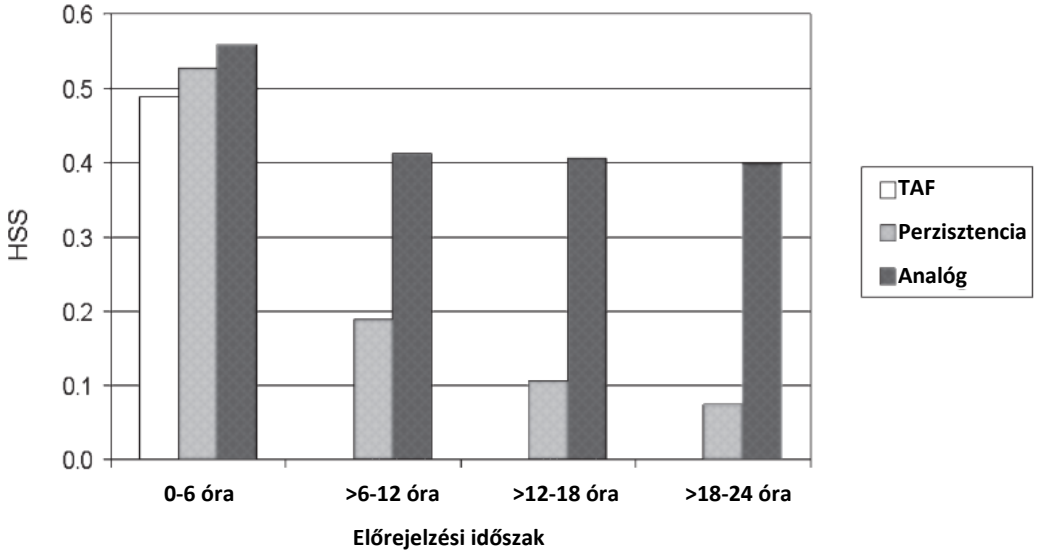
kapcsolódnak [91][92]. Ezek az egymásra épülő munkák Hansen 2007-es cikkében érnek komplex egésszé a gyakorlati alkalmazásra kész módszertan és az igazolt eredmények bemutatásával [93]. Ebben a hasonlósági, analógiás elven alapuló eljárás bemutatása előtt a szerző áttekinti a fentiekben is taglalt módszertani megközelítéseket, melyek eredményei a kétezres évek előtt a legtöbb esetben a viszonyítási alapként használt perzisztencia prognózis szintjét sem érték el a repülések meteorológiai támogatása során kiemelt fontosságú rövid előrejelzési időtávon. Emellett számos eljárás térbeli vagy időbeli felbontása nem teszi lehetővé alkalmazását a kérdéses területen. Hansen analógiás előrejelző modelljének lényege a következő: az adott időjárási szituációhoz egy historikus adatbázisban hasonló eseteket keres, amelyek alapján adott paraméter jövőbeli értékeire becslést fogalmaz meg. Az adott időjárási szituáció a METAR táviratok adataiból é/s a GEM globális előrejelző modell modell output statisztikáiból áll össze, mégpedig oly módon, hogy az aktuális időpont és az azt megelőző 6 óra adatait a megfigyelések, a rákövetkező 24 óra adatait pedig az előrejelzési adatok szolgáltatják. Ez utóbbiak esetében a prediktanduszok eredményei nem kerülnek figyelembe vételre az analógiás eljárásban.



21. ábra: Példa egy egyszerűbb (hőmérséklet) és egy összetettebb (szélsebesség) tagsági függvény grafikus értelmezésére. [94]

A METAR adatokból származtatott historikus adatbázisban a fuzzy logika alkalmazásával előállított úgynevezett tagsági függvények használatával történik meg a leghasonlóbb időjárási szituációk kiválasztása (21. ábra). Az egyes paraméterek egyedi hasonlóságai alapján a teljes vizsgált időjárási szituációra előállítható a hasonlóság mértéke. Erre több megközelítés is adódik, melyek közül Hansen az összesített hasonlóság mértékére az összes egyedi hasonlóságok minimális értékét határozta meg. Ebben két tényező játszott fontos szerepet: egyrészt a hasonló szituációk keresése szempontjából ez egy rendkívül gyors eljárásnak

ígérkezett, másrészt ez garantálta, hogy a hasonló szituáció összes egyedi változója legalább olyan mértékű hasonlóságot mutat. A leghasonlóbb szituációk kiválasztása után azok segítségével az előrejelzési időszak teljes 24 órás hosszára összeállíthatóvá vált a kívánt prognózis. Ehhez a determinisztikus predikcióhoz az adott előrejelzési időlépcsőhöz tartozó látástávolság érték 30. percentilisét választották ki. A korábbi verzióknál alkalmazott medián értékről a kedvezőbb verifikációs eredmények hatására tértek át a 30. percentilisre. A cikk végén Hansen meggyőző verifikációs eredményeket mutat be, ahol az analóg előrejelzés mellett a TAF táviratokból kinyert előrejelzések és a perzisztencia prognózis Heidke Skill Score (HSS) adatait is összeveti (22. ábra).



22. ábra: A 190 kanadai repülőtérre vonatkozó kategorikus előrejelzések összevont verifikációs eredményei. Az IFR kategória határa 1000' felhőalap és 3 mérföld látástávolság. [94]

Hicks és társai egy az előzőhöz rendkívül hasonló, az Egyesült Államok több száz repülőterén alkalmazott analógiás előrejelző rendszert mutatnak be munkájukban [94]. A módszertani leírás azonban Hansen cikkéhez képest túlzottan felületes, csak a verifikációs eredmények részletezése bír nagyobb hozzáadott értékkel. Az eljárás hatékonyságát az amerikai repülőtereken alkalmazott összes látástávolság és felhőalap előrejelzési módszerrel (beleértve a TAF táviratot és a perzisztencia prognózist is) összevetik, az előbbiekben megadott IFR kategóriákra, de változónkénti bontásban. A kétéves verifikációs időszak adatai az előrejelzési időszakra átlagolva azt mutatják, hogy az analóg eljárás mindegyik egyéb módszernél hatékonyabbnak bizonyult.

A látástávolság szakirodalmi vonatkozásainak történeti és metodikai áttekintésének a végére nem véletlenül kerültek a fuzzy logikát alkalmazó analógiás eljárások. Értekezésemben központi szerep jut ezek egy továbbfejlesztett változatának, amin érdemi tudományos eredményeim alapulnak. Ennek a részletes bemutatása a tudományos kutatáshoz kapcsolódó publikációimmal együtt egy későbbi fejezet során fog megtörténni.

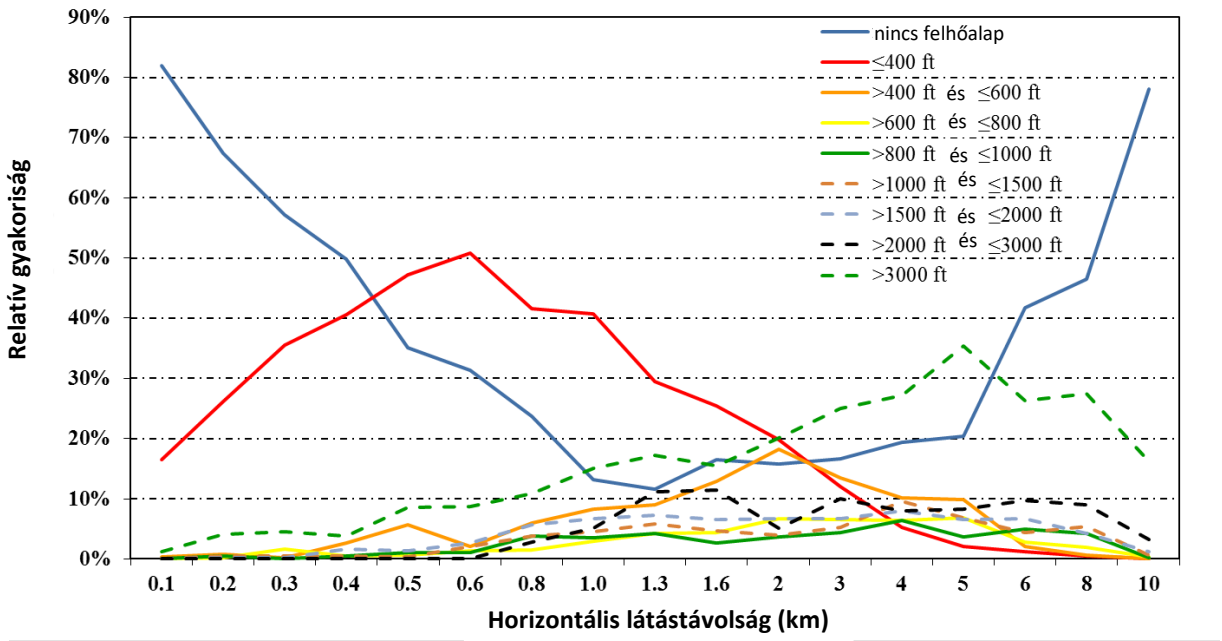
II.4. Egyéb repülésre veszélyes jelenségek

Ahogyan az előző fejezetekben rámutattam, a meteorológiai paraméterek közül talán a látástávolság az, amelyik a legnagyobb hatással bír a repülésre. Ez a látástávolság természetéből adódóan nyilvánvalóan nem a repülőeszközre ható fizikai hatásként nyilvánul meg, mint ahogyan például a turbulencia vagy a szél esetén, hanem a helyzetismereten keresztül okozhat kellemetlen vagy káros következményeket. Amint látható, központi szerepe ellenére nem az egyetlen hatással bíró tényező a repülésben, mellette még számos időjárási változó befolyásolhatja a repülések biztonságos és gazdaságos végrehajtását. Hogy pontosan melyek ezek, elég áttekinteni a különböző repülésmeteorológiai előrejelzések tartalmi elemeit. A TAF táviratokban például a látástávolság mellett kiemelt szerep jut a felhőzetre és a szélre vonatkozó információknak, valamint a repülésre veszélyes időjárási jelenségeknek. A vonatkozó előírások lehetővé teszik [18] ezekben a táviratokban a jegesedéshez és a turbulenciához kapcsolódó előrejelzési csoportok közzétételét is, de ezek használata a felszín közeli légrétegre vonatkozó prognózisokban nem általános, gyakorlati alkalmazása elenyésző arányú. Ezzel szemben ezek a jelenségek az alacsony és magasszintű szignifikáns térképeken, vagy veszélyjelző táviratokban (GAMET, SIGMET, AIRMET) a legfontosabb előrejelzési paraméterekként jelennek meg a felhőzet és a szél mellett. A veszélyes időjárási jelenségek közül a teljes troposzférában fontos hatással bíró zivatartevékenység érdemel kiemelt figyelmet, hiszen nem csupán légköri elektromos tevékenységgel jár, hanem a zivatart kísérő egyéb jelenségek útján a repülések céljára igénybevett légköri réteg teljes vertikumában kritikus veszélyforrást jelenthet.

Ennek a rövid fejezetnek nem csak az a célja, hogy a látástávolságot mintegy kontextusba helyezve, bemutassa a repülésre veszélyes időjárási jelenségek előrejelzésével kapcsolatos kutatási eredményeket, hanem az is, hogy a fuzzy logikán alapuló analógiás előrejelzések egyéb meteorológiai változókon való alkalmazhatóságának kérdését is fókuszba állítva megmutassa jelen tudományos munka lehetséges folytatásának irányait. Az ezzel kapcsolatos kísérleti kutatási eredmények alapján ennek valós realitása is lehet, főleg a kevésbé dinamikus paraméterek esetén.

A látástávolsághoz mind fontosságban, mind pedig éghajlati statisztikai szempontból a legközelebb álló paraméter a felhőalap magasság, amely „az égboltnak több mint felét borító, 20 000 láb (6000 m) alatti legalacsonyabb felhőréteg alapjának föld, vagy víz feletti magassága” [95]. Előbbit mi sem bizonyítja jobban, mint a látástávolság előrejelzéséről szóló fejezet számos

hivatkozása [16][17][29][31][32][39][40][41] melyekben a repülésmeteorológia hajnalától kezdődően a felhőzet fontossága a látástávolságéval közel egy szinten van kezelve. A másik hasonlósági szempontra a 23. ábra mutat példát. A felszínközeli légréteg nedvességtartalma és hőmérsékleti viszonyai – ahogyan az előző fejezetben is láthattuk, – fontos szerepet játszanak a látástávolság illetve különösen az alacsonyszintű felhőzet felhőalap magasságának alakításában. Ez a közös függőség fedezhető fel a legalacsonyabb felhőlap magasságot reprezentáló kategóriák markánsan kirajzolódó szélsőértékeiben.



23. ábra: A felhőalap magasság kategóriák relatív gyakoriságai a látástávolság függvényében a kecskeméti repülőtér 2005-2012 közötti METAR adatai alapján. [96].

A 120 méteres vagy az alatti felhőalap kategóriának például 600-800 méter közötti látástávolság esetén van maximális gyakorisága. A feldolgozott adatokból az is kiderült, hogy 10 km-es látástávolság esetén nem fordult elő ilyen alacsony felhőalap magasság a vizsgált időszakban.

A repüléshez és a légiforgalmi irányításhoz kapcsolódó időjárási határértékek közül a legtöbb a repülés kezdetétől a látástávolsághoz és a felhőalap magassághoz kapcsolódik a már korábban említett okok miatt. Ezen túlmenően mindkét paraméter hátterében komplex fizikai, mikrofizikai folyamatok állnak, megnehezítve előrejelezhetőségüket és ezzel nagyrészt hasonlóvá téve az alkalmazható prognosztikai eszközök tárházát. Emiatt a fent bemutatott szakirodalmi példák napjainkig folytathatók a látástávolságot és a felhőalap magasságot együttesen kutató publikációkkal. A felhőalappal kapcsolatban talán annyival van nehezebb dolguk a témában operáló kutatóknak, hogy míg a látástávolság esetében első közelítésben elég egy magassági szint (a felszín) várható viszonyainak pontos ismerete, addig a felhőalap

előrejelzénél a definíciójának megfelelő legalacsonyabb szint meghatározása a feladat. A függőleges rétegek elengedhetetlen használata pedig mind a statisztikai alapú, mind pedig a determinisztikus vagy valószínűségi numerikus modellek előrejelzési feladatait megnehezíti [69][75][78][81][82]. Előbbit a statisztikai eljárásban alkalmazandó adatok hiánya, utóbbit pedig a modell vertikális felbontása és a felhőalapot előállító algoritmus pontatlansága [78] akadályozza. Ennek köszönhetően a numerikus modellek általános megjelenésével sok kutató a modell output statisztikák alkalmazásában látta a probléma megoldását [57][58][59][60][61]. Az eljárások pontossága azonban még napjainkban sem elégíti ki teljesen a felhasználói igényeket, bár egyéb statisztikai eljárásokkal kombináltan már lényegesen jobb verifikációs eredmények érhetők el, mint a korábban említett munkákban, ahogyan azt Rudack és Ghirardelli publikációja is igazolja [97].

Az utóbbi évtized kutatás-fejlesztési irányait a modell output statisztikákon alapuló eljárások mellett alapvetően két eltérő metódus jellemezte. Egyrészt a numerikus modelleket vagy azok modell kimeneteinek utófeldolgozó eljárásait próbálták a témával foglalkozó kutatók fejleszteni, másrészt ezeket a kimeneteket nélkülöző statisztikai módszereket alkalmaztak a jobb eredmények elérése érdekében. Zhou és társai például több numerikus modell eredményein alapuló hatékony probabilisztikus előrejelző rendszert fejlesztettek [98], míg Benjamin és társai fejlett mikrofizikai sémák alkalmazásában látták a pontos felhőalap előrejelzések kulcsát a közelmúltban [99]. Hazai viszonylatban Bottyán és társai cikke érdemel említést, amelyben egy komplex rendszer részeként az alkalmazott numerikus modell parametrizációs sémáinak a repülésmeteorológiai célokra optimalizált együttesével tesznek kísérletet a jobb felhőalap előrejelzések előállítására [100].

A tisztán statisztikai alapú eljárás Hansen korábban már bemutatott, analógiás elven alapuló előrejelzési módszere [93], amely a látástávolság mellett a felhőalap vonatkozásában is meggyőző verifikációs eredményeket mutatott. A részletes verifikációs adatok mellett egy esettanulmánnyal is szemlélteti a módszer hatékonyságát. A 24. ábrán a montreali repülőtér észlelt (folytonos vonal) és előrejelzett (szaggatott vonal) felhőalap magasságai láthatók a vizsgált időszakban. A függőleges tengelyen feltüntetett értékek lépésközei a repülőtéren alkalmazott felhőalap magassági határértékekhez igazodnak, azaz a vízszintes szaggatott vonalak az alkalmazott repülési eljárások kategória határait jelölik ki, így szükségszerűen nem is lineáris skálázásúak. Ennek tükrében a bemutatott esettanulmány tovább emeli az eljárás értékét, ugyanis viszonylag nagy pontossággal jelzi előre a kategória-váltásokat és a kategória eltérés is maximum ±1.

24. ábra: A felhőalap magasság (függőleges tengely – 100' egységekben) észlelt (folytonos vonal) és előrejelzett (szaggatott vonal) a montreali repülőtéren 2005. december 2-3 között (vízszintes tengely). [93].

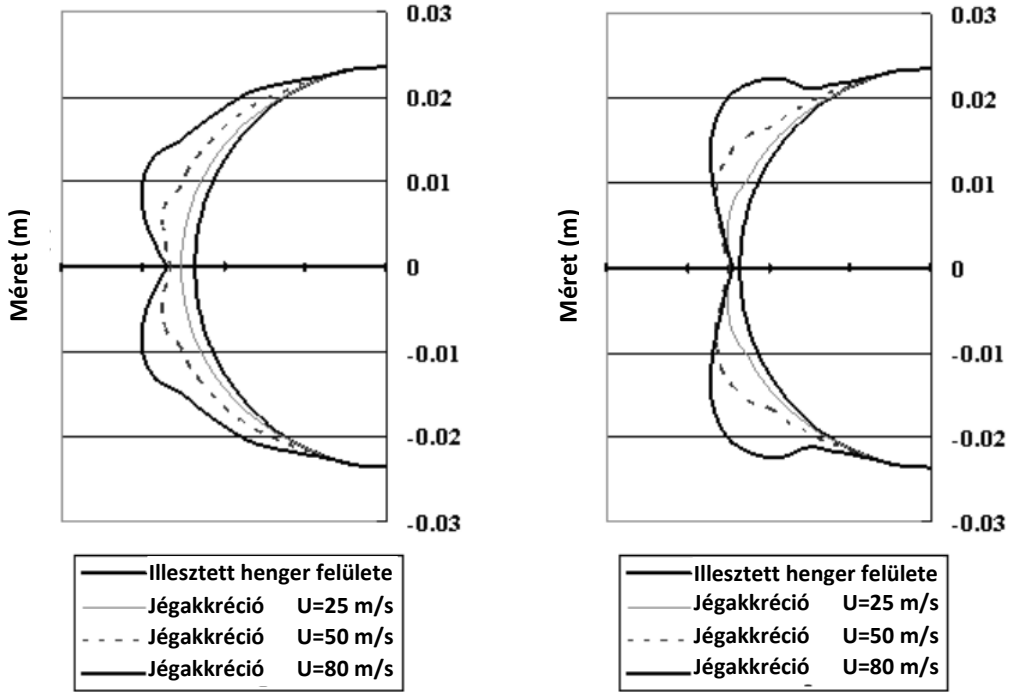
A felhőalap előrejelzésben használt legújabb, legmodernebb megközelítések – a látásátávolsághoz hasonlóan – a neurális hálók alkalmazásához kötődnek. Marzban és társai a látástávolság előrejelzés szakirodalmi hátterénél már bemutatott publikációjukban [86] a látástávolságnál alkalmazott módszert a felhőalap vonatkozásában is hasznosították. A felhőalap magasságra vonatkozó verifikációs eredmények is bizonyították a módszer működőképességét és használhatóságát. Hazai vonatkozásban talán az első ilyen témájú munka Várkonyi és Kardos közleménye [101], amelyben korlátos tartományú modell kimeneti adatait és valós mérési, észlelési információként a helyi felhőalapmérő által szolgáltatott értékeket és a METAR táviratok felhőzeti csoportjában megadott adatokat használták fel. A neurális háló betanításánál többféle tanulási algoritmust és aktivációs függvényt teszteltek, melyek kombinációiból választották ki az optimális struktúrát. Az előzetesen meghatározott felhőzeti kategóriákra elvégzett tesztek eredményei azt mutatták, hogy az optimális kombinációnak éven belüli függése van, azaz célszerű a neurális háló működését ehhez igazítani. A szerzők véleménye alapján ezen a területen számos ígéretes kutatási irány mutatkozik.

A jegesedés és a turbulencia előrejelzése jelentősen eltér a fentiekben bemutatott paraméterek (látástávolság, felhőalap) prognózisától. Az alapvető különbség abban keresendő, hogy míg az előbbi változók esetében a felhasználótól teljesen független módon, kizárólag a meteorológiai tényezőkre támaszkodva elkészíthető az előrejelzés, addig a jegesedés és turbulencia előrejelzése során nem hagyható figyelmen kívül az említett paramétereknek a

repülőeszközöktől való függése. Ez a függőség abban nyilvánul meg, hogy az említett jelenségek repülőeszközre gyakorolt hatása nagyban függ például a jegesedés esetében a repülőeszköz sebességétől, profilgeometriájától vagy akár a hőmérséklettől (környezet és repülőeszköz) [102][103], a turbulenciánál pedig a légijármű karakterisztikus méretétől. Ennek megfelelően az előrejelzéssel foglalkozó szakemberek számára a feladat kettős, egyrészt egy általános megközelítésű, objektív meteorológiai információkat tartalmazó előrejelzés elkészítése, majd ennek az előrejelzésnek a felhasználói igényekhez igazított, feladatraszabott átalakítása, amely már figyelembe veszi a fent említett tényezőket. Ráadásul mind a jegesedés, mind pedig a turbulencia esetében egészen korán, az 1940-50-es években megjelentek azok az megoldások, eljárások [102], amelyek megelőzni, megszüntetni, mérsékelni vagy éppen elviselhetővé tudták tenni a negatív hatásokat. A turbulencia esetében ez a sárkányszerkezet megfelelő masszivitását, teherbírását jelentette, míg a jegesedésnél a jég akkréciójának megelőzését szolgáló kémiai vagy fizikai eljárások proaktív alkalmazását és a már lerakódott jégréteg esetében annak a mechanikai vagy termikus alapú reaktív eltávolítását jelentette [104]. Természetesen mindkét paraméter esetében hatékony és egyben olcsó megoldásnak számít a predikción alpuló proaktív megközelítés, azaz a potenciális veszélyt hordozó zónák (ónos csapadék, téli frontális felhőzet, konvektív felhőzet, jet streamek közelsége, stb.) elkerülése a meteorológiai előrejelzésük alapján. Sajnos azonban ez utóbbira még tökéletes meteorológiai prognózisok esetén sincs mindig lehetőség például léginavigációs vagy gazdaságossági okok miatt, de a veszélyes területek horizontális és vertikális kiterjedése is objektív módon gátolhatja elkerülésüket [102]. A repülések gyakran előre rögzített útvonalon vagy légtérben zajlanak, amennyiban a jegesedési zóna kiterjedése nem teszi lehetővé a repülési feladat szabályszerű módosítását, akkor a veszélyt hordozó terület elkerülése nem lehetséges. Adott időjárási helyzetben, például egy téli melegfronti felhőzet esetén a jegesedési zóna kiterjedése mind horizontális, mind pedig vertikális irányban ellehetetlenítheti az elkerülő manővereket.

A jegesedés előrejelzése rendkívül bonyolult feladat, tekintve, hogy az előrejelzési egyenletrendszer általános megoldása mellett számos, jelen keretek között nem részletezett mikrofizikai, felhőfizikai vagy akár a repülőgép-környezet rendszerre vonatkozó termodinamikai megfontolást kell figyelembe venni [102]. Ráadásul egy operatív előrejelző módszer alkalmazása esetén is rendkívül nehéz a verifikáció. Ez annak köszönhető, hogy nincs megfelelő mennyiségű és minőségű észlelési adat az eredmények validálására [105]. Ennek ellenére számos eljárás került kidolgozásra a jegesedési potenciál előrejelzésére. Ezek között a legegyszerűbb módszerektől kezdve, melyek közül többet is bemutat Wantuch és társai

valamint Cornell és társai munkája [105][106], az összetett, mikrofizikai parametrizációt alkalmazó numerikus prognosztikai fejlesztésekig [107] szinte minden módszertani megközelítés megtalálható. Lozowski és társai munkáiban [108][109] és hazai viszonylatban, Bottyán publikációjában [110] már a tényleges jégakkréció modellezésén van a fő hangsúly (25. ábra).



25. ábra: Az eltérő légköri feltételek és a különböző áramlási sebesség hatására kialakuló jégakkréció formája és mérete a szárnyprofil mentén [110].

Berstein és társai a nagytérségű szinoptikus folyamatok és a pilóták által szolgáltatott jelentésekben található információk alapján azonosított jegesedési szituációk közötti kapcsolatot tárták fel részletes elemzésük keretében [111]. Ehhez hasonló publikációt adott közre magyar nyelven Bottyán és Tuba [112], akik a Péczely-féle makroszinoptikus típusok és a jegesedési esetek statisztikai összefüggéseit tanulmányozták. Tafferner és társai az előbbi két munkához hasonló megközelítéssel, a feltárt összefüggésekre építve már komplex előrejelző módszertant mutatnak be cikkükben [113]. A nagytérségű szinoptikus szituációk figyelembe vétele mellett numerikus modell kimenteken alapuló algoritmust, felszíni (SYNOP) és magassági (TEMP) észlelési adatokat valamint távérzékelési információkat (radar, műhold) is felhasználtak az előrejelző eljárásban, aminek validációját PIREP jelentések alapján kívánják végrehajtani.

A légköri örvények méretskálája a milliméteres nagyságrendű mechanikus, súrlódási örvényektől a makroskála több ezer kilométeres jelenségeiig, a mérsékeltövi ciklonokig,

anticiklonokig terjed. Ezek közül a turbulens örvények hatását, azaz a turbulenciát a repülésben a repülőeszközök karakterisztikus méretével azonos nagyságrendbe eső örvények esetében tapasztalhatjuk. Ez egyben azt is jelenti, hogy a repülési turbulenciaként megtapasztalt jelenség a 10-100 méteres jellemző méretű mikroskálájú örvényekhez kötődik [114][121]. Ez a tény nagyban befolyásolja az előrejelezhetőség kérdését is, ugyanis ez a mérettartomány még messze az operatív előrejelzésben használt numerikus modellek felbontása alatt található. A légköri energiakaszkádnak köszönhetően azonban az jól modellezhető, hogy a nagyobb térségű folyamatokból mennyi energia jut el a kérdéses méretű örvényekig [115][116][117]. Megfelelő modell parametrizáció alkalmazásával [118][119] így viszonylag jól előrejelezhetővé válik a jelenség, de az igazán pontos előrejelzéseket még számos tényező nehezítheti [120][121]. Ráadásul a kidolgozott előrejelző eljárások értékelése, verifikációja sem egyszerű feladat. Ennek oka nem a verifikációs eljárások hiányosságaiban vagy a kiértékelés kidolgozatlan módszertanában keresendő, hanem egyszerűen abban, hogy nem áll/nem állt rendelkezésre megfelelő minőségű és mennyiségű mérési, észlelési információ az ellenőrzés végrehajtásához. A turbulencia megfigyelésének kezdeti időszakában kizárólag a repülőgép pilótáinak szubjektív percepcióján alapuló észlelések eredményei álltak rendelkezésre a jelenséget mérő objektív mérőszközök hiányában [122]. Természetesen erre napjainkban már számos különböző műszeres mérési eljárás alkalmazható [122], ugyanakkor a légkör teljes háromdimenziós feltérképezése továbbra sem megoldott, tekintettel arra, hogy kísérleti megoldásoktól eltekintve [123], a mérőeszközök döntő többsége továbbra is a kereskedelmi repülőgépeken működik, azaz a le- és felszállási szakaszon kívül csak az utazómagasságból (tipikusan a troposzféra felső harmada) szállít információkat.

Bár a szél előrejelzése nem sorolható a repülésmeteorológia legnagyobb aktuális problémáinak körébe, ettől függetlenül a szél a repülések biztonságos végrehajtását legjobban befolyásoló tényezők közé tartozik. Ebben több faktor is fontos szerepet játszik: egyrészt az a tény, hogy a szél vektormennyiség, azaz a sebessége mellett az iránya is meghatározza. Másrészt mindenképpen figyelembe veendő, hogy a repülést magát is a levegő alkalmas szárnyprofil körüli áramlása teszi lehetővé. Így a levegő horizontális áramlásaként definiált szél érdemi hatást tud gyakorolni a repülőeszköz körüli áramlási viszonyokra, kedvezőtlenül befolyásolva ezzel a repülőeszköz irányíthatóságát. Ennek kiemelt szerepe van a repülés kezdeti és befejező fázisában, azaz a fel- és leszállás folyamán, amikor az alacsony felszín feletti magasság és a viszonylag kicsi sebesség miatt a repülőeszköz különösen érzékeny a környezeti paramérek értékeire. A szelet alapvetően nagytérségű folyamatok alakítják, de jelentős szerepe van az

olyan lokális tényezőknek is, mint a domborzat, a felszínborítottság vagy akár az észlelési hely közelében található természetes vagy mesterséges akadályok. Ez utóbbiaknak kiemelt szerepe van a szél lökésességének, turbulens voltának meghatározásában, amely a szélirány és a szélsebesség mellett a gyakorlatban a harmadik jellemzője a szélnek a meteorológiai jelentésekben és előrejelzésekben.

A szél előrejelzésének témájával foglalkozó kutatók már az 1970-es években felismerték, hogy a fent is említett lokális tényezők hatására a felszíni szélre vonatkozó numerikus modell kimenetek pontosítást igényelnek. Erre az adott időszakban már népszerű eljárás, a modell output statisztika alkalmazása mutatkozott a legalkalmasabbnak. Számos publikáció született a témában [57][124][125], amelyek a szélnek a numerikus modell által előrejelzett és a mért *u* és *v* komponensei közötti statisztikai illesztés alapján módosítják az eredeti prognózist, anélkül, hogy a numerikus modell által objektív okok miatt figyelmen kívül hagyott lokális befolyásoló tényezők számszerű hatását ismernék. Az alkalmazott módszer sikerességét mi sem támasztja alá jobban, hogy a használt statisztikai eljárásoktól érdemben eltérő metódusokat napjainkban sem használnak [126][127][128]. A szelet lokális szinten befolyásoló tényezők méretskálája részben mindig a numerikus modellek horizontális felbontása alá esik, ezért a nagytérségű áramlásokat módosító helyspecifikus hatások figyelembe vételénél kísérleti jelleggel érdemes lenne az analógiás előrejelzések alkalmazhatóságát is megvizsgálni.

A cumulonimbus felhőben lezajló töltésszétválasztó folyamatok hatására kialakuló légköri elektromos tevékenységet zivatarnak nevezzük. Észlelési szempontból ez a csapadékhullástól független jelenség, azaz csapadék nélkül, csak a villámlás okozta mennydörgést hallva is zivatart észlelünk. A zivatar rendkívül összetett légköri jelenség, amelyet ebből kifolyólag számos, a repülésre kifejezetten veszélyes kísérőjelenség kísér a villámlás mellett. A zivatarhoz kapcsolódó intenzív csapadékhullás vagy erős kifutószél által felkavart litometeorok miatt alacsony látástávolság és alacsony vertikális látás, felhőalap alakulhat ki. A cumulonimbus felhőben és környezetében rendkívül erős vertikális áramlások alakulnak ki, amelyek erős szélnyírással és turbulenciával párosulhatnak. A felhőt a nagy túlhűlt víztartalom miatt extrém jegesedés és a jégszemek ismétlődő vertikális útja okán nagy szemű jég kísérheti. Különös veszélyessége miatt a repülések meteorológiai biztosítása számára kiemelt fontossággal rendelkezik a zivatar előrejelzése. Sajnos a légköri méretskálákon elfoglalt helye nagyban meghatározza előrejelezhetőségének lehetőségeit is. A zivatarokat a mezoskálájú légköri folyamatok közé soroljuk karakterisztikus méretük és életartamuk alapján, de kísérőjelenségeik gyakran még alcsonyabb méretskálán értelmezhetők. Figyelembe véve, hogy a zivatarok léte

éppen ellentétes a hidrosztatikus egyensúllyal, könnyen belátható, hogy pontos numerikus előrejelzésükhöz nem-hidrosztatikus, megfelelő horizontális felbontású korlátos tartományú modellekre van szükség. A pontos előrejelzés feltétele a zivatart létrehozó konvekció megfelelő prognózisa, ami adott esetben szintén a modell felbontása alatti tényezőkre vezethető vissza.

A konvekciót kiváltó tényezők közül, az alkalmas magassági rétegződés vagy a frontális, esetleg nagyskálájú orografikus kényszerkonvekció azok, amelyek a hidrosztatikus modellekben is megjelenhetnek. Ez, valamint a nedvességi és a zivatarok fejlődését befolyásoló szélviszonyok ismerete adta meg a lehetőségét, hogy már a numerikus modellezés megjelenése előtt egyfajta zivatarpotenciál előrejelzésére. Ennek egyik úttörője Showalter volt, aki a később róla elnevezett stabilitási index megalkotásával [129] egy hatékony prognosztikai eszközt adott az operatív előrejelők kezébe. Ahogyan Peppler összefoglaló munkájában is láthatjuk [130], az első stabilitási indexet számos új és módosított változat követte, amelyek népszerűsége ma is töretlen egyszerűségüknek, könnyű áttekinthetőségüknek köszönhetően. Ugyanakkor Doswell azt is megmutatta, hogy a konvektív folyamatok előrejelzése az egyszerű összegző mennyiségeken túl rendkívül összetett és alapos analízist igényel az előrejelzőktől [131]. Nem véletlen, hogy napjainkban is komoly kihívást jelent a konvektív folyamatok pontos helyének és idejének prognózisa, annak ellenére, hogy az ultrarövidtávú előrejelzések már a modern távérzékelési eszközök produktumain alapulnak [132]. Ezzel együtt a mezoskálájú, nem-hidrosztatikus modellek előrejelzései ma már megkerülhetetlen eszközei a konvektív folyamatok előrejelzésének [133][134].

Jelen fejezet alapján látható, hogy a repülésre veszélyes jelenségekkel kapcsolatos előrejelző eljárások hatékonysága, pontossága szinte minden esetben hagy kívánnivalót maga után. Nyilvánvalóan ezt az az idealista szemlélet is mondatja velem, amely szerint a repülések meteorológiai kiszolgálása minőségének növelése olyan elvárt feladat, ami magával hozza a műveleti hatékonyság és a repülésbiztonság szintjének növekedését is. Ennek tükrében az analógiás elven alapuló eljárás alkalmazhatóságát a látástávolságot befolyásoló jelenségeken kívül más, a repülésre közvetlen vagy közvetett módon veszélyt jelentő időjárási változókra, paraméterekre is ki kell terjeszteni. A fent felsoroltak közül egyedül a felhőalap vonatkozásában vannak történeti előzményei a hasonlósági elven alapuló előrejelzéseknek. Figyelembe véve, a fentiekben bemutatott megfontolásokat és a repülésklimatológiai analógiákat, ennek a paraméternek a tekintetében reális esély látszik a módszer hatékony alkalmazására. Nem mondható el azonban ugyanez egyértelműen a többi vizsgált jelenség esetén. Ez alapvetően két fontos ok következménye. Az egyik ok a megfelelő adatbázisok hiánya, amely az adott

változók, jelenségek objektív detektálásának hiányosságára vezethető vissza. A jegesedés és a turbulencia észlelése például térben és időben is rendezetlen módon eseti jelleggel történik. Könnyű belátni, hogy az analóg időjárási szituációk keresése ilyen észlelési adatokkal, alkalmas adatbázisok nélkül nem megvalósítható. A másik fontos ok, a vizsgált jelenségek dinamikus voltában keresendő. A gyors változások analógiás eljárással való lekövetése ugyanis megkövetelné a lokális információkat tartalmazó adatbázis helyett a tágabb környezetre vonatkozó adatok pontos ismeretét is. Egy gyors mozgású zivatar esetén például a pontos prognózis feltétele, hogy az előrejelzési helytől még távol lévő zivatarcellák is lokalizálhatók legyenek az áthelyeződést befolyásoló magassági áramlásokkal és a cella fejlődését tartalmazó információkkal egyetemben.

A felhőalap magasság mellett talán a széllökés előrejelzés esetén lehet realitása az analógiás módszer alkalmazásának, tekintettel arra, hogy ennek a paraméternek az esetében a lokális befolyásoló tényezők szerepe kiemelkedően magas.

II.5. Következtetések

Ebben a fejezetben vizsgált témakörök tudományos kutatási eredményeit áttekintő jelleggel, a főbb eredmények és a fejlődés tudománytörténeti lépéseinek bemutatásával igyekeztem szemléltetni. Ennek érdekében először a látástávolság előrejelzésének problémakörét magának a látástávolságnak, mint meteorológiai változónak a fizikai értelmezésével közelítettem meg. Itt rámutattam a fizikai háttér összetettségére, ami még napjainkban is fontos akadályozó szerepet játszik a látástávolságot befolyásoló fizikai és kémiai folyamatok pontos modellezésében. Ezzel párhuzamosan tisztáztam a látástávolsághoz kötődő fogalmakat és kifejezéseket, amelyek a meteorológiai támogatást szabályozó dokumentumokban is megjelennek.

A látástávolság előrejelzésével kapcsolatos szakirodalmi vonatkozásokat a repülésmeteorológia hőskorától kezdődően kronológiai sorrendben tekintettem át. Ahogyan a fejezet bevezetésében is jeleztem az itt megadott leírásoknak nem volt célja a teljesség igénye, sokkal inkább a főbb eredmények és a fejlődés tudománytörténeti lépéseinek bemutatására törekedtem. Ezzel azt a célt szolgálva, ami a korábbi fejezetekben a tudományos probléma megfogalmazását, a későbbiekben pedig az alkalmazott módszertan leírását segítette. Megállapítottam, hogy a látástávolság előrejelzése már a repülésmeteorológiai tudományos kutatások kezdetétől központi szerepet élvezett. Ennek ellenére az alkalmazott eljárások csak nagyon lassú fejlődésen mentek keresztül, egy-egy meghatározóbb előrelépéshez gyakran évtizedes távlatokra volt szükség. Ráadásul a mai modern eljárások és előrejelző megoldások mellett sem lehetünk tökéletesen elégedettek a szakterület vívmányaival. Annyi azonban nagy biztonsággal megállapítható, hogy napjaink leghatékonyabb látástávolság előrejelző eljárásai kivétel nélkül statisztikai alapú módszertanra épülnek. Ez a tény fontos szerepet játszott az értekezésemben kifejtett módszertani megközelítés kiválasztása és fejlesztési irányainak kijelölése során egyaránt.

Az utolsó alfejezetben a repülésre veszélyes egyéb paraméterekkel kapcsolatos szakirodalmi vonatkozásokat is bemutattam áttekintő jelleggel, aminek a bemutatás mellett az is volt a célja, hogy a fuzzy logikán alapuló analógiás előrejelzések egyéb meteorológiai változókon való alkalmazhatóságának kérdését is megvizsgálja. Ennek eredményeként arra jutottam, hogy a felhőalap magasság mellett a széllökés előrejelzés esetén lehet realitása az analógiás módszer alkalmazásának, tekintettel arra, hogy ennek a paraméternek az esetében a lokális befolyásoló tényezők szerepe kiemelkedően magas.

III. A REPÜLÉSMETEOROLÓGIA REPÜLÉSBIZTONSÁGI ASPEKTUSAI

III.1. Bevezetés

A repüléssel foglalkozó szakemberek a repülést veszélyes üzemként kezelve a kezdetektől kiemelt figyelemmel fordultak a repülések biztonságos végrehajtását befolyásoló veszélyforrások felé. Ez segítette azt, hogy a repülési valamint a hozzá tartozó üzemeltetési, technológiai, kiszolgálási és biztonsági eljárások, előírások mélyen kidolgozottakká váltak és fejlődésük ma is folyamatos. Ehhez a kontinuitáshoz nyilvánvalóan szükség volt arra, hogy a jelentkező biztonsági problémák marginalizálása helyett, azok tényszerű, részletekbe menő kivizsgálása és értékelése történjen meg, majd az így szerzett tapasztalatokat a megelőzés érdekében kamatoztassák. Mindezekhez a pontosan szabályozott és globálisan harmonizált jogszabályi, szabályozási háttér és a kialakult hatósági rendszer és intézményi struktúra is nagyban hozzájárult. Hiszen, ahogyan a *Nemzeti légügyi stratégia* is fogalmaz: „a repülés biztonsága a légiközlekedés valamennyi szereplőjének elsőrendű érdeke és alapvető célja. Magyarország és a magyar légiközlekedési iparág szereplői elkötelezettek abban, hogy kidolgozzák, bevezessék, fenntartsák és folyamatosan fejlesszék azt az intézményrendszert, beleértve a szabályozói, felügyeleti, képzési és működési struktúrákat, stratégiákat és eljárásokat.” [135]

Ahogyan Németh írja [136]: „A repülésbiztonság (…) azoknak az elsősorban állami és nemzetközi készségek és képességeknek a rendszere, amely a repülés kapcsán felmerülő veszélyhelyzetekre, kihívásokra képes hatékony válaszokat adni.” Más megfogalmazás szerint „a repülésbiztonság egy olyan állapot, amelyekben a személyeknek okozott vagy a tulajdonban keletkezett károk kockázatát egy elfogadható szintre csökkentik, azon, vagy az alatt tartják a veszélyek azonosításának és a kockázatok kezelésének állandó folyamatain keresztül” [137]. A fenti definíciókat az első bekezdésben leírtakkal összevetve egyértelműen látszik, hogy ugyan más-más a megközelítés, de mindkét meghatározás helytálló. A lényeg abban rejlik, hogy szervezeti, intézményi, sőt állami szinten elfogadott és következetesen alkalmazott eszközrendszer szükséges a repülésbiztonsági kockázatok meghatározott szintre való csökkentéséhez vagy az alatt való tartásához. Hazai szempontból ennek megvalósításához a magyar jogszabályok mellett a tagságunk által választott nemzetközi szervezetek előírásaihoz kell igazodnunk. A teljesség igénye nélkül a legmagasabb szintű előírások a Chicagói Egyezménynek a függelékeiben (ICAO Annex), az Európai Bizottságnak alárendelten működő

repülésbiztonsági ügynökség (EASA) előírásaiban és az állami célú repülések vonatkozásában a NATO egységesítési egyezményekben (STANAG) rögzítik a fentiekben meghatározott célok eléréshez szükséges követelményeket.

Ez az összetett követelményrendszer a jogszabályi környezettel kapcsolatos elvárásoktól kezdve, a repüléshez kapcsolódó veszélyek feltárásán és az azokhoz kapcsolódó kockázatok kezelésének mikéntjén át a teljes rendszert átfedő szervezeti struktúráig és ellenőrzési, minőségbiztosítási rendszerig minden a repülésbiztonság növeléséhez szükséges eszközt magába foglal és pontosan meghatároz, szavatolva ezzel a kívánt célok elérését.

Jelen fejezet célja, hogy a következő alfejezetekben feltárja a repülésbiztonság és a repülésmeteorológia kapcsolatának elméleti és gyakorlati hátterét, valamint hogy megmutassa a meteorológiai szakterületnek a repülésbiztonság növelése terén betöltött szerepét.

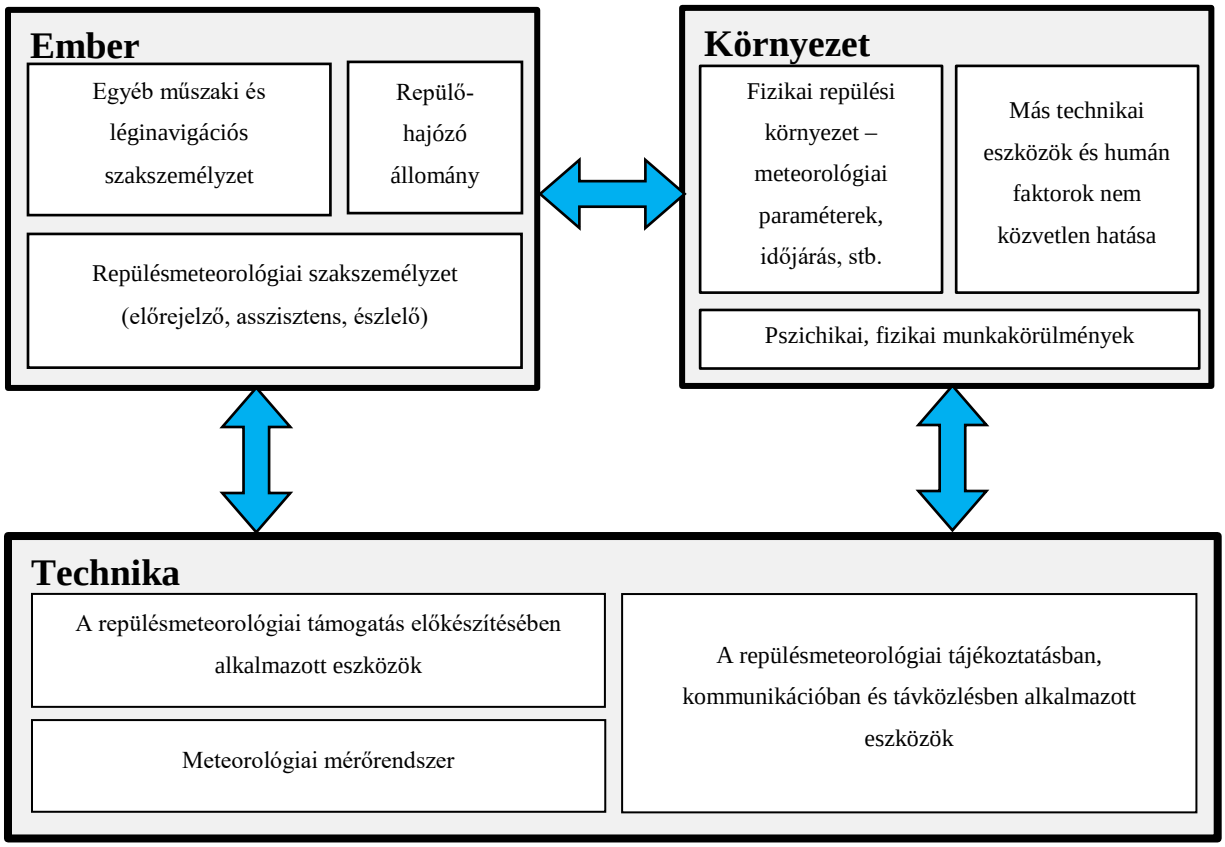
III.2. A repülésbiztonság és a repülésmeteorológia kapcsolódása

Dudás szerint a nem azonosítható vagy rejtett tényezők mellett, a repülésbiztonságot objektív és szubjektív tényezők befolyásolják [137]. A repülőtechnika és a környezet az objektív, a humán faktor, azaz az ember pedig a szubjektív tényezőkhöz sorolható. Könnyű észrevenni a párhuzamot a biztonságtudomány Kapcsolati törvényével, amely a biztonságtudomány vizsgálatainak színterére vonatkozik. E törvény szerint az *ember-technika-környezet* kapcsolatrendszer adja a vizsgálatok színterét, amelyet komplex módon kell kezelni, figyelve a rendszer belső interakcióira [138]. A repülésbiztonság eszközrendszere tehát a biztonságtudomány elvi alapjaira támaszkodva törekszik „a lehetséges legmagasabb repülésbiztonsági szint elérésére és fenntartására” [135].

A repülésbiztonság esetében a kapcsolatrendszer emberi elemét a repülőeszközök üzemeltetői, a műszaki és a különböző léginavigációs szakszemélyzetek adják. Ez utóbbiba tartoznak a meteorológiai támogatás végrehajtásáért felelős szakemberek is. A technika jelenti magát a repülőeszközt és az üzemeltetéséhez szükséges összes technikai eszközt. A környezet összetett módon értelmezhető és magába foglal minden olyan külső hatást, amelynek az emberi és technikai tényezők ki vannak téve és az a tevékenységükre befolyással bír. Ebben az összetett rendszerben a repülésmeteorológia feladata az, hogy a repülés fizikai környezetének, azaz a meteorológiai állapothatározóknak a mérésével és előrejelzésével a környezet időjárási körülményeit kiszámíthatóvá, tervezhetővé tegye. A kapcsolatrendszer egyes elemei kölcsönösen is hatnak/hathatnak egymásra és ez az interakció az eredeti hatást gyengítve vagy erősítve is felléphet. Más szavakkal kifejezve: az eredeti hatás negatív vagy pozitív visszacsatolási mechanizmust indíthat el, ami azt eliminálhatja vagy éppen túlzott mértékűvé teheti. Ilyen pozitív visszacsatolásra példa a repülésmeteorológia témaköréből például a felületi jégakkréció megjelenése a repülőgép belépő élein. A jegesedési környezetben haladó gép esetén a jégbevonat megjelenése a belépő él felületének növekedését okozza, a nagyobb felület pedig gyorsabb jéglerakódáshoz vezet. A kezdetben elhanyagolhatónak tűnő jegesedés pedig jégtelenítő berendezés vagy eljárás alkalmazását teheti szükségessé a repülőgépre gyakorolt hatása miatt.

Ahhoz, hogy a repülésmeteorológia irányából közelíthessük meg a repülésbiztonság kérdését, először át kell tekintenünk a biztonságtudomány vizsgálati színterének kapcsolatrendszerét. Jelen kérdéskörben nyilvánvalóan azon relációk felkutatására kell hangsúlyt helyezni, amelyek a repülésmeteorológia szempontjából megfelelő relevanciával bírnak.

Ennek megfelelően a 26. ábrán csak a kapcsolatrendszer ebből a szempontból mérvadó elemei kerültek feltüntetésre. Az ábrán a kétirányú nyilak jelölik az egyes elemek közötti kapcsolatokat, ami a valóságban az egyes alszegmensek közötti kölcsönös egymásra hatásban és függőségben nyilvánul meg.



26. ábra: A repülésmeteorológia kapcsolati rendszerének biztonságtudományi megközelítése [139]

A vázolt kapcsolati rendszerrel összefüggésben nem nehéz észrevenni a repülésbiztonság szakterületéről ismert SHELL modellel való hasonlóságot. Az Edwards által bevezetett modellt (SHEL) [140], amely a Kapcsolati törvény *ember-technika-környezet* (Liveware-Hardware-Environment) hármasát a rendszer puha összetevőjével bővítette (Software), Hawkins egészítette ki az ember-ember (Liveware-Liveware) interakcióval [141]. A modell az emberi tényezőt fókuszba állítva tárja fel a teljes rendszer kölcsönhatásait, amelyek a repülésbiztonság szintjének befolyásoló faktorai. Ahogyan azonban Dudás is megállapítja [144]: a modell megközelítései szempontjából a környezet nem tartozik a 3 kulcstényező közé, azaz éppen a fizikai környezettel kapcsolatos meteorológiai vonatkozások szerepe lesz kevésbé vizsgálható a SHELL modell eszközeivel.

Visszakanyarodva a fentiekben bemutatott kapcsolatrendszerhez, ebben az emberi tényezők között a meteorológiai támogató szakszemélyzet mellett a repülésmeteorológiai információkra

igényt tartó szakszolgálatok, felhasználók jelennek meg. Itt az egymás közötti kommunikáció során a legfontosabb a közös nyelv megléte, azaz, hogy az átadott információ a közlő és a befogadó fél számára is ugyanazt jelentse. Ehhez egymás szakterületének részleges és az átadott információ dekódolási módjának teljes ismerete szükséges. Nem véletlen, hogy a WMO és az ICAO már említett alapdokumentumai és a NATO vonatkozó egységesítési egyezményei pontosan meghatározzák a repülésmeteorológiai információközlés szigorú tartalmi és formai formai követelményeit. Az ICAO Annex 3, a WMO Technical Regulations és a NATO Meteorological Codes Manual összehangolt egységes elvárásokat fogalmaznak meg, a kibocsátó szervezet müködési területének megfelelő részletességgel.

A technikai szegmensben nevesített eszközök, mérőrendszerek vonatkozásában a fent említett szervezetek szintén szigorú előírásokat, komoly elvárásokat határoznak meg. Ezek az előírások egy adott eszköz használatának szükségességétől (például NATO repülőtér esetén kötelező időjárási radart üzemeltetni [142]) az alkalmazott mérőműszer elvárt pontosságának meghatározásáig vagy a meteorológiai információ terjesztése során használt kódformátum részletes leírásáig terjedhetnek [18]. Az adatok továbbításának a módját is redundáns módon, párhuzamos, egymástól független csatornák alkalmazásával kell megoldani, törekedve a repülések biztosításához szükséges meteorológiai információk folyamatos rendelkezésre állására.

A környezet repülésmeteorológiai szempontból legfontosabb eleme tehát a repülések valós, fizikai környezete, amely a tudományterület fő vizsgálati terepét adja, ahogyan az korábban is bemutatásra került. Ez a környezeti elem az, ami a legnagyobb befolyással bír a humán faktor és a technika szempontjából is. Szerepe kettős a rendszer kapcsolati hálójában, hiszen egyrészt közvetlen hatást gyakorol a rendszer további elemeire, másrészt ennek az elemnek a jövőbeli változásait előrejelezve, a fellépő veszélyforrásokkal szemben alkalmazható kockázatkezelő módszerek, eljárások alkalmazási módja és várható sikeressége is prognosztizálható. Ez utóbbi megvalósítása napjainkban a *biztonság irányítási rendszereken* (Safety Management System – SMS) keresztül történik. Ez egy olyan rendszerszintű megközelítés a biztonság kezelésére, ami a szervezeti struktúráktól kezdve a felelősségi körökön át az alkalmazott alapelvekig és működési eljárásokig mindent magába foglal [143].

Az értekezés témájához kapcsolódóan a fellépő veszélyforrást a csökkent látástávolság jelenti, az ehhez kapcsolódó kockázatokat pedig az ebből potenciálisan adódó olyan problémák, amelyek a repülés biztonságos végrehajtását veszélyeztetik. Ilyenekre lehet példa egy veszélyes megközelítés, a repülőeszköz irányításának vagy a pilóta orientációjának elvesztése és akár az

irányított repülőgéppel történő földnek ütközés is. Természetesen ezek az események az esetek döntő többségében nem a csökkent látástávolsághoz közvetlenül kapcsolódva következnek be, hanem az egymásból adódó események hosszú láncolata vezet hozzájuk. Ilyen szituációkban gyakran nem is az adott alacsony látástávolság érték a döntő befolyású, hanem az hogy az adott érték hogyan viszonyul az időjárási minimumokhoz és hogy mennyire felkészülten éri a repülési feladat végrehajtásában résztvevő állományt. A csökkent látástávolság előfordulási gyakorisága objektív okok miatt nem befolyásolható, azaz ahogyan az előző fejezet példáiból is láthattuk, a veszélyforrás megszüntetése, mint a kockázatkezelés eszköze nem működik. A kitettség ugyan csökkenthető (nem repülünk télen) lenne, ez azonban a műveleti célokkal nehezen összeegyeztethető. Ettől függetlenül azonban a kapcsolódó kockázatok a fent említett rendszerben szisztematikus munkával kezelhetők, menedzselhetők. A kockázatok csökkentése alapvetően a hozzájuk tartozó valószínűség és/vagy súlyosság csökkentésével érhető el. Ehhez kapcsolódóan nézzünk meg egy példát: tegyük fel, hogy a téli időszakban rendszeresen hajt végre terepkövetéssel VFR feladatot egy helikopter Szolnok térségében. A feladat végrehajtása előtt minden alkalommal kapnak meteorológiai tájékoztatást is a várható viszonyokról, azonban a látástávolság előrejelzés adatai kizárólag gyenge beválású numerikus produktumok alapján állnak elő. Tekintettel arra, hogy a téli időszakban az alacsony látástávolság klimatológiai gyakorisága viszonylag magas, emiatt az, hogy a hibás előrejelzés miatt VFR repülés közben hirtelen IFR körülmények közé kerülnek elképzelhető, hogy bekövetkezik. A kockázat súlyossága ebben az esetben is számos tényezőtől függ (pl.: a pilóták kiképzettsége, jártassága, a repülőeszköz műszerezettsége, stb.), de mindenképpen legalább súlyos következményekkel járhat. Meteorológiai megközelítéseket alkalmazva ebben az esetben a kockázat csökkentésére a kockázat valószínűségének csökkentésén keresztül van lehetőség. Ehhez pedig arra van szükség, hogy jobb beválású előrejelzések alkalmazásával csökkentsük az IFR körülmények közé kerülés előfordulásának valószínűségét.

A példa alapján könnyű belátni, hogy a veszélyforrások pontosabb előrejelzése, azaz például a hatékonyabb, jobb verifikációs eredményekkel rendelkező előrejelző eljárások alkalmazása, megteremti a kockázatok sikeres kezelésének lehetőségét. A kockázatok sikeres kezelése pedig a repülési feladatok biztonságosabb végrehajtásához járul hozzá, hosszabb távon statisztikailag is igazolva a repülésbiztonság magasabb szintjét. Az értekezésemben bemutatandó előrejelző eljárás hatékonyságát és a hagyományos előrejelzésekkel szemben fellelhető előnyeit objektív verifikációs eljárásokkal kívánom igazolni, melyet a később bemutatásra kerülő eredmények egyértelműen alátámasztanak. Ez egyben azt is jelenti, hogy a kidolgozott előrejelző eljárások

operatív alkalmazása a repülések meteorológiai kiszolgálása során – figyelembe véve természetesen a vizsgált módszertan működési korlátait, – a jövőbeni veszélyek pontosabb ismeretével segít elkerülni a hozzájuk kapcsolódó repülési kockázatokat, biztonságosabbá téve ezzel az adott feladatok végrehajtását.

A meteorológiai szakszemélyzetek által átadott információ minőségének javítása, az előrejelző eljárások, módszerek fejlesztése mellett a szakemberek alapos képzésével, továbbképzésével érhető el a leghatékonyabban. Ez teszi lehetővé, hogy a gyorsan avuló, értékét vesztő meteorológiai információ világában a képzettebb szakemberek akár kevesebb nyers adat, produktum felhasználásával, de jobb minőségű, származtatott, a felhasználói igényekhez is igazodó produktumokat állíthatnak elő. Az előrejelzési adatok terjesztése szempontjából fontos még, hogy a repülésmeteorológiailag indokolt tájékoztatás a megfelelő időpontban, a megfelelő sűrűséggel és a megfelelő időelőnnyel, a megváltozott környezeti viszonyokra azonnal reagálva jusson el a felhasználókhoz. Ellenkező esetben ugyanis a tájékoztatás információ tartalma rendkívül gyorsan elveszíti értékét, aktualitását és a döntések meghozatalában nem nyújt segítséget.

III.3. A repülésbiztonság és a repülésmeteorológia kapcsolódásának gyakorlati kérdései

A repülésbiztonság és a meteorológiai szakterület találkozásának magától értetődő és egyben legszomorúbb példáját az időjárással összefüggésben (weather related) bekövetkező légiközlekedési események, balesetek szolgáltatják. Az alábbiakban bemutatásra kerülő repülőesemények és statisztikai adatok célja semmiképpen nem a teljesség és a teljes pontosság igénye, hiszen az ezek összeállításához szükséges adatok tagolása, részletezettsége és a források sokrétűsége ezt nem is tenné lehetővé. A bemutatás célja sokkal inkább egy áttekintés nyújtása, amelynek segítségével egy átfogó, összefoglaló képet alkothatunk az időjárással összefüggésben bekövetkező események repülésbiztonsági aspektusairól.

A hazai repülőeseményeket tekintve, kizárólag a meteorológiai okokkal összefüggésbe hozható statisztikai feldolgozást nem találunk. A legátfogóbb munkákat Dudástól találjuk, aki a katonai repülés vonatkozásában az 1957-2005 közötti időszak rendelkezésre álló adatait dolgozta fel cikkében [137] és értekezésében [144] nagyon alaposan. Megállapítja, hogy egyrészt az események besorolását következetlenségek kísérik, másrészt a kivizsgálás filozófiája és a modern megközelítésű okcsoporti besorolás között nincs összhang teremtve, ami nem segíti a „megelőző tevékenység pontos orientálását a kockázatkezelés folyamatában.” [144] A bemutatott okcsoporti besorolásban a „Repülés szervezésében, biztosításában előfordult hibák” között ugyan szerepel a „Meteorológiai hibás előrejelzés” mint besorolási kategória, de a későbbiekben meteorológiai tárgyú információ nem kerül ismertetésre. Ez abból is adódhat, hogy fent említett okok miatt a megadott kategóriák nem mindegyike jelenik meg az eseményjelentésekben, ahogyan Dudás is megmutatja, például a légiforgalmi irányítással kapcsolatos okok a 48 év statisztikáiban mindössze 6 alkalommal fordulnak elő.

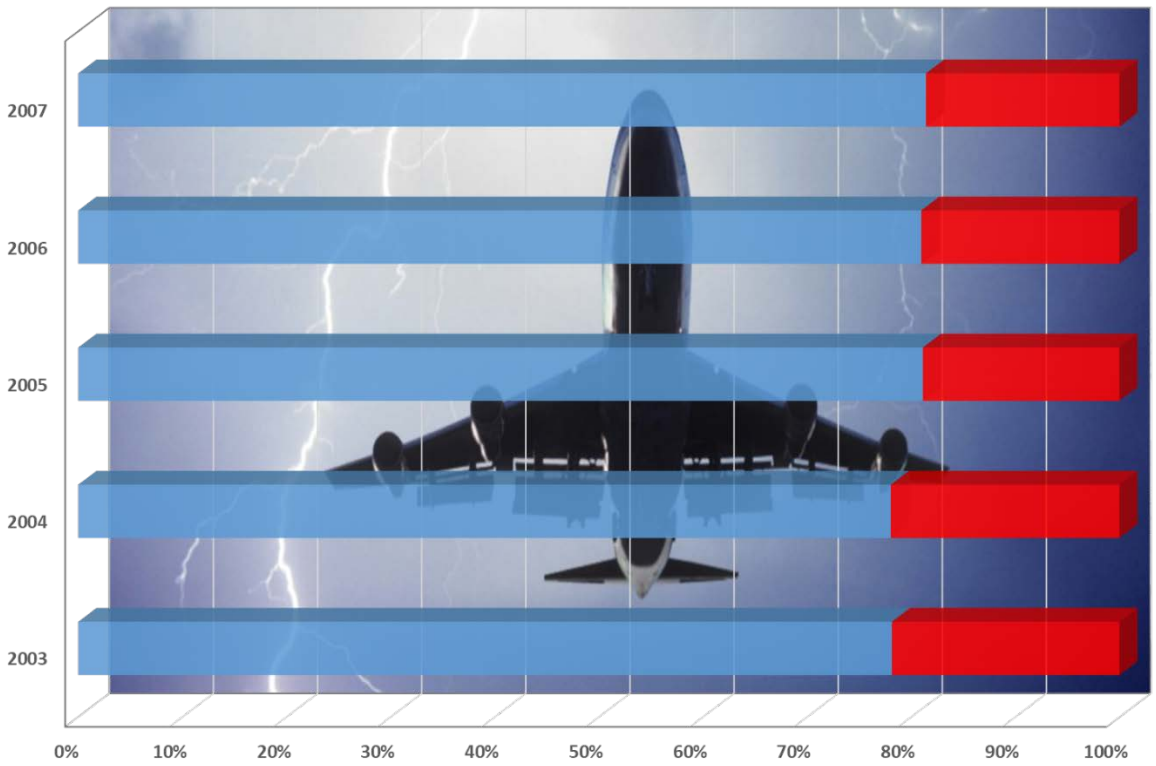
Hazai viszonylatban a Közlekedésbiztonsági Szervezet olyan statisztikai elemzéseket, kimutatásokat, amelyek alapján az időjárási okokkal összefüggésben bekövetkezett repülőeseményekre vonatkozó következtetéseket lehetne levonni, nem tett illetve nem tesz közzé. A repülőeseményekkel kapcsolatosan a kivizsgálást követő zárójelentések, biztonsági ajánlások érhetők el, amelyek esetenként olyan félrevezető meteorológiai információkat tartalmaznak, amelyek nem könnyítik meg az események adatainak statisztikai jellegű feldolgozását. Előfordult például olyan eset, amikor a hiányzó meteorológiai adatok a jelentésben „0” értékekkel kerültek megjelenítésre, aminek a legtöbb meteorológiai paraméter esetén konkrét jelentése van. Ettől eltekintve azért található olyan esemény, amikor a kivizsgálás eredményeként a baleset bekövetkezését konkrét időjárási okokkal hozták összefüggésbe. Ilyenre példa a 2010. december 08-án bekövetkezett légiközlekedési baleset

[145], amelynek során egy ember életét vesztette és egy Cessna típusú repülőgép megsemmisült. A vizsgálóbizottság megállapításai szerint a repülés valószínűsíthető lefolyása során a repülőgép váratlanul rossz látási viszonyok (köd/emelt köd) közé került, megszűnt a földlátás majd a veszélyes szituáció elhárítása érdekében tett részben hibás manőverek a földdel történő ütközéshez vezettek. A baleset bekövetkezésében valószínűleg a viszonylag tagolt felszín is közrejátszott: a részben a Duna felett végrehajtott fordulót követően a repülőgép az emelkedő partszakasznak ütközött. Ahogyan pedig Bottyán korábbi vizsgálatai és összegzése is megmutatja [146], az ilyen körülmények között, műszaki meghibásodás nélkül, irányított géppel történő földnek ütközés (Controlled Flight Into Terrain – CFIT) esetén rendkívül alacsony a túlélés esélye és leggyakrabban az ilyen típusú ütközés a felszíni relief viszonyok hirtelen változásaival áll összefüggésben. Bottyán megállapításait érdemes itt azzal kiegészíteni, hogy az egyedi esetek hátterében az említetten felül számos olyan tényező állhat, amely az események szerencsétlen sorozatán keresztül a nem kívánt kimenetel bekövetkezéséhez vezet.

Ugyanakkor az összes rendelkezésre álló jelentés és biztonsági ajánlás statisztikai igényű feldolgozása olyan részletességű munka elvégzését tenné szükségessé, ami jelen dolgozat vonatkozásában nem áll összhangban az ebből származó előnyökkel, így nem is kerül végrehajtásra.

A hazai légiközlekedési eseményekkel kapcsolatban még mindenképpen említést érdemel Bottyán cikke [147], ami egy repülőgép katasztrófa meteorológiai viszonyainak rekonstrukciójára tesz kísérletet. A munka az 1975. január 15-i Malév géppel bekövetkezett repülőesemény időjárási körülményeire fókuszál és az MS Flight Simulator X program segítségével a környezeti tényezők vizuális szimulációjára is vállalkozik. Az eredmények ismeretében a szerző azt feltételezi, hogy a katasztrófa bekövetkezésében a valószínűsíthető jegesedés mellett a látástávolság minden irányú degradációja és ebből fakadóan a pilóta térbeli orientációjának elvesztése is központi szerepet játszott.

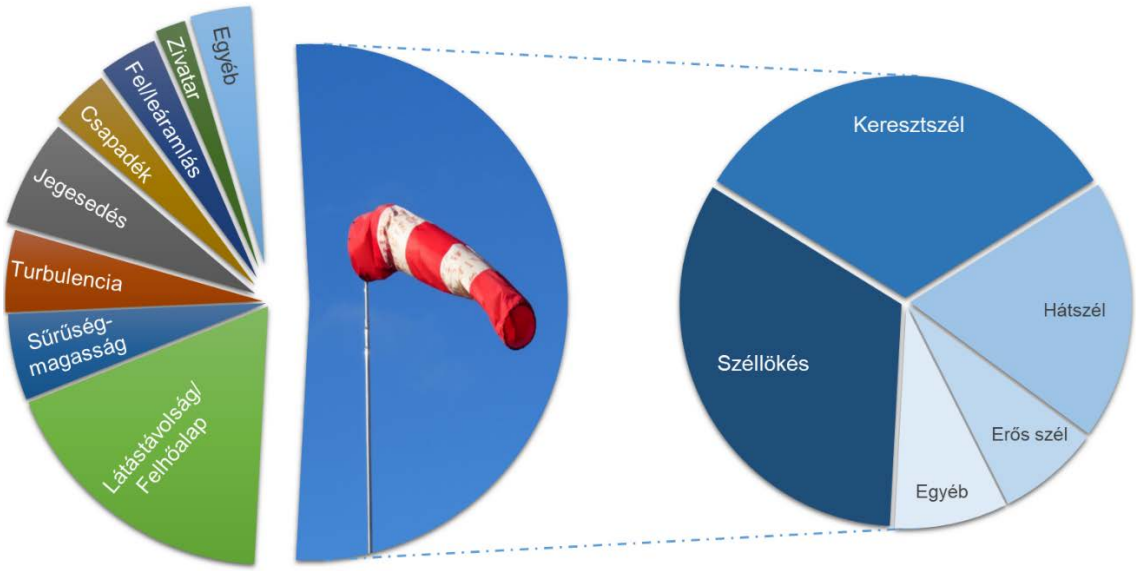
Külföldi vonatkozásban az egyesült államokbeli Nemzeti Közlekedésbiztonsági Szervezet (NTSB - National Transportation Safety Board) 2010-ben közreadott tanulmánya kifejezetten az időjárással összefüggésben bekövetkezett légi balesetekkel foglalkozott [148]. A feldolgozott és elemzett adatok a 2003-2007 közötti ötéves időszakot ölelték fel (27. ábra). A vizsgált időszakban az Egyesült Államokban bekövetkezett 8657 civil légi baleset közül 1740, azaz körülbelül minden ötödik esetben játszott szerepet az időjárás a baleset bekövetkezésében.



27. ábra: A 2003-2007 közötti időszakban időjárási okok miatt bekövetkezett balesetek évenkénti aránya a teljes esetszámhoz viszonyítva (adatok forrása: [148])

Bár a 20% körüli arány enyhe évenkénti ingadozást mutat, de a rövid időszak alapján nem megállapítható, hogy állandó-e az időjárási okokkal összefüggésbe hozható balesetek aránya.

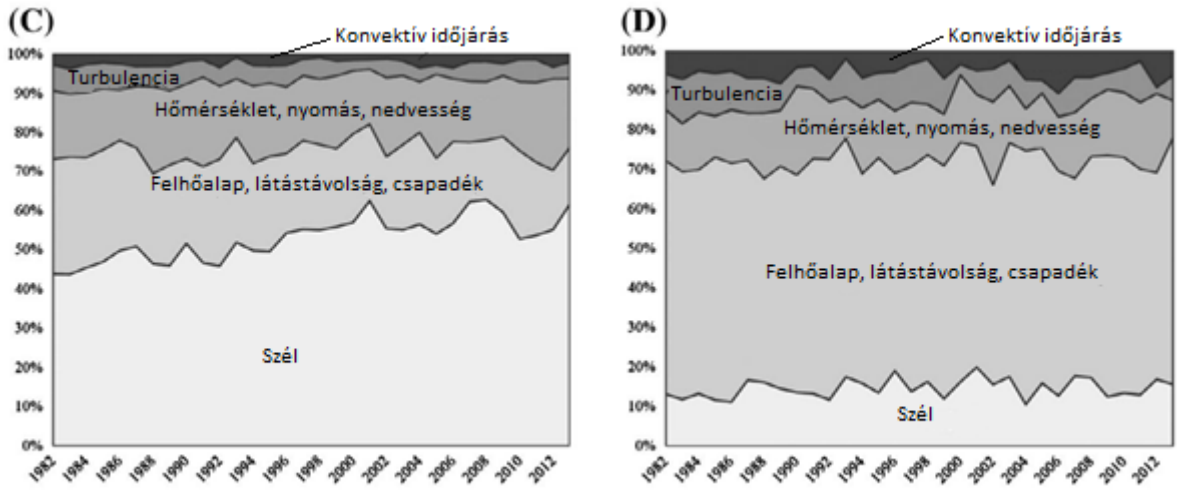
A vázolt eseteknek több mint a fele a szél miatt következett be (28. ábra), ahogyan az ábra bal oldalán látható, az ábra jobb oldalát tekintve pedig a széllel kapcsolatos okok részletezését tallhatjuk. Ezek közül több mint 50%-ot tesz ki a repülési feladatok szempontjából kedvezőtlen irányú szél (keresztszél, hátszél) aránya, ami rámutat a megfelelő térbeli és időbeli felbontású pontos szélirány előrejelzések fontosságára. Az esetek kb. 1/3-ában játszott szerepet a széllökések jelenléte, ami a széllel kapcsolatos problémák közül a legmagasabb arányt jelenti. A szél mellett a másik legfontosabb tényező/tényezők a felhőalap és a látásátávolság, ez utóbbiakat azonban a vizsgálat keretein belül sajnos együttesen kezeltek, így azok egyedi értékelése nem lehetséges. Ez arra vezethető vissza, hogy 2008-ig az NTSB adatbázis is együttesen, nem külön kategóriaként osztályozta a felhőalapot és a látástávolságot. Ennek ellenére egyértelműen látszik, hogy a szelet követően ez a két időjárási tényező játssza a legnagyobb szerepet a balesetek bekövetkezésében.



28. ábra: A 2003-2007 közötti időszakban időjárási okokkal összefüggésben bekövetkezett balesetek évenkénti aránya a teljes esetszámhoz viszonyítva (adatok forrása: [148])

Fultz és Ashley tudományos cikke [149] már jóval hosszabb időszakot dolgoz fel: munkájukban az 1982-2013 közötti periódus (a hiányzó 2011-es év adatai közelítő becsléssel lettek pótolva) időjárási okokkal összefüggésben bekövetkezett baleseti statisztikáit elemezték. A munkában közzétett adatokat szintén az NTSB publikus adatbázisából gyűjtötték össze. Ebben a vizsgált időszakban az Egyesült Államokban bekövetkezett 58687 civil légi baleset közül 15439, azaz körülbelül minden negyedik esetben játszott szerepet az időjárás a baleset bekövetkezésében. Ez némileg magasabb arányt jelent, mint a korábban bemutatott rövidebb időszak esetében, ami a szerzők szerint abból következik, hogy az időjárási okokra visszavezethető balesetek száma gyorsabb ütemben csökken, mint az össz balesetszám [149]. Azaz abszolút értékben és arányaiban is kevesebb baleset következik be időjárásra visszavezethető okok miatt napjainkban, mint évtizedekkel ezelőtt.

Az egyes meteorológiai tényezők eltérő veszélyességét jól szemlélteti a 29. ábra. Ennek a bal oldalán (C) az egyes meteorológiai változók, a baleset kiváltásában szerepet játszó tényezők aránya látható az összes meteorológiai okra visszavezethető balesetek számához viszonyítva. Jól látszik, hogy a szél, mint szerepet játszó faktor aránya enyhe emelkedést mutat a látástávolság–felhőalap–csapadék hármas kárára. Ez annak köszönhető, hogy balesetek arányának csökkenése a vizsgált paraméterek esetén eltérő. A látástávolság–felhőalap–csapadék hármas esetén határozottabb a csökkenés, ami a szél dominanciájának növekedéséhez vezet.



29. ábra: Az egyes meteorológiai változókkal összefüggésben bekövetkezett balesetek évenkénti aránya az időjárási okok miatt bekövetkezett balesetek össz számához (C) és az időjárási okok miatt bekövetkezett halálos balesetek össz számához (D) viszonyítva (forrás: [149])

A 29. ábra jobb oldala (D) az időjárási okok miatt bekövetkezett halálos balesetek teljes számához képest mutatja meg az előbbiekben vázolt arányokat. Ezeken az adatokon egyértelmű, tendenciózus változások nem figyelhetők meg a meteorológiai változók arányaiban, az viszont kétségtelenül megállapítható, hogy a látástávolság–felhőalap–csapadék hármas erősen felülreprezentált az abszolút esetszámaihoz képest. Míg az összes időjárási ok miatt bekövetkezett balesetnek csupán a 15-20%-ában játszik szerepet, addig a halálos balesetek esetén 60% körüli ugyanez az arány. Ez azt jelenti, hogy az ezzel összefüggésben bekövetkező balesetek nagyobb arányban súlyosabbak, azaz a kiváltó faktorok veszélyességének foka magasabb, mint a többi paraméter esetében. A megadott 60% körüli aránynak a döntő többségét (> 90%) a látástávolsággal és a felhőalappal összefüggésbe hozható esetek teszik ki, kevesebb, mint minden tizedik eset bekövetkezésében játszik szerepet valamilyen csapadékkal összefüggő ok. Ugyan a rendelkezésre álló adatok alapján egyértelműen nem választható külön a látástávolság és a felhőzet által képviselt arány, annyi azonban biztosan kijelenthető, hogy a repülésre befolyással lévő meteorológiai paraméterek közül ez a kettő gyakorolja a legnagyobb hatást a súlyosság kérdésének vonatkozásában a bemutatott baleseti statisztikák alapján.

Mindezt többféle, ezzel párhuzamos megközelítés is megerősíti: egyrészt a légiközlekedés területén a meteorológiai vonatkozású korlátozó vagy jelzés értékű határértékek közül a legtöbb a látástávolsághoz és a felhőalaphoz kapcsolódik. Ezek alatt a határértékek alatt nem csak a repülőterek, repülőeszközök üzemeltetési minimumait, hanem a pilóták kiképzettségéhez igazodó, adott feladat végrehajtásához szükséges egyéni határértékeket, vagy akár a

repülésmeteorológiai táviratokban alkalmazott kötelező jelentési és előrejelzési kritériumokat is kell érteni. Az adott repülési feladat végrehajtását befolyásoló számos határérték közül minden esetben a legkedvezőtlenebb érték lesz a meghatározó, hiszen ezzel biztosítható az előírás szerinti összes minimum megtartása.

Másrészt az elmúlt évekből számos példát sorolhatunk a repülésbiztonsági ajánlás alapján vagy különösebb előzmények nélkül proaktívan, a repülésbiztonság növelésének céljából életre hívott különböző kutatási projektekről, tervekről, amelyek mögött Európában szinte kivétel nélkül az EASA áll. Ilyenre példa az *All Weather Operation (AWO) Project* és az ennek keretében született stratégiai dokumentumok, amelyek a korábbi évek repülőeseményeinek szakértői vizsgálatán alapuló megállapításokból kiindulva fogalmazták meg azokat a lehetséges eszközöket és biztonsági ajánlásokat, amivel a projekt célja elérhető. Ami pedig nem más, mint a meteorológiai helyzetértékelés, helyzetismeret (situational awareness) szintjének növelése a kedvezőtlen időjárási viszonyok között végrehajtott repülések kockázatainak csökkentése érdekében, ami végül a repülésbiztonság magasabb szintjét eredményezheti [150]. Ezt az elképzelést több korábbi vizsgálat eredménye is alátámasztja [151][152], amelyek a korábban már említett CFIT típusú balesetek értékelésével és elemzésével foglalkoztak. Ezek a vizsgálatok világosan megmutatták az adott balesettípus különös veszélyességét és alacsony túlélési arányát, valamint azt, hogy gyakran kapcsolódik össze meteorológiai tényezőkkel. Ezek a meteorológiai tényezők leggyakrabban a csökkent látástávolság és a felhőzet, amelyből kifolyólag a légijármű vezetője a baleset bekövetkezése előtti utolsó pillanatokig egy alternatív, az ő szemszögéből biztonságosnak tűnő valóságot él meg, és a repülőgép irányítását végig kontrollálva vezeti a földfelszínnek a gépet.

Az előbbiekben érintett stratégiai dokumentumban [150] megfogalmazott ajánlások, amik a fenti cél elérését segítik, a teljesség igénye nélkül kiterjednek a meteorológiai tárgyú képzések javításától, a hatékonyabb repülés előtti eligazítások megvalósításán és a másodlagos forrásból származó időjárási információk felhasználásán át a repülésmeteorológiai előrejelző produktumok fejlesztéséig számos alterületre. Általában ez utóbbi fejlesztések külön programok keretében valósulnak meg, melyre többek között az Európai Uniós támogatással kivitelezett *FLYSAFE* és *EUMETNET* programok szolgálnak például. A fentiek mellett az EASA repülésbiztonsági terve (*2019-2023 European Plan for Aviation Safety (EPAS)*) is felhívja a figyelmet a repülésmeteorológiai vonatkozások fontosságára, kiemelve, hogy 2015-től az EASA fokozottan fókuszál az időjárással kapcsolatos kihívások kezelésére.

Az imént vázolt dokumentumok és a korábbi fejezetekben bemutatott szakirodalmi vonatkozások mellett felhőalap magasság és a látástávolság előrejelzésének fontosságát Herzegh [153], Bankert és Hadjimichael [154] valamint Ghirardelli és Glahn [155] munkái is egyértelműen megerősítik. Ráadásul a két említett meteorológiai paraméterre vonatkozó előrejelzések pontossága az alkalmazott légijármű karakterisztikus méretétől függetlenül [156] lényegesen nagyobb hatással van az üzemeltetési költségekre [157], a hatékonyságra [158] a repülésbiztonsági vonatkozások [75][159][160] mellett, mint egyéb, a repülésmeteorológiában kevésbé fontos változók esetében.

Mindezeket a meteorológiai szakterület vonatkozásában az ICAO stratégiai célja, azaz a biztonság és a hatékonyság növelése is megkérdőjelezhetetlenül alátámasztja [161]. Az ICAO meteorológiai munkacsoportja által jegyzett dokumentum tartalmaz egy tudományos kitekintést is a jövőre nézve, ami a Meteorológiai Világszervezet 2017-es Repülésmeteorológiai Tudományos Konferenciáján (*AeroMetSci-2017*) megfogalmazott ajánlásokban formalizálódott. Ezek az ajánlások a többek között kiemelt kutatási területként javasolják az alacsony látástávolság problémakörét és az ultrarövidtávú statisztikai és numerikus előrejelzések fejlesztését. A meteorológiai információk terjesztését pedig a Rendszerszintű Információkezelés (System Wide Information Management – SWIM) ernyője alatt kívánja megvalósítani, az átadott adatok globális megoszthatósága és dinamikus kezelhetősége érdekében [161].

III.4. Következtetések

Az előző fejezetek egyértelműen megmutatták a meteorológiai szakterület és azon belül több más paraméterrel egyetemben a látásávolság kiemelt szerepét a repülések során. Ennek igazolásában természetesen nem csak a szakirodalmi vonatkozások megállapításai és az analitikus úton származtatott elméleti megfontolások, hanem az időjárási okokkal összefüggésbe hozható repülő események szomorú statisztikái is fontos szerepet játszottak. Ezek közül talán az utóbbi a legkegyetlenebb ösztönzője azoknak a repülésbiztonsági ajánlásoknak, amelyek az EASA és az ICAO stratégiai céljaival összhangban olyan kutatás-fejlesztési vagy gyakorlati megvalósítási projekteket, programokat hívnak életre, amelyek a repülésbiztonság magasabb szintjének elérését kívánják közvetett úton megvalósítani.

Nem nehéz észrevenni, hogy a repülésmeteorológiai kutatások, fejlesztések oldalán megjelenő célok, a repülésbiztonsági szakterületen már csak az ott kitűzött célok megvalósításának eszközeiként öltenek testet. Ez az egymásra épülő rendszer a folyamatos visszacsatolásokkal kiegészülve teszi lehetővé, hogy az egyre pontosabb előrejelzések ténylegesen hozzájáruljanak a repülésbiztonság magasabb szintjének biztosításához.

Azt azonban a prognosztikai produktumokat alkalmazó felhasználói közösségeknek kell megérteni, hogy a meteorológiai előrejelzések tartalmát a gyakorlatban hogyan kapcsolják össze a kezelendő kockázatokkal és használják fel a célok elérése érdekében. Az egyértelműség fenntartásáért célszerű az előrejelzéseket nem biztos állításokként, hanem a bizonytalanságot csökkentő eszközökként kezelni. Ez módszertanában is közelebb áll a repülébiztonság területén alkalmazott kockázatkezelő eljárásokhoz és könnyebben érthetővé teszi a meteorológiai információ szerepét a biztonságirányítási rendszerek működtetése során.

Deduktív érveléssel, azaz az előfeltevések, premisszák igazságának felhasználásával a következtés igazságát levezetve megállapítottam, hogy a veszélyforrások pontosabb előrejelzése, azaz például a hatékonyabb, jobb verifikációs eredményekkel rendelkező előrejelző eljárások alkalmazása, megteremti a kockázatok sikeres kezelésének lehetőségét. A kockázatok sikeres kezelése pedig a repülési feladatok biztonságosabb végrehajtásához járul hozzá, hosszabb távon statisztikailag is igazolva a repülésbiztonság magasabb szintjét.

IV. ANALÓGIÁS ÉS HIBRID MÓDSZEREK ALKALMAZÁSA A HORIZONTÁLIS LÁTÁSTÁVOLSÁG ELŐREJELZÉSÉBEN

IV.1 Bevezetés

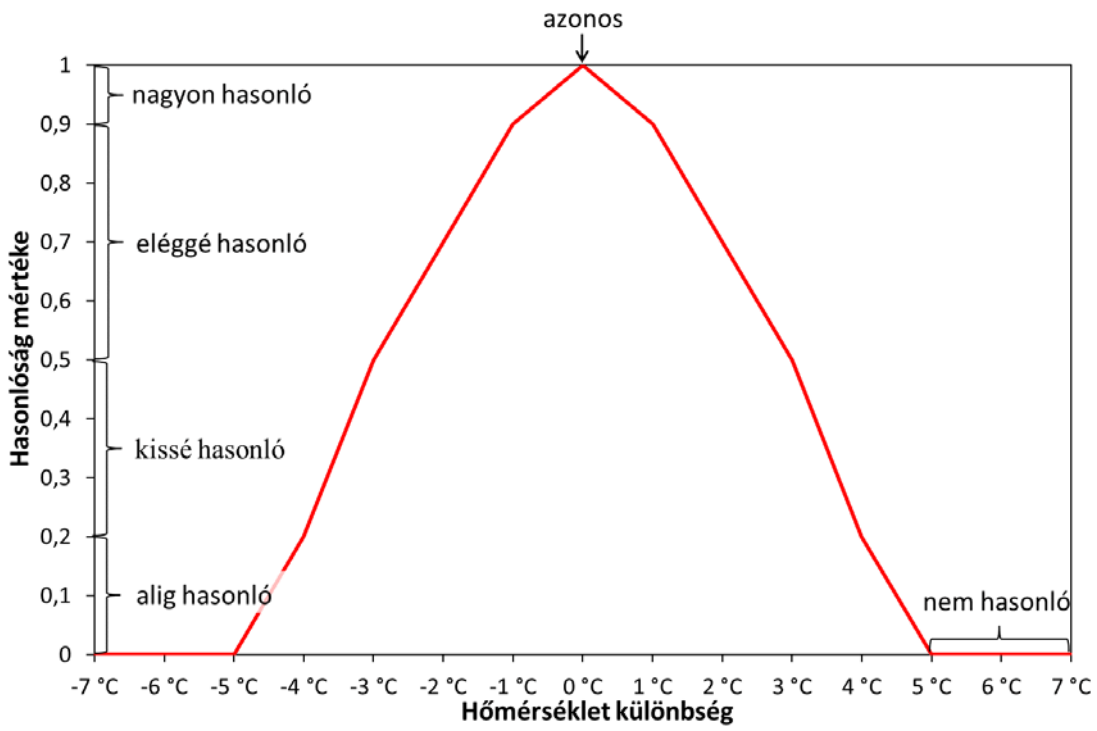
A látástávolság előrejelzésének szakirodalmi áttekintése során egyértelműen kirajzolódott, hogy a vizsgált paraméter prognosztikai problémájára, napjainkban a numerikus előrejelzések eszköztára még nem képes kellően pontos és hatékony választ adni. A látástávolsággal kapcsolatos repülésmeteorológiai előrejelző produktumok elkészítése azonban a numerikus vonalon elérhetőnél lényegesen nagyobb pontosságot igényel. Ezek után nem meglepő, hogy a témában jártas szakemberek, kutatók számottevő része fordult a még mindig a legjobb eredményeket biztosító statisztikai alapú módszerek felé. Szakirodalmi kutatásaim alapján én is úgy ítéltem meg, hogy az operatív hazai repülésmeteorológiai gyakorlatban teljesen ismeretlen analógiás elven alapuló eljárásoknak, igenis van létjogosultsága, sőt a hazai viszonyokra finomhangolva illetve új megközelítéseket alkalmazva nemzetközi viszonylatban is értékes tudományos eredmények érhetők el alkalmazásukkal. A fentiekben megfogalmazottak az operatív előrejelzői munkám során megtapasztalt kihívásokkal kiegészülve kellően erős motivációs hátteret nyújtottak a tudományos kutatásaim tárgyának és irányainak. Ezeknek megfelelően választottam ki az értekezésem fő témáját is adó, a horizontális látástávolság analógiás elven alapuló előrejelzési módszereinek fejlesztését, valamint egyéb prognosztikai eljárásokkal való kombinálását. Ez utóbbit annak érdekében, hogy a különböző módszerek egyesítésével az eredeti eljárások előnyeinek maximalizálásával és hátrányainak minimalizálásával egy olyan összetett megoldás jöjjön létre, ami hatékonyságában legalább a kiindulási eljárások szintjét tartani tudja.

A soron következő alfejezetekben először a statisztikai alapú, analógiás elven alapuló előrejelző módszert, az alkalmazása során felhasznált adatokat és a módszer hatékonyságát növelő Analytic Hierarchy Process eljárást tekintem át részleteiben. Majd ezt követően a hibrid előrejelzést bemutató alfejezetben az analógiás elvű előrejelzések eredményeit és a numerikus modellek kimeneteit kombináló hibrid módszer kerül tárgyalásra.

IV.2. Az 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, eljárás segítségével a hasonlóság mértéke alapján becslést adunk a kívánt meteorológiai változó jövőbeli értékére. Az előrejelzési időszak hossza általában 6 és 24 óra között változik [92][93][162], ugyanis az analóg előrejelzések alaptézisük miatt csak homogén feltételek mellett működnek megbízhatóan. Ez azt jelenti a gyakorlatban, hogy az analóg előrejelzések hatékonysága jelentősen csökken, amikor olyan dinamikus időjárás változásokat kellene prognosztizálniuk, ami a lokális adatok alapján nagyon nehezen vagy egyáltalán nem beazonosítható. Ilyen időjárási szituációra jó példa lehet a hidegfront érkezéséből következő gyors látástávolság javulás, ahol az analóg előrejelzés csak akkor képes a hirtelen változás helyes prognózisára, amikor az adott helyen a hidegfront érkezéséből adódó változások már közvetlenül jelentkeznek. Ez azonban nem jelent hátrányt előrejelzési szempontból, hiszen az ilyen dinamikus változások egyrészt numerikus prognosztikai eszközökkel is jól előrejelezhetők, másrészt a mérési, megfigyelési és távérzékelési adatok területi változásainak elemzésével szintén egyszerűen prognosztizálhatók.

A fent említett időjárási szituáció kifejezés alatt a továbbiakban nem egyetlen időpont adatait, azaz pillanatnyi állapotot, hanem egy határás időszak összes információját kell érteni, amiből következik, hogy az összehasonlítás is időbeli adatsorok összehasonlítását jelenti. Maga a paraméterek összehasonlítása a fuzzy logika eszköztárából ismert, szakértői megegyezéssel létrehozott ún. tagsági függvények segítségével történik [93]. A tagsági függvények az adott paraméter esetében meghatározzák az összevetésre kerülő értékek különbsége vagy aránya alapján, hogy azok nem, alig, kissé, eléggé vagy nagyon hasonlítanak egymásra, esetleg azonosak. A hőmérsékletre, mint összehasonlítás tárgyát képező paraméterre vonatkozó tagsági függvény alakját a 30. ábra mutatja be. Jól látható, hogy az 5°C-ot elérő hőmérséklet különbség esetén a két értéket egyáltalán nem tekintjük hasonlónak, ebben az esetben az S hasonlósági mérték nullával egyenlő. A másik véglet esetében a METAR táviratból származó értékek egyezőségekor ugyanez az érték maximumát veszi fel, azaz 1 lesz.



30. ábra: A hőmérsékletre vonatkozó tagsági függvény alakja

Az ábrán látható tagsági függvény alakjának általános matematikai megfogalmazása:

$$f(x) = \begin{cases} h_1, & ha \quad |x| = k_1 \\ h_1 - \frac{|x|-k_1}{k_2-k_1} \cdot (h_1 - h_2), & ha \quad k_1 < |x| \leq k_2 \\ h_2 - \frac{|x|-k_1}{k_3-k_2} \cdot (h_2 - h_3), & ha \quad k_2 < |x| \leq k_3 \\ h_3 - \frac{|x|-k_1}{k_4-k_3} \cdot (h_3 - h_4), & ha \quad k_3 < |x| \leq k_4 \\ h_4 - \frac{|x|-k_1}{k_2-k_1} \cdot (h_4 - h_5), & ha \quad k_4 < |x| \leq k_5 \\ h_5, & ha \quad |x| > k_5 \end{cases} \tag{6}$$

ahol k_i $(i = 1,\ldots,5)$ értékei rendre a *0*, *1*, *3*, *4*, és *5* határértékek, amelyek a h_j $(j = 1,\ldots,5)$ fuzzy hasonlósági értékekhez (rendre *1; 0,9; 0,5; 0,2* és *0*), azaz az azonos, nagyon hasonló, eléggé hasonló, kissé hasonló, alig hasonló és a nem hasonló kifejezésekhez tartoznak.

Az adott paramétertől függően, de alapvetően hasonló tagsági függvények kerültek kialakításra az összes vizsgált meteorológiai és időbeli változó függvényében. Az így megkapott egyedi

hasonlósági értékek kerülnek aztán az összehasonlítási folyamat során 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. Ez az Analytic Hierarchy Process (AHP) eljárás [163] alkalmazásával valósul meg, melynek hatékonysága már egy korábbi munkában bizonyításra került [96] és amelyet külön fejezetben részletesen bemutatok.

Ahogyan a fentiekben is jeleztem, a továbbiakban időlépcső kifejezés alatt az előrejelzési időszak kezdetétől (ami, a legutolsó észlelés ideje) az adott METAR táviratig visszafele vett távolságot értem. 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:

$$S_{TOTAL\,t-j} = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot S_{ij} \tag{7}$$

ahol S_{ij} az i-edik paraméter tagsági függvények által meghatározott hasonlósága, w_i pedig i-edik paraméterhez az AHP módszerrel hozzárendelt súly, aminek pontos meghatározási eljárása a következő alfejezetben kerül bemutatásra.

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 vonatkoztatott súlyozott átlag általános képlete a következő:

$$S_{overall} = \frac{\sum_{j=0}^{k-1}\left(2^{k-j-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot S_{ij}\right)}{2^k - 1} \tag{8}$$

ahol k az alkalmazott időlépcsők száma (esetünkben $k=12$), n pedig az összehasonlító algoritmusban vizsgált paraméterek száma. 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 határás periódusban.

A (8) egyenlet segítségével az adatbázis összes időjárási szituációjához rendelhető egy hasonlósági mérték, ami alapján a leghasonlóbb esetek kiválaszthatók. A kiválasztott szituációk sorrendjét elsődlegesen a hasonlóság mértéke határozza meg, amennyiben az pontosan megegyezik, akkor az időben későbbi, azaz frissebb szituáció kerül előrébb a rangsorban.

Ahogyan Hansen is bizonyította korábbi munkájában [93]: kellően kiterjedt historikus adatbázis esetén, azaz kellően hosszú idősorok felhasználásakor az analóg szituációk keresése során a kapott verifikációs eredmények érdemben nem változnak az idősor további bővítésével. Ugyanez igaz az előrejelzések kompozíciója során felhasznált leghasonlóbb időjárási szituációk darabszámára is, azaz a verifikációs eredmények érdemben nem változnak a felhasznált helyzetek darabszámának változtatásával. A fenti eredményekre alapozva a 30 leghasonlóbb időjárási szituáció felhasználásával kerülnek a determinisztikus prognózisok kialakításra. Ehhez a leghasonlóbb eseteket időben közvetlenül követő METAR táviratokból kinyert látástávolság adatok szolgáltatják a kiindulási alapot. Minden rákövetkező időlépcső esetén a kigyűjtött értékek 30. percentilis [164] értékével előállítható a determinisztikus látástávolság prognózis. A 30. percentilis azt jelenti, hogy az időlépcsőnkénti adatok nagyság szerint emelkedő sorrendben rendezésre kerülnek, majd meghatározásra kerül az a látástávolság érték, amelynél a vizsgált adatok 30%-a kisebb. Az előrejelzési időszak hossza az összehasonlíthatóság alapelvének megőrzése érdekében és az előzetes verifikációs eredmények ismeretében került meghatározásra és ennek megfelelően a rövid TAF hosszához lett igazítva, azaz 9 órás lett.

IV.3. Az Analytic Hierarchy Process módszer

Az Analytic Hierarchy Process (AHP) módszerének első leírását Thomas L. Saaty adta 1977-ben [163], munkájának alapvető motivációját a döntések pszichológiájának kutatása adta. Az eljárás a többszempontú döntési problémák egy lehetséges megoldását adja, melyet több hazai szerző is részletesen tárgyal [165][166]. A többszempontú döntési probléma lényege, hogy valamely cél elérése érdekében adott alternatívák közül kell választanunk, véges számú szempont figyelembe vételével. A módszer minden olyan esetben jól alkalmazható, amelyben egyértelműen meghatározható a döntés célja és beazonosíthatók a választható alternatívák illetve a kiválasztás során felhasznált szempontok. Ahogyan Temesi és Rapcsák is megmutatja munkáiban [165][166], az AHP módszert szinte az élet minden területén előszeretettel alkalmazzák a döntési problémák megoldására, legyen az akár a megfelelő munkatárs kiválasztása vagy a stratégiai erőforrások felhasználásának priorizálása. Nyilvánvalóan a katonai szakterület sem kivétel ez alól. Ahogyan például Gyarmati [167] és Gyarmati és társai [168] is megmutatták, az AHP metodikája hatékonyan alkalmazható haditechnikai eszközök összehasonlító elemzése, kiválasztása során. Munkáikban rámutatnak, hogy a haditechnikai terület többszempontú döntési problémáira milyen korlátokkal és konkrétan hogyan alkalmazható a szóban forgó eljárás.

Esetünkben a többszempontú döntési probléma meghatározása során a kitűzött célt az aktuális időjárási helyzethez leghasonlóbb esetek kiválasztása jelenti. A kiválasztandó alternatívákat pedig az analóg előrejelzés historikus adatbázisát alkotó több százezer időjárási szituáció adja. A kiválasztás során figyelembe vett szempontokat pedig szakértői konszenzussal kiválasztott, az adatbázis részét képező időjárási változók, azaz az összehasonlítás alapját képező meteorológiai és egyéb paraméterek szolgáltatják. Az alternatívák nagy száma miatt, az AHP módszerből csak a szempontok páronkénti, szakértői konszenzuson alapuló összehasonlításával nyert szempont súlyok szükségesek, amelyeket a szempontok páronkénti összehasonlításával nyert mátrix sajátvektor problémájának megoldásaként kaphatunk meg. Ezek meghatározását a következőkben ismertetem.

Jelentse n azoknak a kiválasztott szempontoknak (ebben az esetben az időjárási szituációkat meghatározó jellemzők) a számát, amelyek esetében szeretnénk meghatározni a w_i súlyokat ahol $i = 1, \ldots, n$ és w_{i} az i-edik szempont fontosságát mutatja. Kiindulásként a szakértői konszenzuson alapuló összehasonlítás alapján, a minden egyes i, j szempontpárra

meghatározott, az i-edik és j-edik szempont fontosságának arányát mutató becslések állnak rendelkezésre. Jelöljük ezeket a_{ij}-vel ahol $i, j = 1, \ldots, n$. Természetesen $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$.

Meg kell jegyeznünk, hogy például az $a_{ij}a_{jk} = a_{ik}$ egyenlőség nem feltétlenül igaz. A példa kedvéért tegyük fel, hogy az első szempont kétszer fontosabb, mint a második, és a második szempont kétszer fontosabb, mint a harmadik. Ennek ellenére az első szempont csak háromszor fontosabb, mint a harmadik a szakértői becslés alapján. Ilyen helyzetekben nem is elvárható, hogy a súlyok tökéletesen pontosan visszaadják az eredetileg megadott fontossági arányokat. A cél az, hogy olyan w_i súlyokat találjunk, amelyek minimalizálják az a_{ij} becslések és a $\frac{w_i}{w_j}$ valós fontossági arányok különbségét.

Jelölje $\mathbf{A}$ a fontossági arányok $n \times n$ mátrixát. Ha ez a pozitív reciprok mátrix konzisztens, azaz az $a_{ij}a_{jk} = a_{ik}$ egyenlőség teljesül, akkor a keresett $\mathbf{w} = (w_1, \ldots, w_n)$ súlyvektor az $\mathbf{A}$ mátrix az n sajátértékhez tartozó sajátvektora. Más szavakkal: $\mathbf{Aw} = n\mathbf{w}$ és ebben az esetben n a maximális sajátérték.

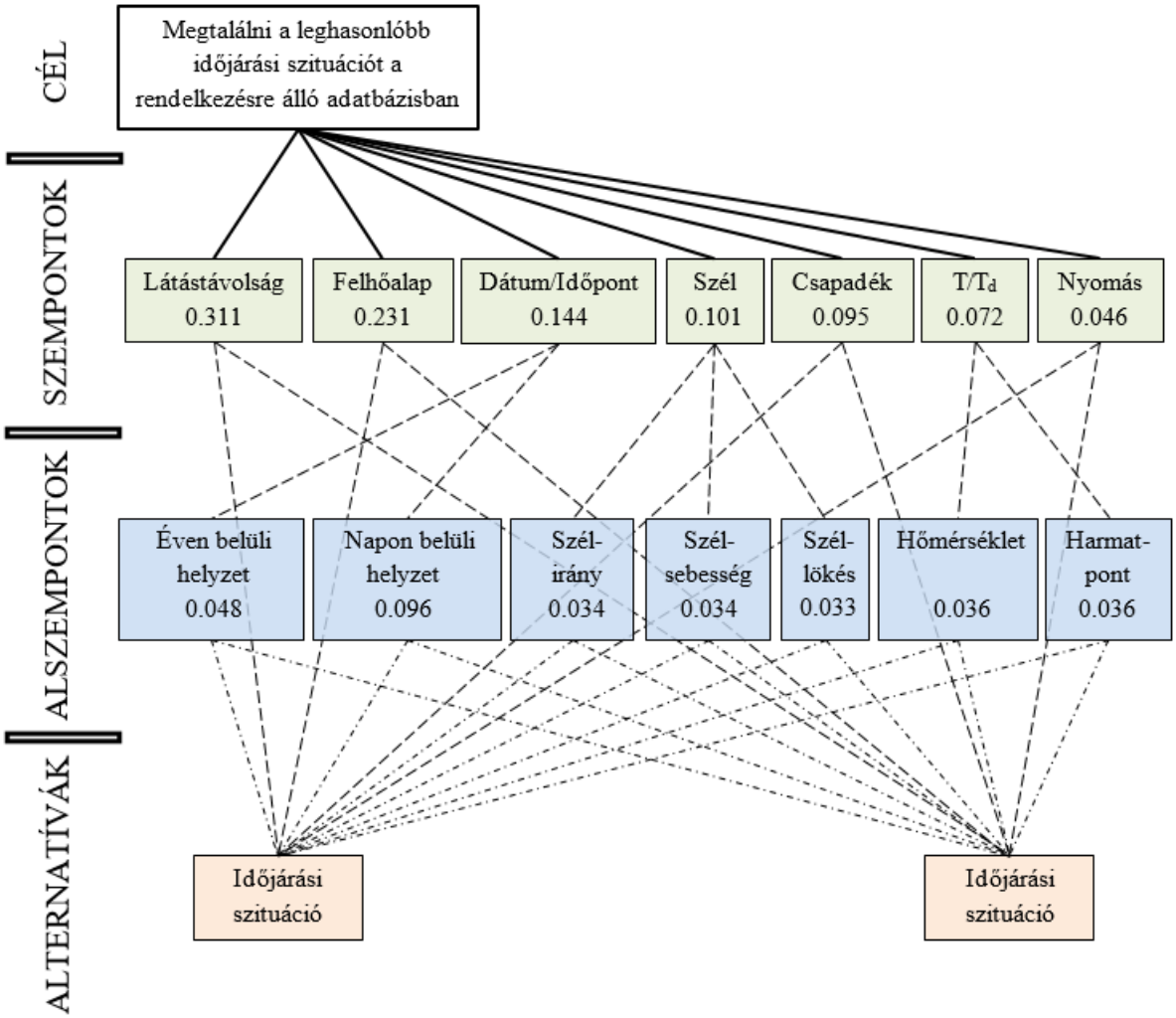
Saaty bebizonyította, hogy egy $\mathbf{A}$ pozitív reciprok mátrix akkor és csak akkor konzisztens, ha $\lambda_{max} = n$ ahol λ_{max} a mátrix maximális sajátértékét jelöli. Továbbá azt is bizonyította, hogy a páronkénti összehasonlítás mátrix inkonzisztenciája esetén a λ_{max} maximális sajátértékhez tartozó sajátvektor adja a súlyvektor legjobb becslését, mivel ez minimalizálja az a_{ij} és $\frac{w_i}{w_j}$ arányok különbségét [163].

A fentieket felhasználva Saaty alábbi eljárása került alkalmazásra:

- a szakértői összehasonlítás alapján meghatározott a_{ij} ahol $i, j = 1, \ldots, n$ fontossági arányokból kialakítható az $\mathbf{A}$ mátrix;
- az $\mathbf{A}$ mátrix alapján iterációs módszerrel meghatározható a λ_{max} maximális sajátértékhez tartozó $\mathbf{w_{max}}$ sajátvektor;
- majd a $\mathbf{w_{max}}$ sajátvektor normálásával előállítható a keresett $\mathbf{w} = (w_1, \ldots, w_n)$ súlyvektor, ahol w_i értékek az i-edik szempontok súlyát adják meg.

Az összehasonlítás során alkalmazott szempontok viszonylag nagy számára tekintettel a kívánt sajátvektor meghatározása egy standard iterációs módszer, a hatványmódszer alkalmazásával valósult meg. Az így megkapott szempontonkénti súlyokat és a probléma AHP módszer szerinti hierarchizálását a 31. ábra mutatja be. Ahogyan a fentiekben is megmutattam és az ábrán is látható, a többszempontú döntési probléma megoldásának a célja a leghasonlóbb időjárási

szituációk megtalálása a rendelkezésre álló adatbázisban. Ebből következik, hogy az alternatívákat az időjárási szituációk, azaz repülésmeteorológiai jelentések (METAR táviratok) formájában testet öltő észlelési adatok jelentik. A szakértői páros összehasonlítások kizárólag az elsődleges szempontok felhasználásával történtek meg annak érdekében, hogy a vizsgálati kritériumok számát a lehető legalacsonyabban lehessen tartani, hiszen a fontossági arányokat tartalmazó mátrix konzisztenciájának megőrzése így lényegesen egyszerűbben kivitelezhető. Ennek köszönhetően az inkonzisztencia értéke mindössze 2,5% lett, ami jóval a Saaty által elfogadhatónak tartott 10%-os szint alatt található [169], ami egyben azt is jelenti, hogy a kapott súlyok alkalmazhatósága megfelelő.



31. ábra: Az analógiás előrejelzések problémakörének AHP módszertan szerinti hierarchizálása és a módszer alkalmazásával meghatározott súlyok

Az előzetes szakértői egyeztetések és a részletes repülésklimatológiai vizsgálatok alapján [170][171] végül 7 elsődleges szempont került kialakításra. A 31. ábrán is látható alszempontok az elsődleges kritériumok alapján, szakértői értékelés útján történő felosztással lettek

meghatározva, melynek során az egyes kritériumok egymástól való függősége is értékelésre és figyelembe vételre került.

A páros összehasonlítások a Saaty 1990-es [169] munkájában megadott arányok és a hozzájuk tartozó definíciók alapján kerültek végrehajtásra. A felhasznált definíciókat és a matematikai jelentésüket a 4. táblázat mutatja be. Ahogyan az eredeti munkában is, így ebben a táblázatban is csak a páratlan osztójú arányokhoz kapcsolódnak egyértelműen megfogalmazott definíciók, a páros osztójú arányok köztes értékekként funkcionálnak, az előttük álló és utánuk következő meghatározások átlagaként tekintendők. Saaty szerint az alkalmazott arányok tetszőleges felbontásig finomíthatók, ennek megfelelően kis fontosságbeli különbségek is megadhatók. A munka során a táblázatban szereplő felbontás került alkalmazásra.

Dominancia	**Definíció**	**Arány**
Nincs	Egyenlő fontosságúak	1:1
Gyenge	Köztes érték	1:2
Közepes	Az egyik fontosabb	1:3
Közepes+	Köztes érték	1:4
Erős	Az egyik sokkal fontosabb	1:5
Erős+	Köztes érték	1:6
Nagyon erős	Az egyik nagyon sokkal fontosabb	1:7
Nagyon erős+	Köztes érték	1:8
Teljes	Az egyik extrém módon fontosabb	1:9

4. táblázat: A páros összehasonlítás során alkalmazott definíciók és a matematikai jelentésüket megadó kapcsolódó arányok ([169] alapján)

A páros összehasonlítás célja a korábban már említett pozitív reciprok súlymátrix elemeinek meghatározása. Tekintettel arra, hogy az egyes vizsgálati szempontok fontossága önmagukkal szemben minden esetben 1:1 arányt jelent, ezért a mátrix diagonál elemei csakis 1-esek lesznek, míg az összehasonlítandó paraméterek esetében a főátlóra szimmetrikusan a kapott arány és annak a reciproka helyezkedik el. A páros összehasonlítás keretében meghatározott gyakorlati arányokra az 5. táblázat mutat pár példát.

Összehasonlítandó paraméter	**Arány**	**Összehasonlítandó paraméter**
Csapadék	1:1	Szél
Dátum/Időpont	2:1	Szél
Látástávolság	5:1	Nyomás
Látástávolság	2:1	Felhőalap
Dátum/Időpont	1:2	Felhőalap
…	…	…

5. táblázat: Példa arányok páros összehasonlítás során alkalmazott paraméterek esetében

A mátrix összes elemének meghatározását követően a fentiekben bemutatott eljárás segítségével már egyértelműen kiszámíthatók azok a szempontokhoz rendelt súlyok, amelyek az analóg és így áttételesen a hibrid előrejelzések készítése során is plusz hozzáadott értéket jelentenek a hagyományos eljárásokhoz képest.

IV.4. Hibrid előrejelzés

A szakirodalmi vonatkozások áttekintése után egyértelműen kijelenthető, hogy sem analóg, sem pedig numerikus modellekkel, eljárásokkal nem lehet tökéletes látátávolság előrejelzést készíteni. Mindkettőnek vannak előnyei és hátrányai egyaránt, amelyek az 6. táblázatban kerültek összefoglalásra.

	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 domainen 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

6. táblázat: Az analóg és numerikus előrejelzések tipikus tulajdonságai

Az analóg előrejelzések alapfeltevéséből adódik, hogy a teljesítményük időben gyorsan csökken, így az igazán hatékony előrejelzési időszak hossza mindössze órákra tehető. Ezzel szemben a numerikus előrejelzések teljesítménye lényegesen alacsonyabb ugyan, de időben gyakorlatilag nem változik. Annak köszönhetően, hogy az előrejelzések csak ott verifikálhatók, ahol az ellenőrzéshez szükséges észlelési adatok is rendelkezésre állnak, ezért mindkét típus esetén, ugyanazokon a helyeken elérhetők a verifikációs adatok.

Annak érdekében, hogy a fentiekben említett előnyöket megtartsam, a hátrányokat pedig megpróbáljam eliminálni, egy hibrid előrejelzést alkottam meg [170][100]. Ez az előrejelzés az analóg és a numerikus látástávolság outputok lineáris kombinációjaként a következő módon áll elő:

$$Látástávolság_{Hibrid} = a_j \cdot Látástávolság_{Analóg} + b_j \cdot Látástávolság_{Numerikus} \quad (9)$$

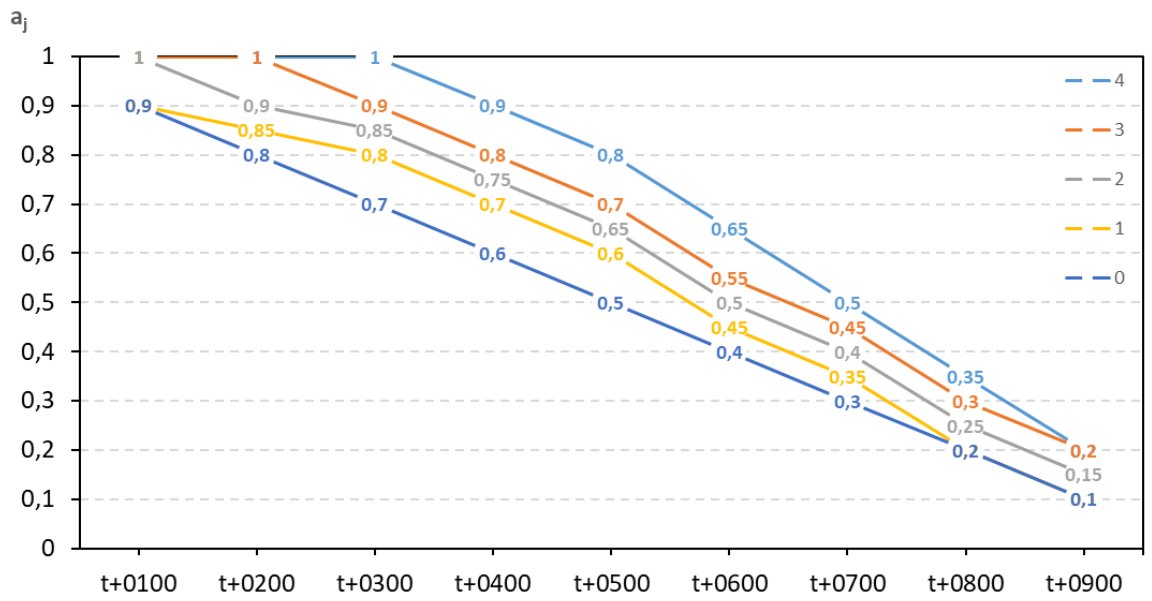
ahol $a_j + b_j = 1$; $a_j, b_j \in [0;1]$ az egyes típusokhoz tartozó súlyok és j az előrejelzés időlépcsőinek a száma. Annak érdekében, hogy a numerikus modell kezdeti pontatlanságait minél nagyobb mértékben korrigálni tudjuk, a t + 0000 időpontban mind az észlelt mind pedig

a numerikusan előrejelzett látástávolság adatokat kategóriákba (0–1000 m; 1000–1500 m; 1500–3000 m; 3000–5000 m; 5000 m–) soroltam. Az a_j súlyokat pedig úgy kerültek meghatározásra, hogy a növekvő kategória különbséggel párhuzamosan növekedjenek. Az analóg és a numerikus rész közötti fokozatos átmenet biztosítása érdekében az előrejelzési időszakban az a_j súlyok monoton csökkenőknek kell lenniük, ellenkező esetben a két előrejelzési módszertan közötti átmenet nem biztosítható. 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 7. táblázatban megtalálható egyszerűsített formában is megadhatók.

		t+0100	**t+0200**	**t+0300**	**t+0400**	**t+0500**	**t+0600**	**t+0700**	**t+0800**	**t+0900**
Abszolút kategória 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

7. táblázat: A hibrid előrejelzés összeállításánál alkalmazott a_j súlyok.

A táblázat elemeit részletesen áttekintve illetve grafikonon ábrázolva (32. ábra) láthatjuk, hogy a különböző abszolút kategória különbségekhez tartozó súlyok nagyjából hasonló lefutást biztosítanak, de a kategória különbség növekedésével egyre késleltetett indulással. Ennek az a célja, hogy azokban az esetekben, amikor a numerikus modell már a *t+0000* időpontban is jelentős eltérésben van a valós mérési eredményekhez képest, akkor a következő órák nagy valószínűséggel hibás előrejelzései is kisebb súllyal és időben is később legyenek figyelembe véve.



32. ábra: Az a_j súlyok időbeli változása az abszolút kategória különbségek függvényében

A hibrid előrejelzés egyik legfőbb előnye abban mutatkozik meg, hogy amennyiben az előrejelzés módosításra szorul, azaz az időjárás nem a vártnak megfelelően alakul, 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.

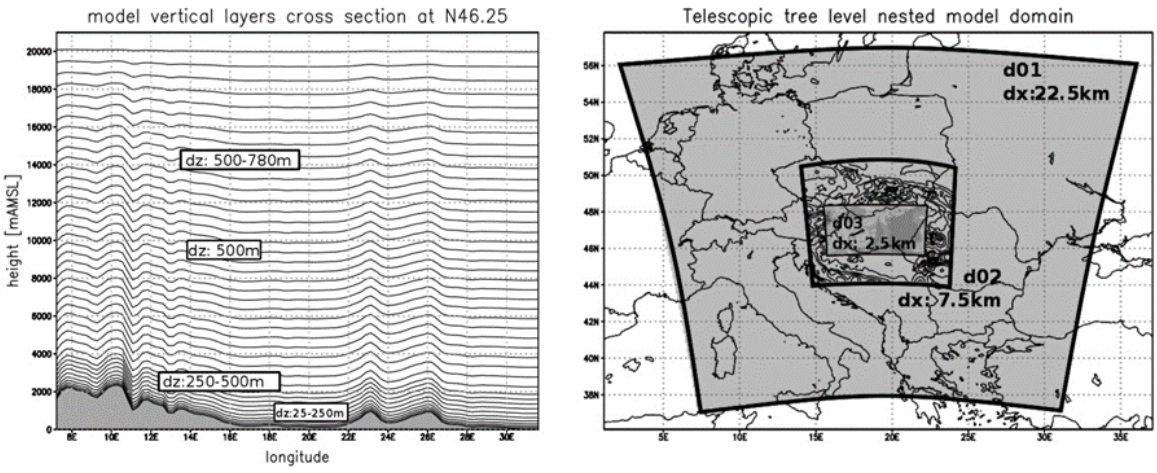
IV.5. Felhasznált adatok

Ahogyan az előző fejezetek alapján is egyértelműen látható, az analóg előrejelzések készítéséhez nélkülözhetetlen egy arra alkalmas adatbázis. Ráadásul az analóg produktumokon keresztül részben ez szolgáltatja a hibrid előrejelzések alappillérét is. Az adatbázis alapját a rendszeres repülőtéri észlelő táviratok, azaz a METAR-ok adják [171]. Bár a METAR táviratok nem minden esetben a legpontosabb formában tartalmazzák az egyes meteorológiai paraméterek 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. Megfelelő mérési eredmények rendelkezésre állása esetén akár műveleti területen is rövid időn belül és komolyabb technikai előkészületek nélkül alkalmazásra kerülhet a bemutatott eljárás.

Az adatbázisban szereplő egyedi adatok jelentős része meteorológiai szenzorok méréseiből származik (pl.: hőmérséklet, harmatpont, szélirány, szélsebesség, stb.), de nem elhanyagolható a vizuális észlelések szerepe sem (pl.: uralkodó látástávolság, szignifikáns időjárás, stb.). Ugyanakkor azt meg kell jegyeznünk, hogy napjainkban már a látástávolság műszeresen mért értékei is rendelkezésre állnak (MOR – Meteorological Optical Range, RVR – Runway Visual Range), de az ezekből elérhető adatsorok hossza hazánkban még nem alkalmas analóg előrejelzési alkalmazásra. A vizuális észlelésekkel kapcsolatban meg kell jegyeznünk, hogy a jelentő táviratokban szereplő repülésmeteorológiai szempontból kritikus paraméterek szinte mindegyike ilyen forrásból származik. Hazai viszonylatban sajnos mindössze 4 repülőtér esetében állnak rendelkezésre ilyen típusú adatok megfelelő hosszúságban és időben folytonosan rendelkezésre. Ez egyben azt is jelenti, hogy a sok esetben gazdaságossági szempontok vezérelte automatizálás az analógiás elven alapuló látástávolság előrejelzések alkalmazásának lehetőségeit is beszűkítette, hiszen ezzel jelentősen csökkent a számbavehető repülőterek száma. Szerencsére a katonameteorológiai prioritások és megfontolások, valamint a Magyar Honvédséggel szemben támasztott műveleti követelmények eredményeként a működő katonai repülőterek folyamatos észlelési rutin mellett üzemelnek, így az analóg és hibrid előrejelzések készítése sem kerül veszélybe a hiányzó vizuális megfigyelési adatok miatt. A fentieknek megfelelően a három katonai repülőtér (Pápa, Kecskemét, Szolnok) mellett kizárólag Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtéren elérhető hasonló adatbázis a vázolt előrejelzések készítéséhez. Innen az adatbázisban lévő adatok 2005. január 1-től, míg a katonai repülőterek esetében 2005. augusztus 1-től elérhetők. Ez egyben azt is jelenti, hogy napjainkra már körülbelül 15 éves adatsor áll rendelkezésre a leghasonlóbb időjárási szituációk keresésére.

Maga az adatbázis 2012-ben került létrehozásra [171][172] az addig rendelkezésre álló észlelési adatok felhasználásával. A METAR táviratokból származó információk folyamatos és automatikus hozzáfűzéséből adódóan az adatbázis rendszeres időközönként bővül. Az esetleges adathiányok, adatkimaradások visszapótlása szintén folyamatos, aminek köszönhetően az adatok rendelekzésre állása közel 100%-os. Az így kialakított adatbázisnak kezdetben kettős szerep volt szánva: egyrészt alapadatokat szolgáltatni a repülésklimatológiai elemzésekhez és az egyedi felhasználói adatigényeket teljeskörűen kiszolgálni, másrészt az analógiás elvű előrejelzések számára megbízható, releváns adatokat szolgáltatni a leghasonlóbb időjárási szituációk megtalálásához. Az előbbi funkció még ma is az eredeti elképzelésekek megfelelően működik és lehetőséget nyújt az adatbázisban megtalálható nyers és származtatott (pl.: felhőalap magasság) információk lekérdezésére, letöltésére. Az utóbbi funkció esetében azonban a METAR táviratokat feldolgozó és adatbázisba helyező algoritmusok az eredeti szerepükkel párhuzamosan bekerültek az analóg előrejelzések alkalmazott eljárásaiba. Ez esetünkben azt jelenti, hogy az analóg előrejelzéseket készítő program aktuális időjárási szituációt jellemző észlelési adatai és a historikus információk is nyers távirati formában kerülnek beolvasásra, kiküszöbölve ezzel a METAR–adatbázis–analóg eljárás hármas középső elemét jelentősen egyszerűsítve a különböző platformok közötti kommunikációt. Vagyis az analóg előrejelzések elkészítéséhez csak és kizárólag METAR távirat alapú információk felhasználására van szükség.

A hibrid előrejelzés ahogyan a korábbiakban bemutattam, az analóg modell kiemeneti eredményeit a numerikus modell outputokkal kombinálja. Ehhez nyilvánvalóan rendszeres időközönként numerikus modellfuttatásokra és az abból származó eredményekre van szükség. Bottyán és társai komplex munkájárára [100] alapozva a hibrid modellben az általuk fejlesztett és deklaráltan repülésmeteorológiai felhasználókra és célokra optimalizált numerikus modell produktumai lettek felhasználva. Alapként munkájukban a numerikus prognosztikai körökben közkedvelt WRF (Weather Research and Forecasting) modellt használták fel, amelynek mind vertikális, mind pedig horizontális felbontását (33. ábra) azoknak az időjárási jelenségeknek az előrejelezhetőségéhez optimalizálták, amelyek a repülésmeteorológiai szakterületen a legnagyobb kihívásokat jelentik prognosztikai szempontból. Ezen felül többek között a felszínborítottsági adatok és az alkalmazott talajtípusok is pontosításra kerültek, kiegészítve mindezt a parametrizációs sémák egy optimális kombinációjával.



33. ábra: A numerikus modell változó vertikális felbontása (bal oldal) és az egymásba ágyazott egyre finomabb felbontású (rendre 22,5; 7,5 és 2,5 km) modell domainek [100]

A rendszer finomhangolása során az említett bementi adatok és az alkalmazott parametrizációs sémák 30 különböző változatát vizsgálták meg célzott esettanulmányok segítségével 9 tipikus időjárási helyzetre ellenőrízve a modellfuttatások eredményeit. Ennek ellenőrzése során a d02 domainre eső 4 magaslégköri szondázó állomás mérési adatait valamint 31 hazai szinoptikus állomás megfigyeléseit használták fel. A modell pontos felépítésének és a verifikációnak a részletei elérhetők Bottyán és társai idézett cikkében [100].

Az így kialakított korlátos tartományú numerikus előrejelző modell napi két alkalommal történő futtatása biztosítja a hibrid előrejelzésben a látástávolság prognózisa során szükséges adatokat. Mivel a látástávolságra vonatkozó nyers numerikus modell kimenet megbízhatósága jelentősen az elvárt szint alatti, ezért a Wantuch által fejlesztett, a korábbi fejezetekben bemutatott, döntési fa alapú utófeldolgozási eljárás [79] kimenő adatai kerülnek végül be a hibrid előrejelzésbe.

IV.6. Következtetések

Ebben a fejezetben bemutattam a katonai repülés meteorológiai támogatásához kialakított látástávolság előrejelző eljárások konstrukciós hátterét, a módszer kifejlesztése és alkalmazása során felhasznált eljárások módszertani leírását. Ezek során a szakirodalmi vonatkozásokat is figyelembe véve részletesen kitértem az analógiás elven alapuló prognosztikai eljárás működésére, alaposan kifejtve az AHP módszer felhasználásának részletkérdéseit is. A numerikus és analóg előrejelzések kombinációjaként bevezettem a hibrid előrejelzéseket, amelyek az előbbi eljárások kombinációjaként állnak elő.

Végül a fejezetben kitértem a felhasznált adatok kérdésére is, melynek során tisztáztam, hogy a tisztán analóg előrejelzések kizárólag METAR táviratokat igényelnek bementi adatokként, ami egyben azt is jelenti, hogy amennyiben historikus adatbázis rendelkezésre áll, akkor az előrejelző módszer szinte átalakítás nélkül alkalmazható. Ebből következik, hogy műveleti környezetben is könnyen adaptálható a fenti adatok elérhetősége esetén, ami az általában adathiányos területeken (korlátos tartományú modell outputok) nagy értékkel bír.

A kidolgozott módszerek szemi-operatív futtatása biztosított, amelynek eredményeihez a Magyar Honvédség meteorológiai támogató elemei kísérleti jelleggel hozzáférnek. A Zrínyi 2026 átfogó haderőfejesztési program keretein belül a katona meteorológiai szakterület szakmai vezetése az operatív numerikus modellfuttatások hardver hátterének biztosításával párhuzamosan az analógiás és hibrid előrejelző eljárások gyakorlati adaptálását is tervezi.

V. A LÁTÁSTÁVOLSÁG ELŐREJELZŐ MÓDSZEREK ÖSSZEHASONLÍTÓ VERIFIKÁCIÓJA

V.1. A verifikációs módszer bemutatása

V.1.1. BEVEZETÉS

Az idegen szavak szótárában a verifikáció címszó alatt a következő jelentéseket találjuk: igazolás, megerősítés, ellenőrzés és felülvizsgálás. A felsorolt jelentések mindegyike arra utal, hogy amikor verifikációról beszélünk, akkor egy olyan értékelő, kontextusba helyező folyamatról van szó, ami egy megtörtént eseményre vagy bekövetkezett tényre vonatkozó állítás és az eredeti, valós állapot kapcsolatát vizsgálja. Ha a meteorológiai szakterületre szűkítjük le a jelentését, akkor ebben a vonatkozásban verifikáció alatt egy adott előrejelző séma, egy modell vagy maga az előrejelző által készített előrejelzési produktum beválásának, előrejelzési hatékonyságának értékelését értjük. Ez utóbbi definícióban az „értékelés" kifejezést tetszőlegesen helyettesíthetjük a fentiekben felsorolt, az idegen szavak szótárában található jelentésekkel. Bár ez árnyalatnyi különbségekhez vezet a definíció pontos értelmezésében, ugyanakkor jól reflektál a verifikáció összetettségére, így a valósághoz jobban közelítve adja vissza annak pontos jelentését. A korábbi analógiát követve, ebben az esetben az állítás maga a meteorológiai előrejelzés, a bekövetkezett esemény pedig az időjárás alakulása az előrejelzés érvényességi időszakában.

Napjainkban már közhelyszerű, de talán mégis Doswell szavai mutatják meg a verifikáció igazi értelmét: „… egy előrejelzés, amit nem verifikálnak, az annyit is ér."[3] [173] Az idézett mondat ugyanis rávilágít arra, hogy az előrejelzési munkafolyamat nem érhet véget magának az előrejelzésnek az elkészítésével vagy kiadásával, terjesztésével. Hiszen ebben az esetben nem lenne lehetőség az előrejelzések minőségének, jóságának nyomon követésére, azaz nem lehetne tudni, hogy a szóban forgó előrejelzések milyen pontosak és hogy például az említett jellemzők mutatnak-e időbeli függést. Nem lenne lehetőség a különböző előrejelzések, előrejelzési eljárások összehasonlító értékelésére, elemzésére, azaz indokolható módon nem lehetne kiválasztani egy adott feladat kiszolgálására legalkalmasabb prognosztikai sémát, eljárást. Ráadásul nem lenne érdemi lehetőség az előrejelzések javítására sem, ugyanis ahhoz, hogy valamit jobban csináljunk, előbb tudnunk kell, hogy mit csinálunk rosszul vagy kevésbé jól.

---

[3] „… a forecast not verified is a forecast not worth much."

A fenti példák alapján a verifikáció általános céljai a teljesség igénye nélkül az alábbi pontokban foglalhatók össze:

- az előrejelzések beválásának nyomon követése;
- az előrejelzések, előrejelzési munkafolyamatok szisztematikus hibáinak feltárása;
- az előrejelzések, előrejelzési munkafolyamatok javítása, fejlesztése;
- azonos típusú előrejelzések összehasonlítása;
- különböző típusú előrejelzések, eljárások összevetése;
- az előrejelzői munka minőségi értékelése;
- kutatási, fejlesztési eredmények validálása, igazolása.

Jelen értekezés vonatkozásában az utolsó pontban rögzített célok a legfontosabbak. Az elért tudományos eredmények igazolása és a felállított tézisek bizonyítása ugyanis objektív, független értékelés alapján kell, hogy megvalósuljon. Ennek érdekében egy olyan verifikációs módszertant alakítottam ki, amely lehetővé teszi az előrejelzési produktumok vagy előrejelzett paraméterek objektív módon összehasonlítható, részletes minőségi ellenőrzését. A módszertan kialakításánál négy fő alapelvet fogalmaztam meg, amely biztosítja a kitűzött célok megvalósíthatóságát. A Magyar Honvédség repülésmeteorológiai produktumainak kiértékelése során is az alábbiakban részletesen bemutatott verifikációs eljárást és a következő alapelveket alkalmazzák:

- Összehasonlíthatóság – a verifikációs módszertant úgy kell megválasztani, hogy az azonos paraméterre vonatkozó, hasonló típusú és bázisidejű előrejelzési produktumok függetlenül a készítő szervezettől, a készítő személyétől és a készítés helyétől azonos verifikációs módszertant követve verifikációs paramétereikben összevethetők legyenek;
- Függetlenség – a verifikációs módszertant úgy kell megválasztani, hogy az előrejelzési munkafolyamat vagy az előrejelzés készítése során alkalmazott eljárások és az alkalmazott verifikációs paraméterek között ne legyen konkrét értékhez kötődő direkt kapcsolat, valamint az alkalmazott módszertant olyan szervezeti egység hajtsa végre, amely az előrejelzési munkafolyamat egyetlen szakaszában sem érintett;
- Objektivitás – a verifikációs módszertant úgy kell megválasztani, hogy a verifikáció végrehajtása során felhasznált paraméterek értékei objektív mérési, megfigyelési adatokból származzanak;
- Feladatorientáltság – a verifikáció során törekedni kell arra, hogy az előrejelzés közvetlen felhasználói által alkalmazott időjárási paraméterekhez kapcsolódó műveleti határértékek ellenőrzésre és részletes kiértékelésre kerüljenek.

A felsorolt alapelvek előrevetítik, hogy ez a módszertan – a későbbiekben részletesen tárgyalásra kerülő – kategorikus előrejelzések verifikációján keresztül valósítható meg. Ennek esetében ugyanis a szabadon megválasztható kategóriahatárok egyrészt garantálják, hogy az előrejelzési munkafolyamat ne legyen hozzáigazítható a verifikációs metodikához, másrészt így a kategória határoktól való függőség is kontrollálható. Ráadásul ez a függetlenség alapelve mellett a feladatorientáltság követelményét is kielégíti, hiszen a szabadon megválasztható kategóriahatárok segítségével tetszőleges műveleti határérték ellenőrizhető.

Mielőtt azonban részletesen bemutatnám az alkalmazott eljárást és a felhasznált adatokat, fel kell, hogy hívjam a figyelmet az esetleges hiányosságaira is. A verifikációs metódus ugyanis az előrejelzések jóságának típusai közül nem alkalmazható mindegyik esetében. A meteorológiai előrejelzések verifikációjának kiváló szakértője, Allan H. Murphy [174] az előrejelzés jóságának három alapvető típusát azonosítja:

- Minőség;
- Érték;
- Konzisztencia.

Ezeknek az azonosított típusoknak a segítségével közelebb kerülhetünk ahhoz, hogy pontosan megértsük, hogy mit is jelent egy jó előrejelzés. Az élet számos területéhez hasonlóan az értékelés a repülésmeteorológiában is sok esetben relatív. Az előrejelzők és a felhasználók gyakran ellentétes érdekek, érvrendszer mentén ellenőrzik a produktumokat, így esetenként az előrejelzések jóságának értékelése is eltérő lehet. Az előrejelzők nézőpontjából tekintve a legfontosabb típusként a minőséget azonosíthatjuk. Az előrejelzés minősége azt mutatja meg, hogy az előrejelzett és a valóságban bekövetkezett viszonyok között milyen kapcsolat, hasonlóság van. Minél közelebb állnak a valósághoz az előrejelzésben foglalt információk, annál jobb az előrejelzés minősége. A fentiek alapján következik, hogy az alkalmazásra kerülő verifikációs eljárás alkalmas az előrejelzés jóságnak vizsgálatára, hiszen objektív verifikációs paraméterek segítségével és szabadon választott határértékek alkalmazásával történik a produktumok értékelése.

Az előrejelzések értékének megítélésében azonban már nem ilyen egyértelmű a helyzet. Az előrejelzések értékét elsősorban a felhasználói szempontokat figyelembe véve határozzák meg. Konkrétabban megfogalmazva: egy előrejelzést értékesnek tartunk, ha a döntéshozatali folyamat során való felhasználása a felhasználó számára valamilyen előnnyel jár. Értelemszerűen minél nagyobbak a realizált előnyök, annál nagyobb értéket képvisel maga az

előrejelzés is. Ezen előnyöknek azonban csak egy része számszerűsíthető. Ezek közé tartoznak például azok a gazdasági előnyök, ahol pénzben egyértelműen meghatározhatók az előrejelzés felhasználásából adódó többletbevételek vagy elmaradt kiadások. Ilyen számszerűsíthető előnyök lehetnek továbbá a javuló kihasználtsági vagy üzemeltetési statisztikák, amelyek azonban már nem biztos, hogy közvetlen gazdasági előnyökkel is járnak. Mindemellett számos olyan terület van, ahol direkt módon, számokkal nem támaszthatók alá a realizált előnyök. Ezeken a területeken az alkalmazásra kerülő verifikációs eljárás nyilvánvalóan nem alkalmas az előrejelzés értékének vizsgálatára. Ebben az esetben olyan alternatív értékelő eljárások alkalmazása szükséges, amelyekkel a feltételezett érték, ha csak közvetett úton is, de igazolható.

Az előrejelzések jóságának típusai közül talán a konzisztencia az, amelyik a legnehezebben értelmezhető és vizsgálható. A konzisztencia ugyanis az előrejelzőnek az előrejelzési folyamatban tanúsított következetességét jelenti, azaz azt mutatja, hogy milyen szoros összefüggés van az előrejelző belső helyzetértékelése, analízise valamint a kiadott előrejelzés tartalma között. Itt a belső helyzetértékelés alatt azt az előrejelzőben kialakult összképet értjük, amit a rendelkezésére álló információhalmazon alapulva legjobb tudása szerint kialakított. A Murphy által megfogalmazott alapelv szerint az elvárt előrejelzésnek mindig összhangban kell lenni az előrejelző értékítéletével, helyzetértékelésével [171]. Elvárt előrejelzés alatt, az olyan előrejelzést értjük, amely minden olyan információt tartalmaz, ami a felhasználó döntéshozatali mechanizmusában releváns lehet. Nyilvánvalóan a konzisztencia vizsgálatának eleve csak előrejelzők által készített produktumok esetén van értelme. Ugyanakkor az objektív vizsgálat még ezekben az esetekben is rendkívül nehézkes, ugyanis az előrejelzői helyzetértékelés teljeskörű feldolgozása nem lehetséges, hiszen annak számos vetülete csak az előrejelző tudati szintjén jelenik meg.

A fentiek alapján összefoglalható, hogy a bemutatásra kerülő verifikációs eljárás feltételek nélkül csak a vizsgált előrejelzések minőségének ellenőrzésére alkalmas. Az előrejelzések értékének meghatározását adott statisztikai mutatók esetében egy összetettebb értékelő folyamat valószínűleg lehetővé tenné, ugyanakkor az előrejelzések bázisidejéhez mérhető részletességű információ elérésének hiányában ennek elméleti lehetősége sem adott. Mivel a vizsgálni kívánt produktumok közül egyedül a repülőtéri időjárás előrejelző táviratok (TAF) készültek előrejelzői közreműködéssel, ezért az összehasonlíthatóság alapelvének megőrzése érdekében az előrejelzések konzisztenciájának vizsgálatától, a korábbiakban említett okokat is figyelembe véve teljes mértékben eltekintek.

V.1.2. FELHASZNÁLT ADATOK

Annak érdekében, hogy a fenti bevezetőben meghatározott alapelvek ne sérüljenek, mindenekelőtt meg kellett vizsgálni a verifikáció során felhasználni kívánt adatok körét. A cél ugyanis az volt, hogy a verifikációt a lehető legnagyobb időbeli gyakorisággal és a lehetséges legkisebb időlépcső mellett kell megvalósítani. Ezeknek a meghatározásához jó alapot nyújt a 8. táblázat, amely a verifikáció tárgyát képező előrejelzési produktumok alapvető tulajdonságait foglalja össze.

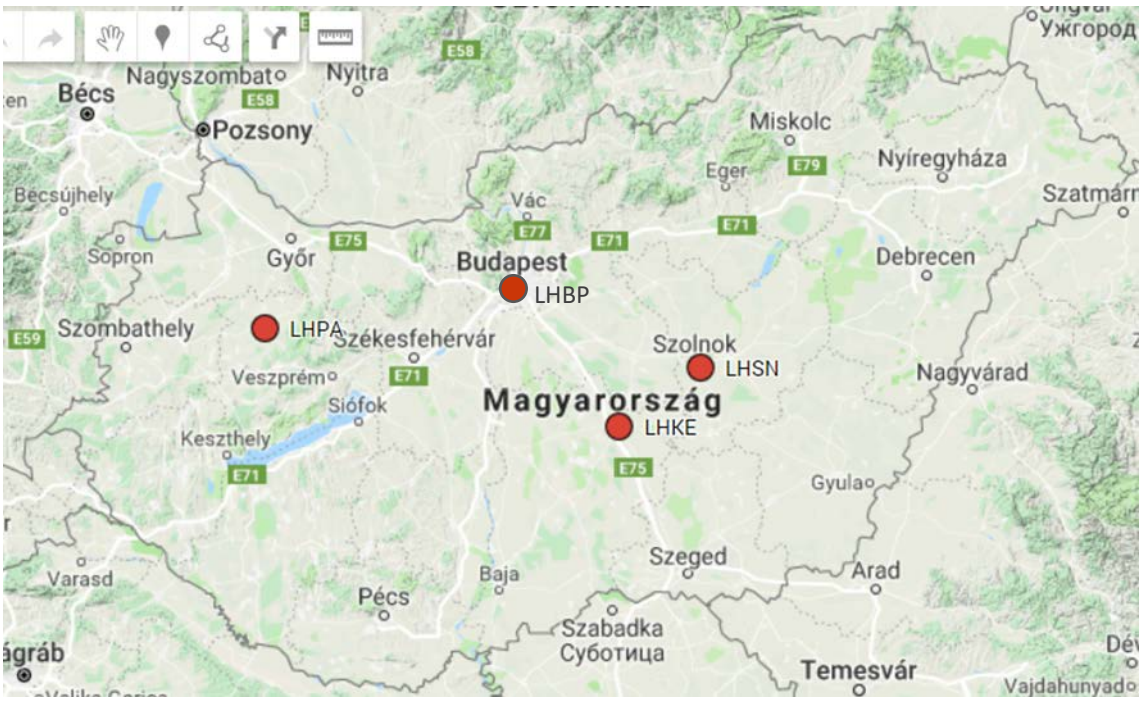
Előrejelzési produktum	Feldolgoz-e METAR táviratot?	Frissítési gyakoriság	Előrejelzés tipikus időlépcsője	Előrejelzés hossza
Numerikus előrejelzés	nem	12 óra	1 óra	36 óra
Analóg előrejelzés	igen	½ óra	½ óra	9 óra
Hibrid előrejelzés	igen	½ óra	1 óra	9 óra
TAF távirat	nem	3-6 óra	1 óra	9-30 óra
Perzisztencia előrejelzés	igen	½ óra	½ óra	tetszőleges

8. táblázat: Az előrejelzési produktumoknak a verifikációs eljárás kialakítása során figyelembe vett információi

Az objektivitás alapelvének megtartása érdekében a vizsgálni kívánt előrejelzések verifikációja során a látástávolság előrejelzések beválását az időben hozzájuk tartozó METAR táviratokból kinyerhető megfigyelési adatokkal ellenőriztem. Ahogyan az 8. táblázatból is látszik, több előrejelzési produktum támaszkodik részben vagy egészben a METAR táviratokra, ezért a korábbi fejezetekben bemutatott METAR adatbázist (2005.08.01-2014.07.31) két egymástól független részre osztottam. Itt egyrészt alapvető cél volt egy hosszabb verifikációs időszak kijelölése annak érdekében, hogy az esetleges rövidtávú fluktuációk kiküszöbölésre kerüljenek. Másrészt a kijelölt időszaknak összhangban kellett lenni az előrejelzési produktumok rendelkezésre állásával is. Ennek megfelelően egy egyéves verifikációs periódus (2013.08.01-2014.07.31.) került kijelölésre, ami egybeesik a numerikus modell kezdeti operatív időszakával.

Az analóg és áttételesen a hibrid előrejelzés hasonlósági adatbázisául pedig a 2005.08.01-2013.07.31 közötti időszak szolgált.

A vizsgálat tárgyát azon repülőterek előrejelzései adták, amelyeken folyamatos mérési, megfigyelési adatprogram működik, e nélkül ugyanis az előrejelzések ellenőrzése nem megoldható. A verifikációs periódus időtartama alatt ennek a feltételnek a három aktív katonai repülőtér (Pápa, Kecskemét, Szolnok) és a budapesti nemzetközi repülőtér felelt meg. A vizsgált repülőterek földrajzi elhelyezkedését a 34. ábra szemlélteti.



34. ábra: A vizsgált repülőterek földrajzi elhelyezkedése (Pápa – LHPA; Budapest – LHBP; Kecskemét – LHKE; Szolnok – LHSN; Forrás: Google térkép)

Az előrejelzések hosszát és frissítési gyakoriságát figyelembe véve a verifikáció időbeli léptetését a TAF táviratok kiadási rendjéhez igazítottam, emiatt Szolnok (LHSN) és Kecskemét (LHKE) esetén három óránként, míg Pápa (LHPA) és Budapest (LHBP) esetén hat óránként került az összes előrejelzés kiértékelésre. A frissítési gyakoriság a numerikus előrejelzés esetében ugyan csak 12 óra, de az előrejelzés hossza lehetővé teszi, hogy a vizsgált kilencórás periódus látástávolság adatai előállíthatóak legyenek nagyobb gyakoriság mellett is. Bár ugyanez a hosszú TAF táviratok esetén is megvalósítható lenne, ezek esetében az összehasonlíthatóság alapelvének megőrzése érdekében a nagyobb gyakoriság lehetőségétől eltekintettem. A fentiekből következik, hogy az előrejelzések ideje nem mindegyik produktum és/vagy nem mindegyik kiindulási időpont esetén egyezik meg az időelőnnyel (lead time). Ezért a továbbiakban következetesen az előrejelzések ideje kifejezést fogom alkalmazni, ami az

előállított kilencórás előrejelzés óráira utal, függetlenül az adott előrejelzés alapjául szolgáló numerikus vagy egyéb produktum készítési idejétől.

Az előrejelzések időlépcsője a produktumok többsége esetében egyértelműen meghatározható. A numerikus tagot részben vagy egészben tartalmazó előrejelzések a modell kimeneti időlépcsőjének megfelelő egyórás időlépcsővel rendelkeznek. A METAR táviratokon alapuló predikciók időlépcsője pedig a METAR táviratok gyakoriságához igazodik, azaz fél óra. Az egyetlen kivételt a TAF táviratok jelentik, ahol az amúgy tipikus egyórás előrejelzési periódusoknál rövidebb, azok határait figyelmen kívül hagyó változást jelentő csoportok alkalmazására is van lehetőség. Mivel azonban a TAF táviratok esetén a későbbiekben részletesen bemutatásra kerülő összetettebb eljárást alkalmaztam, ami az órás periódusok helyett pillanatnyi értékek kiértékelését hajtja végre, ezért tipikus időlépcsőként itt is alkalmazható az egyórás időtartam. Ennek megfelelően az egyes előrejelzések elemi időlépcsőinek legkisebb közös többszöröseként előálló 1 órát határoztam meg az általános verifikációs időlépcsőként, hogy az összehasonlíthatóság alapelve ez esetben is tartható legyen.

A fentieket összefoglalva tehát a verifikációt a megadott egyéves periódus minden harmadik (LHSN, LHKE) illetve minden hatodik (LHBP, LHPA) órájában kezdődő kilencórás előrejelzésre órás időlépcsővel hajtottam végre. Ez az előbbi esetben az éjszakai TAF kimaradása miatt napi hét, az utóbbi esetben pedig napi négy alkalmat jelent. Mivel az analóg előrejelzések esetében az AHP módszer alkalmazásának hatékonyságát is vizsgáltam, ezért repülőterenként hat egymástól különböző előrejelzés került kiértékelésre. Mindez a sűrűbb, háromórás verifikáció esetén repülőterenként mintegy 140.000, a ritkább esetében pedig közel 80.000, azaz összességében több mint 450.000 egyedi időpont adatainak összehasonlító feldolgozását és elemzését jelentette a verifikációs eljárás során a vizsgált repülőterek esetében.

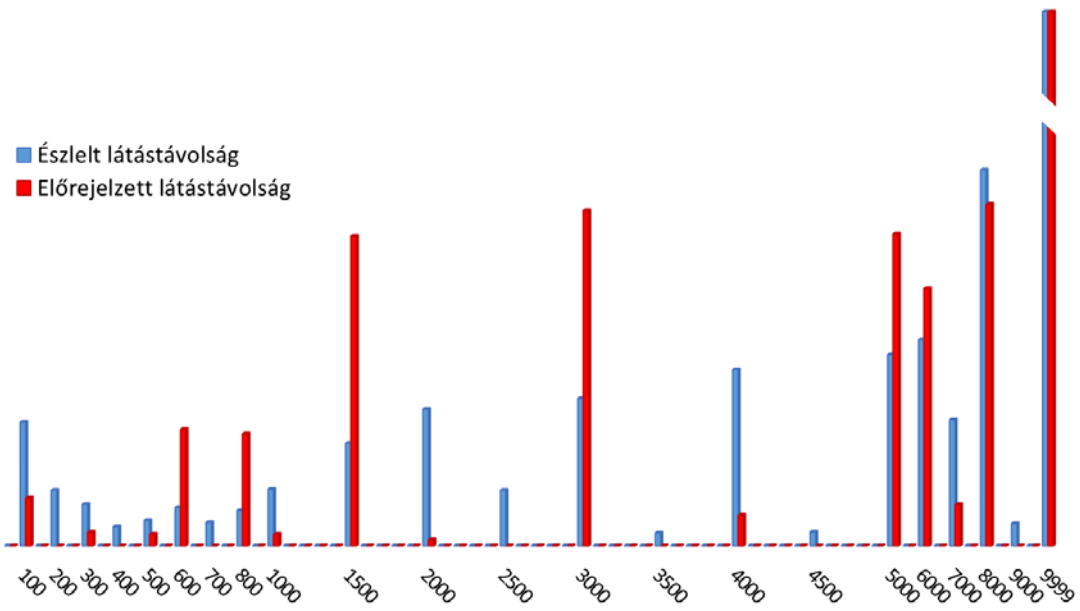
V.1.3. ALKALMAZOTT ELJÁRÁSOK

A meteorológiai elemek verifikációja során számos eljárás áll rendelkezésre a vizsgált előrejelzések természetének és értéktartományának függvényében. A jelen munka során vizsgált előrejelzések mindegyike determinisztikus, az egyetlen kivételt ebből a szempontból a TAF táviratok képezik, ahol a változást jelentő és valószínűségi csoportok probabilisztikus tartalmat adnak az előrejelzésnek. A későbbiekben bemutatásra kerülő, a TAF táviratok esetében alkalmazott saját fejlesztésű verifikációs eljárás segítségével azonban ezek az előrejelzések is tisztán determinisztikus természetűként kezelhetők. Ennek köszönhetően az összehasonlíthatóság alapelve tartható, a különböző látástávolság előrejelzéseket így ugyanazzal a módszertannal tudom ellenőrizni.

A horizontális látástávolság, mint meteorológiai változó az értéktartomány szempontjából folytonosnak tekinthető, ugyanakkor mind az észlelési és előrejelzési (TAF) előírásoknak, mind pedig a végrehajtási gyakorlatnak köszönhetően a valóságban a látástávolság csak adott diszkrét értékeket vesz fel. Az ICAO Annex 3 előírásai [18] szerint mind a METAR és SPECI, mind pedig a TAF táviratokban az uralkodó látástávolság tekintetében a következő előírásokat kell figyelembe venni:

- ha a látástávolság kevesebb, mint 800 méter, akkor 50 méteres lépésközt kell alkalmazni;
- ha a látástávolság legalább 800 méter, de kevesebb, mint 5000 méter, akkor 100 méteres lépésközt kell alkalmazni;
- ha a látástávolság legalább 5000 méter, de kevesebb, mint 10000 méter, akkor 1000 méteres lépésközt kell alkalmazni;
- ha a látástávolság legalább 10000 méter, akkor 10000 méterként kell megjeleníteni.

Ráadásul az észlelési és előrejelzői gyakorlat igazodik a látástávolság meghatározását szolgáló viszonyítási pontok távolságához, a repülőtér üzemeltetését befolyásoló határértékekhez valamint az alkalmazott SPECI és TAF módosítási kritériumokhoz is [18]. Ennek következményei egyébként jól beazonosíthatók a 35. ábrán, ahol az észlelt és az adott órához tartozó TAF táviratban előrejelzett látástávolságok gyakoriságai a lehetséges látástávolság értékek függvényében kerültek egymás mellett ábrázolásra. Az ábrán mindkét adatsor esetében felfedezhető a folytonosság hiánya illetve jól azonosíthatók a preferált értékek is.



35. ábra: Az észlelt és az előrejelzett látástávolság értékek órás gyakoriságai LHKE repülőtéren (2015)

Ez azonban nem róható fel hibaként, hiszen a vonatkozó szabályozók megengedik, hogy a biztonságos üzemeltetés érdekében a megadott észlelési és előrejelzési rezsimektől eltérő értékek szerepeljenek. Tipikus példa ilyen egyedi értékekre a repülőtér vagy adott légijármű üzemeltetési minimuma, aminek a jelentő (METAR/SPECI) vagy előrejelző (TAF) táviratokban való megjelenítése már csak gyakorlati megfontolásokból is előnyöket rejt. Megadja ugyanis annak a lehetőségét, hogy dokumentált, mindenki által elérhető módon adjon tájékoztatást az észlelt vagy előrejelzett időjárás alakulásáról.

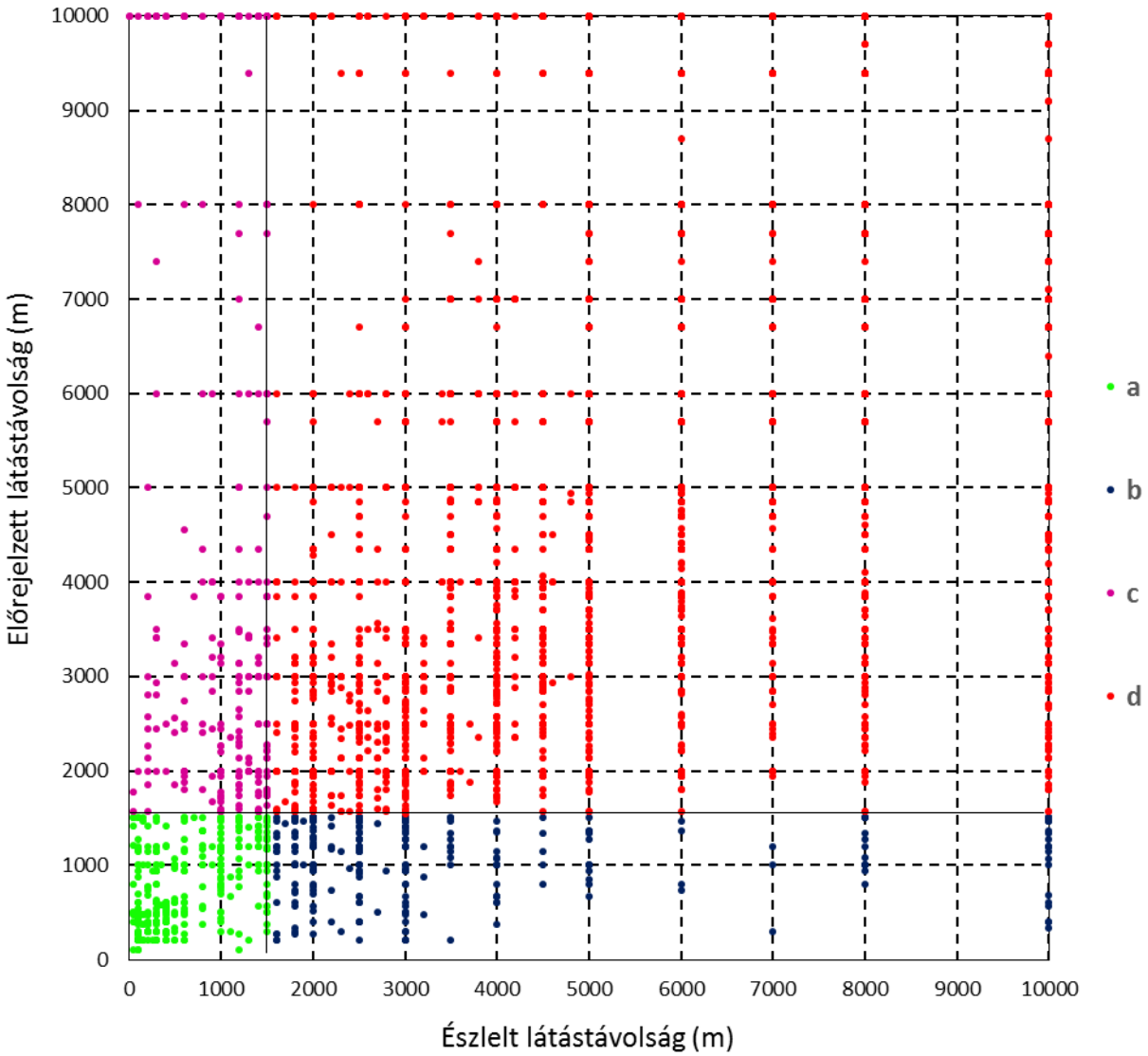
A fentieken túl azt is tekintetbe kell venni, hogy a repülésmeteorológia támogatás során az előrejelzések értékét felhasználói szempontból alapvetően az határozza meg, hogy a releváns műveleti határértékek átlépését helyesen prognosztizálják-e. Ez összhangban van azzal a gyakorlattal, amely az eljárások 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, az alkalmazott légijárműtől vagy akár a repülési feladattól is. Mindezeket figyelembe véve célszerű az előrejelzések vizsgálatához kategóriákat felállítani, mégpedig oly módon, hogy a kategóriák alsó határa minden esetben 0 méter legyen így azok egyszerűen a *felső kategóriahatár* (a továbbiakban egyszerűen: kategóriahatár) megadásával egyértelműen beazonosíthatók. Ennek megfelelően a verifikációs eljárás során az előrejelzett és az észlelt látástávolság adatok képezik a vizsgálat tárgyát, azaz hogy az adott vizsgálati kategóriába

beletartoznak-e vagy sem. Ezt a fajta verifikációs módszertant nevezzük kategorikus előrejelzések verifikációjának, amelyet a vizsgált értékek egy ún. kontingencia mátrixba (9. táblázat) való besorolása révén valósítunk meg.

		Észlelt esemény	
		IGEN	NEM
Előrejelzett esemény	IGEN	**a** (találat)	**b** (téves riasztás)
	NEM	**c** (mulasztás)	**d** (korrekt elutasítás)

9. táblázat: Kategorikus előrejelzések kontingencia mátrixa

A 36. ábrán is szemléltetett példában legyen a vizsgált kategória határ 1500 méter, az előrejelzett látástávolság pedig 1000 méter. Ebben az esetben az előrejelzett esemény az IGEN kategóriába tartozik, azaz a prognosztizált látástávolság nem haladja meg az 1500 métert. Ha az észlelt látástávolság sem haladja meg ezt a kategória határt, akkor az szintén az IGEN kategóriába tartozik, ami azt jelenti, hogy adott kategória határ mellett az előrejelzés korrekt találatot eredményezett. Ennek megfelelően a kontingencia mátrix **a** (találat) elemével azonosítható. Ellenkező esetben, azaz 1500 métert meghaladó észlelt látástávolság esetén az észlelt esemény már a NEM kategóriába tartozik. Ez hibás előrejelzést, téves riasztást eredményez, amit a fentiekhez hasonló módon besorolva a kontingencia mátrix **b** elemét kapjuk. Abban az esetben, ha az előrejelzett látástávolság meghaladja az 1500 méteres kategória határt, az előrejelzett esemény a NEM kategóriába tartozik. Ha ilyenkor az észlelt esemény is a NEM kategóriába sorolható be, azaz az észlelt látástávolság is 1500 méter feletti, akkor az előrejelzés szintén korrekt volt, ami a kontingencia mátrix **d** (korrekt elutasítás) elemével azonosítható. Értelemszerűen 1500 métert meg nem haladó észlelt látástávolság már az IGEN kategóriába sorolja az észlelt eseményt, ami hibás előrejelzést eredményez, hiszen elmulasztotta előrejelezni a vizsgált látástávolság kategóriát (kontingencia mátrix **c** eleme).



36. ábra: Példa a kontingencia mátrix elemeinek (a, b, c, d) pontdiagramon való megjelenítésére 1500 m-es kategóriahatár alkalmazása mellett

Természetesen a vizsgált kategória határok szabadon megválaszthatók, sőt az előrejelzések verifikációja során kifejezetten fontos annak vizsgálata, hogy az egyes előrejelzési produktumok mutatnak-e függőséget a kategória határ megválasztásával.

Ahogyan Doswell és szerzőtársai [175] is megmutatták: teljes értékű, mindenre kiterjedő verifikációs eljárás nem létezik. Ezért egy teljesebb összkép érdekében célszerű minél több aspektusból, minél több skill score és verifikációs paraméter (pl.: BIAS, ACC, POD/ HIT, FAR, POFD, CSI/TS, TSS, HSS, stb.) vizsgálata, melyek Nurmi [176] valamint Jolliffe és Stephenson [177] munkája alapján kerülnek bemutatásra.

A torzítás (BIAS, Bias Score) értékének meghatározása a kontingencia mátrix elemeinek felhasználásával az alábbi egyenlet szerint történik:

$$BIAS = \frac{a+b}{a+c} \tag{10}$$

A torzítás azt mutatja meg, hogy az adott kategória határhoz köthető észlelt bekövetkezésének gyakorisága hogyan viszonyul az előrejelzett IGEN események összesített számához. A BIAS 1 alatti értéke az előrejelzések alulbecslését, 1 feletti értéke pedig felülbecslését, azaz az észleltnél nagyobb gyakorisággal való bekövetkezését jelenti. Megjegyzendő, hogy a torzítás csak és kizárólag a fent megadott definíció szerint rendelkezik a bekövetkezési gyakoriságról, ami azt jelenti, hogy arról viszont semmilyen információt nem biztosít, hogy az egyes előrejelzések mennyire feleltek meg a ténylegesen észlelt értékeknek.

Értéktartomány: 0 - ∞. Tökéletes érték: 1.

A pontosság (ACC (Accuracy)) vagy más néven a helyes előrejelzési arány (Proportion correct) értékének meghatározása a kontingencia mátrix elemeinek felhasználásával az alábbi egyenlet szerint történik:

$$ACC = \frac{a+d}{a+b+c+d} \tag{11}$$

Az egyenlet számlálójában az előrejelzett IGEN események száma, nevezőjében pedig a teljes esetszám található, azaz a pontosság a helyes kategorikus előrejelzések arányát határozza meg. Az előrejelzések verifikációja során gyakran és előszeretettel alkalmazzák egyszerűsége, egyértelműsége okán, ugyanakkor ritka események vizsgálatakor alkalmazása félrevezető lehet. Ennek megértéséhez tekintsük kategória határnak például a 100 méteres látástávolságot. Ennek a valós eseménynek repülésklimatológiai szempontból az előfordulási gyakorisága rendkívül alacsony, a hazai repülőtereken jellemzően 1 % alatti. Ez egyben azt is jelenti, hogy ha minden hozzáadott érték nélkül például egy évre előre azt jelezzük, hogy a látástávolság nem esik a 100 méter vagy az alatti kategóriába, akkor az alacsony klimatológiai relatív gyakoriságnak köszönhetően az előrejelzésünk pontossága a 100 %-hoz fog közelíteni. Nyilvánvaló, hogy a mutatott közel tökéletes pontosság ellenére egy ilyen előrejelzés a döntéshozó számára értéktelen és nem nyújt segítséget egy adott szituáció megítélése során. A találati arány értékét ennek megfelelően, fenntartásokkal kell kezelni, figyelembe véve annak korlátait.

Értéktartomány: 0 – 1. Tökéletes érték: 1.

Az észlelés vagy detektálás valószínűsége (POD (Probability of Detection)) vagy más néven a találati arány (HIT (Hit rate)) értékének meghatározása a kontingencia mátrix elemeinek felhasználásával az alábbi egyenlet szerint történik:

$$POD = HIT = \frac{a}{a+c} \tag{12}$$

Az egyenlet számlálójában a találatok, míg nevezőjében a találatok és mulasztások összege, azaz a bekövetkezett IGEN események száma áll. Ez egyben azt is jelenti, hogy a POD azt mutatja meg, hogy a bekövetkezett események milyen arányban lettek helyesen előrejelezve. Egyszerűsége miatt kedvelt mérőszám, de ebben rejlenek hátrányai is. Mivel a téves riasztásokat nem veszi figyelembe, ezért az IGEN előrejelzések arányának növelésével hozzáadott érték nélkül, mesterségesen javítható az értéke. Emiatt célszerű a téves riasztásokat érdemben vizsgáló téves riasztási aránnyal (FAR (False Alarm Ratio)) való együttes vizsgálata, ami használhatóbb verifikációs eredményekhez és az eredmények objektívebb kiértékeléséhez vezethet.

Értéktartomány: 0 – 1. Tökéletes érték: 1.

A FAR értékének meghatározása a kontingencia mátrix elemeinek felhasználásával az alábbi egyenlet szerint történik:

$$FAR = \frac{b}{a+b} \tag{13}$$

Az egyenlet számlálójában a téves riasztások, míg nevezőjében az előrejelzett IGEN események összesített száma áll. Ennek megfelelően a FAR azt mutatja meg, hogy az adott kategóriára vonatkozó előrejelzések milyen arányban lettek tévesek. A POD-nál leírtakhoz hasonlóan a kontingencia mátrix nem minden elemét veszi figyelembe, így a NEM előrejelzések arányának növelésével hozzáadott érték nélkül, mesterségesen javítható az értéke. Ahogyan a fentiekből következik, a POD és a FAR mesterséges javítása egymással ellentétes irányú folyamatokkal lehetséges. Ez azt jelenti, hogy a POD mesterséges növelése a FAR emelkedéséhez, a FAR mesterséges javítása, csökkentése pedig a POD csökkenéséhez vezet. Emiatt újra kiemelem, hogy együttes vizsgálatuk jelentősen javíthatja a verifikációs kiértékelés hatékonyságát.

Értéktartomány: 0 – 1. Tökéletes érték: 0.

A téves riasztási arányhoz (False alarm ratio) nagyon hasonló, az angol terminológia miatt vele gyakran össze is tévesztett mérőszám a hamis pozitív arány (False alarm rate vagy más néven

Probability of False Detection (POFD)) értékének meghatározása a kontingencia mátrix elemeinek felhasználásával az alábbi egyenlet szerint történik:

$$POFD = \frac{b}{b+d} \tag{14}$$

A FAR-ral való összevetésből egyből látszik, hogy míg az előbbi esetben a téves riasztások számát az előrejelzett IGEN események összesített számához viszonyítjuk, addig a POFD esetében a tört nevezőjében az észlelt nem események száma áll. Ez azt jelenti, hogy a POFD azt adja meg, hogy az esetek mekkora részében volt téves riasztás, amikor az észlelt esemény nem a vizsgált kategóriába esett. Az a tény, hogy nem veszi figyelembe a kontingencia mátrix minden elemét, természetesen hátrányokkal is jár. A mulasztás figyelmen kívül hagyása azt eredményezi, hogy az előrejelzett NEM események növelésével hozzáadott érték nélkül, mesterségesen javítható az értéke.

Értéktartomány: 0 – 1. Tökéletes érték: 0.

A Critical Success Index (CSI) vagy más néven Threat Score (TS) értékének meghatározása a kontingencia mátrix elemeinek felhasználásával az alábbi egyenlet szerint történik:

$$CSI = TS = \frac{a}{a+b+c} \tag{15}$$

Az egyenlet számlálójában a találatok, míg nevezőjében az előrejelzett IGEN események és a mulasztások számának összege található. Ez azt jelenti, hogy azonos súllyal veszi figyelembe a mulasztást és a téves riasztást és ezzel azt adja meg, hogy az észlelt vagy előrejelzett IGEN események milyen arányban voltak jól előrejelezve. A korrekt elutasítás figyelmen kívül hagyása azt eredményezi, hogy a „véletlen” találatoknak köszönhetően hatékonysága romlik a ritka események vizsgálata során, azaz érzékeny az adott esemény klimatológiai gyakoriságára.

Értéktartomány: 0 – 1. Tökéletes érték: 1.

Két egyszerűbb mérőszám (POD és POFD) különbségeként áll elő a számos néven ismert True skill statistic/Hanssen and Kuipers discriminant/ Peirce's skill score [176][177]:

$$TSS = POD - POFD = \frac{a}{a+c} - \frac{b}{b+d} \tag{16}$$

Ahogyan a fenti képletből is megállapítható, a TSS a kontingencia mátrix minden elemét számításba veszi, ennek megfelelően pedig értéke kevésbé függ az adott esemény előfordulási gyakoriságától. Ugyanakkor vegyük észre, hogy az olyan ritka események esetén, mint a például a nagyon alacsony látástávolság, a korrekt elutasítás magas számaránya miatt a TSS értéke a POD-hoz fog tartani.

Emlékezve azonban a fent említett tényre, miszerint a POD értéke mesterségesen javítható az IGEN előrejelzések arányának növelésével, arra a következtetésre juthatunk, hogy ez a módszer a TSS esetében nem működhet. Ennek az az oka, hogy az IGEN előrejelzések arányának hozzáadott érték nélküli növelésével nem csak a találatok, hanem a téves riasztások száma is növekszik, ami a POFD növekedéséhez vezetve éppen ellentétes előjellel járul hozzá a TSS értékéhez.

Értéktartomány: -1 – 1. Tökéletes előrejelzés esetén értéke: 1

A Heidke Skill Score a kategorikus előrejelzések verifikációjának a fentieknél összetettebb és talán az egyik legnépszerűbb mérőszáma. Előszeretettel alkalmazzák, hiszen alacsony klimatológiai előfordulás esetén is jól működik illetve egyfajta összehasonlítási alapként használható a véletlen előrejelzések tekintetében. Alapját a pontosság mérőszáma képezi, azzal a különbséggel, hogy mind a számláló, mind pedig a nevező értékéből levonjuk a véletlenül helyes előrejelzések számát [176]:

$$HSS = \frac{a+d-V}{a+b+c+d-V} \tag{17}$$

A fenti egyenletben V jelöli a véletlenül helyes előrejelzések számát, amelyet a következő módon számíthatunk ki:

$$V = \frac{(a+b)\cdot(a+c)+(b+d)\cdot(c+d)}{a+b+c+d} \tag{18}$$

V behelyettesítésével, majd az egyenletet egyszerűsítve a következő eredményt kapjuk:

$$HSS = \frac{2\cdot(a\cdot d-b\cdot c)}{(a+c)\cdot(c+d)+(a+b)\cdot(b+d)} \tag{19}$$

A HSS 0 értéke azt az esetet írja le, amikor a számláló nulla, azaz a véletlenül helyes előrejelzések száma megegyezik a találatok és a korrekt elutasítások összegével. Ez azt jelenti, hogy az összes helyes előrejelzés a véletlen műve, amiből az is következik, hogy az előrejelzéseknek nincs hozzáadott értékük.

Értéktartomány: -∞ – 1. Tökéletes előrejelzés esetén értéke: 1.

A verifikáció során az említett paraméterek mindegyike, minden kategória határra vonatkozóan kiszámításra került a 9. táblázatban bemutatott 2 × 2 kontingencia mátrix adatainak felhasználásával. Ennek ellenére a részletes eredmények a következő fejezetben nem kerülnek teljeskörűen bemutatásra, az egyes mérőszámok közül kiemelt figyelemmel és részletességgel csak a Heidke skill score (HSS) eredményei lesznek prezentálva. Ez egyrészt

annak köszönhető, hogy ennek a verifikációs paraméternek az értékei tükrözik a verifikáció érdemi összeredményét, másrészt – ahogyan korábban is jeleztem, – a HSS korrekt marad kis relatív gyakoriságú események (pl.: alacsony látástávolság) kiértékelése esetén is [154].

A fentiekben bemutatott eljárások akadály nélkül alkalmazhatók a determinisztikus modell kimeneti adatokra. A vizsgált előrejelzési típusok közül ez alól csak TAF táviratok képeznek kivételt. Ezek esetében újfajta megközelítést kellett alkalmazni, ami a már korábban is említett probabilisztikus előrejelzési információt a megfelelő formába konvertálta. A nemzetközi TAF verifikációs gyakorlatban általános eljárás az előrejelzési időszak rövid intervallumokra való felosztása [178][179]. Az észlelések pillanatnyi látástávolság értékei miatt azonban ezek a fajta eljárások szükségszerűen hibát hordoznak, ha a vizsgált kategória határok eltérnek az ICAO által javasolt módosítási kritériumoktól [18]. Ráadásul a felszállásoknak vagy a repülési feladatok kezdetének általában pontosan meghatározott időpontja van, amit megelőzően a felhasználók szeretnék tudni, hogy végrehajthatják-e a tervezett feladatot vagy el kell azt halasztaniuk. A fenti indokok miatt egy másfajta megközelítést alkalmaztam 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 adatait párosítottam. A numerikus és a hibrid előrejelzések esetében ez azt jelenti, hogy az előrejelzési időtartomány t + 0100, t + 0200, stb. órai előrejelzéseit így a t + 0045, t + 0145, stb. időpontok METAR táviratai alapján verifikáltam. 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.

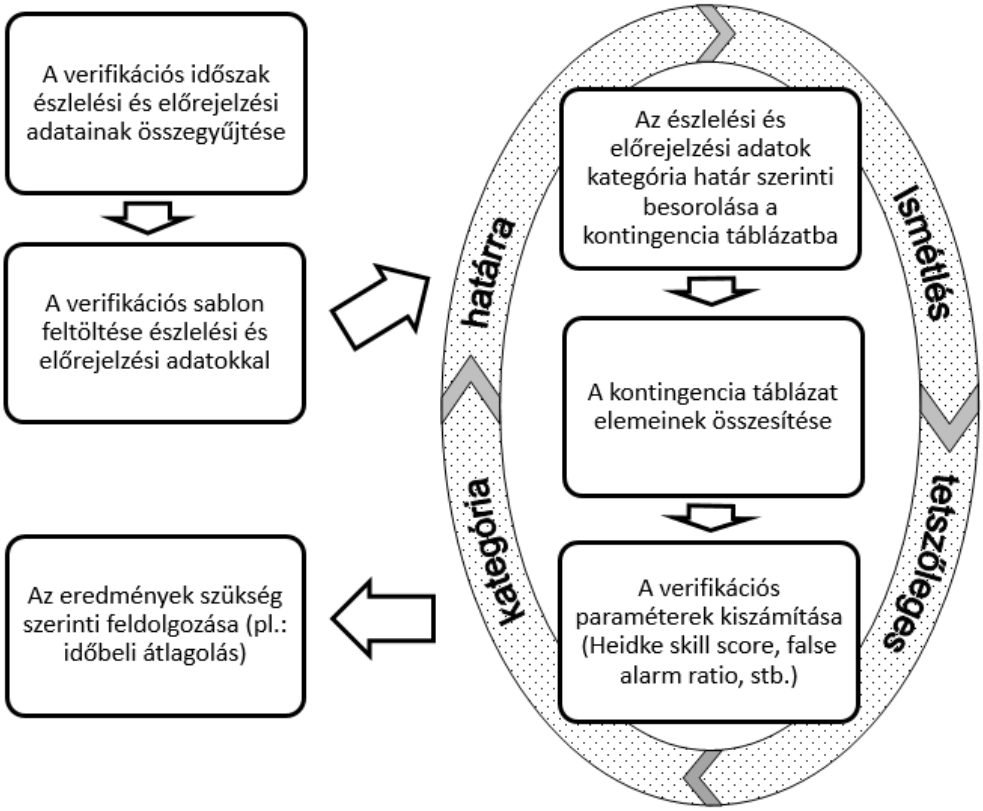
A TAF táviratokban változást jelentő csoportot alkalmaznak, amikor tartós ("becoming" – BECMG) vagy időszakos („temporary" – TEMPO) változás várható az időjárási elemek értékében vagy állapotában [18]. Ezeket a csoportokat a táviratokban az adott csoportra vonatkozó érvényességi időszak követi. Az érvényességi időszak alapján egyértelműen behatárolható egy időintervallum, amelyre vonatkozóan egy adott változóhoz több különböző előrejelzett érték tartozik. A BECMG változást jelentő csoport esetében a TAF távirat beválása szempontjából kedvezőbb előrejelzési adatot (alap vagy BECMG) vesszük figyelembe a BECMG változási időszakában. Ez úgy történik, hogy a verifikáció során az adott időpontra vonatkozó észlelési adattal együtt az előrejelzési adatokat is besoroljuk a kategória határnak megfelelően a kontingencia mátrixba. A besorolást követően pedig azt az értéket vesszük

figyelembe, amelyik találatot vagy korrekt elutasítást eredményez. 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 beválik 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 [18]. 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, azaz amikor TEMPO változást jelentő csoport indokoltan került a táviratba, akkor 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.

Ez az eljárás felülbecsli a TAF távirat verifikációs teljesítményét a változást jelentő és a valószínűségi csoportok kiértékelési metódusa miatt. Egyrészt a fent említett esetekben megengedő módon a TAF beválása szempontjából kedvezőbb előrejelzést veszi figyelembe, másrészt azokban az esetekben, amikor a változást jelentő csoport indokolatlanul került alkalmazásra, a kedvezőtlen előrejelzés mellett a kedvező adatok is felhasználásra kerülnek a kontingencia mátrixba történő besorolásnál. Ennek köszönhetően a TAF táviratnál jobb verifikációs eredményt elérő eljárások esetében nagy biztonsággal állíthatjuk, hogy azok az előrejelzési munkafolyamat során jól alkalmazhatóak lesznek a TAF látástávolság előrejelzéseinek javításában.

A teljes verifikációs folyamat főbb lépéseit a 37. ábra foglalja össze. Első lépésként a kijelölt verifikációs időszak előrejelzési és észlelési adatainak összegyűjtését kell elvégezni. Ez egyrészt az adatok saját adatbázisokból történő lekérdezését (ha elérhető) vagy más

szervezetektől való megigénylését jelenti. Másrészt azokban az esetekben, amikor például egy adott előrejelző módszer nem működik még operatív körülmények között, az előrejelzést végző program átalakítása is szükséges lehet, hogy a vizsgált verifikációs időszakra rendelkezésre álljanak az előrejelzések a kívánt sűrűséggel. Esetünkben is ez utóbbi eset állt fenn az összes olyan előrejelzési produktum tekintetében, amely az analógiás előrejelzést részben vagy egészben alkalmazta. Ezt követően a különböző előrejelzési produktumok prognosztikai időlépcsőit figyelembe véve meg kell határozni azt a legkisebb időbeli távolságot, ami verifikációs időlépcsőként alkalmazható az összehasonlíthatóság alapelvének sérülése nélkül. Ez esetünkben a korábban bemutatott 8. táblázat adatai alapján, a numerikus produktumok egyórás időlépcsőjéből adódóan került meghatározásra, azaz a verifikációs sablonban egyórás bontásban szerepelnek a kilencórás előrejelzési ciklusok. Az említett ciklusok hossza természetesen nem véletlen, a rövid TAF táviratok hosszához igazodva erősíti az összehasonlíthatóság alapelvét.



37. ábra: A verifikáció sematikus folyamatábrája (Forrás: [164] alapján)

A 37. ábrán megadott sorrend szerint ezután következik a folyamat ovális keretbe foglalt része, amely a kategória határok szerinti besorolástól a verifikációs paraméterek számításáig terjed. Ez az összetett lépés a vizsgált kategória határok számától függően tetszőlegesen

ismételhető. Esetünkben ez 100 méteres lépcsőket követve a 0 és 5000 méter közötti teljes intervallumra megvalósult. Ezt követi az eljárás utolsó része, ami a verifikációs eredmények utólagos feldolgozását jelenti. Ennek célja az eredmények értékelésének megkönnyítése és olyan egyszerűsített, áttekinthető információk előállítása, amelyek a tájékoztatási lehetőségek mellett az előrejelző módszerek jobbítását is segíthetik. Ilyen utólagos feldolgozási lehetőség például az időbeli vagy kategória szerinti átlagolás, az egyedi repülőtéri adatok összevonása vagy akár az eredmények adott szempontok szerinti szűrése (pl.: éven belüli, napon belüli, stb.).

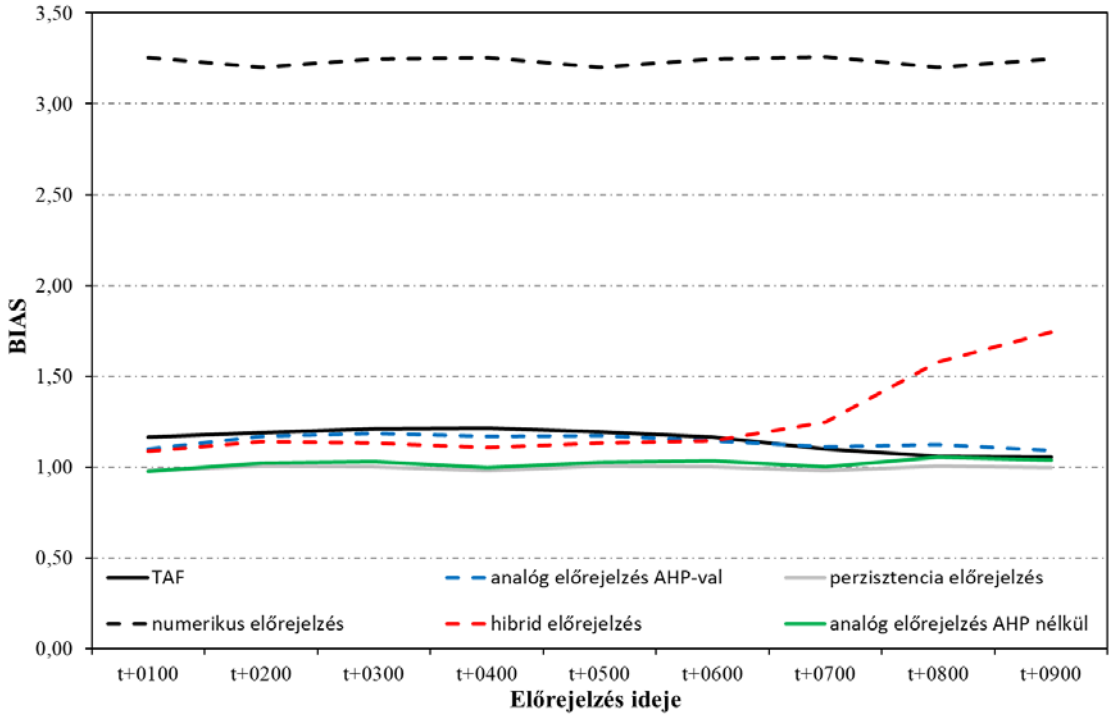
V.2. Verifikációs eredmények

Először is meg kell jegyeznem, hogy a fejezetben bemutatásra kerülő eredmények esetében az előrejelzés ideje nem az adott előrejelzés időelőnyét, hanem a TAF táviratok érvényességének rögzített kezdő időpontjától vett időbeli távolságát jelenti. Nyilvánvaló, hogy ezért a TAF táviratok és a numerikus előrejelzések esetében az időelőny különbözik az előrejelzés idejétől. Az analóg, a hibrid és a perzisztencia előrejelzés esetén viszont a kettő között nincs különbség az előrejelzések konstrukciós háttere miatt. A fenti megfontolásokat figyelembe véve a továbbiakban az „előrejelzés ideje" kifejezést fogom egységesen alkalmazni.

A verifikáció során vizsgált kategóriák felső határa 5000 méteres látástávolságig, 100 méterenként került meghatározásra. Ezután a verifikációs paraméterek az összes kategória határra és alkalmazott előrejelző eljárásra kiszámításra kerültek mindegyik vizsgált repülőtér vonatkozásában. A numerikus előrejelzés és ebből adódóan a hibrid prognózis esetében is az alkalmazott utófeldolgozó eljárás sajátosságai miatt az előrejelzett látástávolság alsó határa 1000 m. Ezért a kategória határok átlagolásánál az összes produktum tekintetében csak az e fölötti kategóriák lettek figyelembe véve, hogy az egyes eljárások eredményei összehasonlíthatóak maradjanak.

A bemutatásra kerülő ábrák eredményei kétféle átlagolási eljárással lettek előállítva. Mindkét esetben az összes vizsgált repülőtér előrejelzéseinek ellenőrzési adatait tartalmazzák ezek a számítások. Az előrejelzések verifikációja időbeli változásainak bemutatásához az egyes időlépcsőbeli átlagok a 1000-5000 méter közötti összes kategóriahatárra számított paraméterértékek segítségével kerültek előállításra, míg a kategórihatár függőségét bemutató ábrák az első hat időlépcső adatait használták fel, azaz hatórás előrejelzési idővel lettek kalkulálva. Az így előállított grafikonok az előrejelzések általánosító, összehasonlító elemzéséhez elegendő alapanyagot szolgáltatnak, így ezek mindegyike elérhető a Függelékben, de jelen dolgozatban csak a kiértékelés szempontjából releváns és minimálisan szükséges adatok kerülnek tárgyalásra. Természetesen a kiszámított verifikációs paraméterek elemi értékei is rendelkezésre állnak, melyek segítségével tetszőleges repülőtérre, tetszőleges utófeldolgozással (pl.: speciális kategória- vagy időintervallumokra történő átlagolással) és tetszőleges verifikációs paraméterre előállíthatók a kívánt ábrák. Az adatok nagy mennyisége, a variációs lehetőségek szinte korlátlan száma és a terjedelmi lehetőségek korlátai miatt a részletekbe menő ilyen irányú elemzésektől jelen keretek között eltekintek. Hiszen például csak az egyes paraméterek kategóriahatáronkénti idősorainak ábrázolása több mint 1000 ábrát eredményezne a vizsgált repülőterek vonatkozásában.

A torzítás (BIAS) időbeli átlagait tekintve (38. ábra) a perzisztencia előrejelzés mellett, ami természetéből adódóan a tökéletes érték körül található, az AHP módszer használata nélküli analóg előrejelzés mutatja a legjobb értékeket, azaz időben átlagolva sem alul- sem pedig felülbecslést nem jelez a bekövetkezési gyakoriságok tekintetében. Ezzel szemben a numerikus produktum erős, míg a többi előrejelzés egységesen enyhe felülbecslést, azaz az észleltnél nagyobb gyakorisággal való bekövetkezést mutat az előrejelzés első 6 órájában. Ebben az időszakban ezek között az előrejelzések között nem látszik szignifikáns eltérés, hasonló, enyhén ingadozó értékeket mutatnak. Az előrejelzés utolsó 3 órájában a hibrid előrejelzés BIAS értékei gyors emelkedésnek indulnak, amelynek oka egyértelműen nem állapítható meg, de valószínűleg a numerikus modell arányának markáns növekedésével áll összefüggésben.

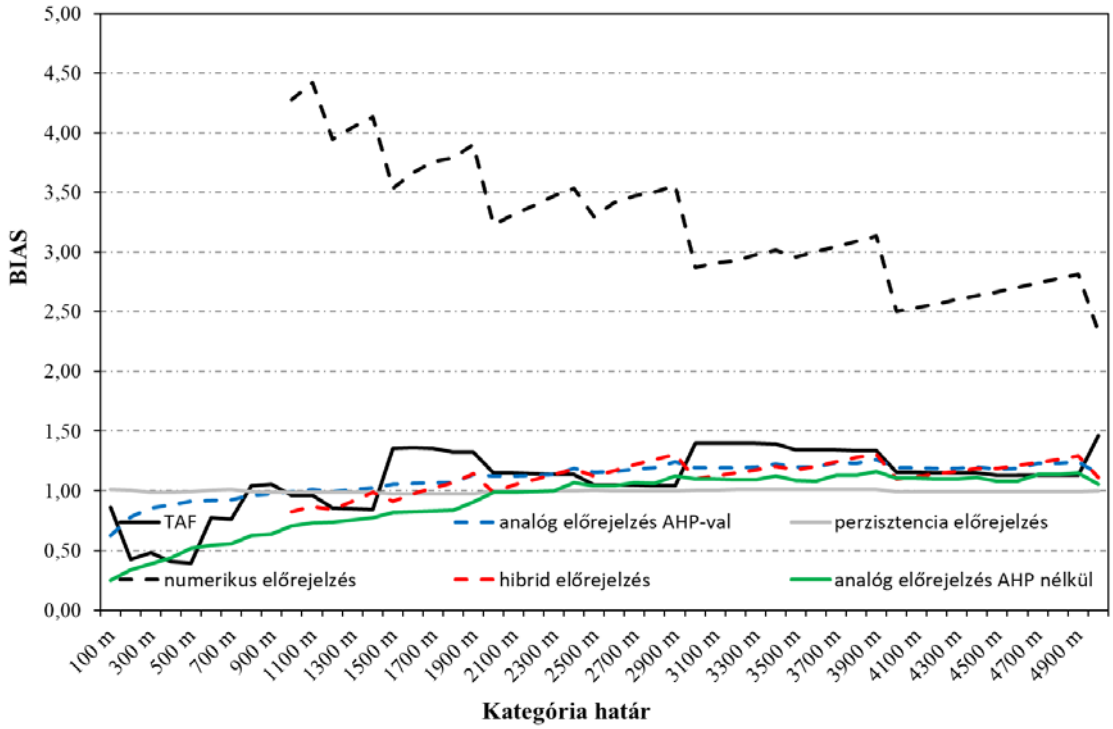


38. ábra: A különböző kategória határokra (1000 – 5000 méterig 100 m-es lépésekkel) vonatkozó átlagos BIAS értékek a vizsgált repülőtereken az előrejelzési idő függvényében

A különböző kategória határokra vonatkozó BIAS értékeket tekintve (39. ábra) azonban egyértelműen megállapítható, hogy míg az AHP-s analóg és a hibrid előrejelzés BIAS értéke viszonylag kis ingadozással az ideális 1 érték közelében mozog, addig a többi előrejelzés esetében ez az érték relatíve nagy ingásokkal és a kategória határtól függő tendenciózus változásokkal terhelt. A TAF esetében a megjelenő ingadozások például egyértelműen a nagyobb gyakorisággal alkalmazott repülésmeteorológiai határértékekhez kötődnek: a határértékek közelében, a határértékeknél kisebb látástávolságok esetén jellemzően alulbecslik,

felette pedig jellemzően felülbecslik az adott értékek bekövetkezési gyakoriságát. Ez nyilvánvalóan abból adódik, hogy a ténylegesen várt értékek helyett az előrejelzésekben már a meteorológiai támogatásban elvárt határértékek előrejelzésére törekednek. A részletes, több nézőpontot figyelembe vevő verifikáció fontosságát mutatja az AHP nélküli analóg előrejelzések példája. Míg a 38. ábra alapján az időbeli átlagok minden időlépcső esetén elsimították a kategória határtól való függőségét és egészen jónak látszó eredményeket láthattunk, addig a 39. ábra adatai egyértelműen megmutatják, hogy a tökéletes 1 érték közelében lévő átlagok egy kategóriától függő jelentős alul- és felülbecslés eredményeként állnak elő. Ráadásul ennek a mértéke sem egyenletes: az ideális értéktől való legnagyobb eltérés a legalacsonyabb és egyben legkritikusabb látástávolságok esetén jelentkezik.

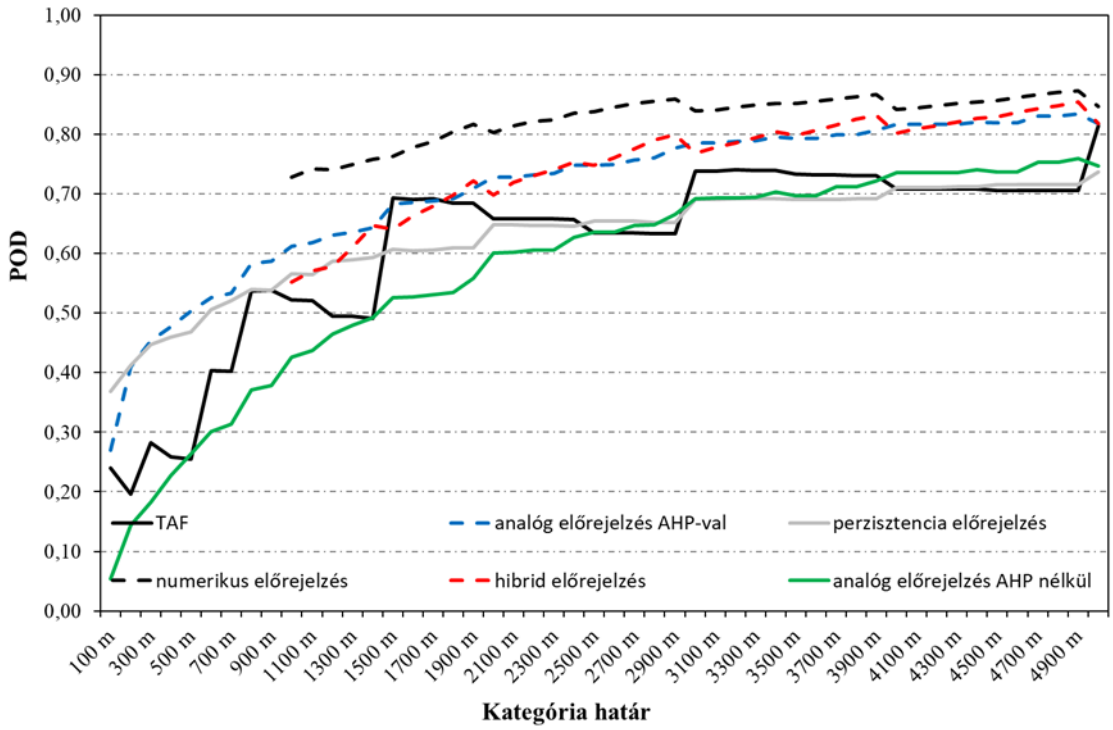
Természetesen a perzisztencia előrejelzés a fent említett ok miatt itt sem mutat kategória határtól való függőséget.



39. ábra: Az előrejelzési időszak első 6 órájára vonatkozó átlagos BIAS értékek a vizsgált repülőtereken az egyes kategória határok függvényében

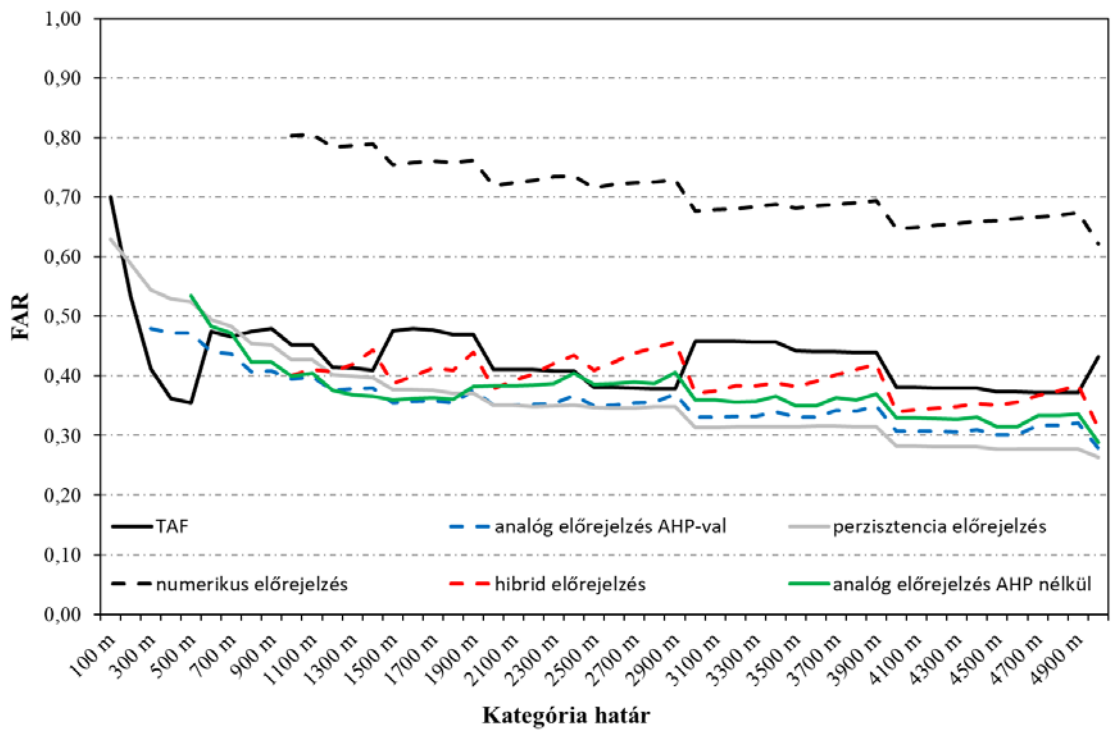
Ahogyan a verifikációs módszerről szóló fejezetben megmutattam a POD, azaz a detektálás valószínűsége vagy más néven találati arány azt mutatja meg, hogy a bekövetkezett események milyen arányban lettek helyesen előrejelezve. Mivel a téves riasztásokat nem veszi figyelembe, ezért az IGEN előrejelzések arányának növelésével hozzáadott érték nélkül, mesterségesen javítható az értéke. Emiatt célszerű a téves riasztásokat érdemben vizsgáló téves riasztási

aránnyal (FAR) – ami azt mutatja meg, hogy az adott kategóriára vonatkozó előrejelzések milyen arányban lettek tévesek – való együttes vizsgálata. Ezt az indokolja, hogy a két mutató éppen ellentétes irányú mesterséges beavatkozással módosítható kedvezően, ezért az egyik paraméter esetén kiemelkedőnek tűnő teljesítmény a másikkal egyszerűen visszaellenőrizhető. Jól példázzák mindezt a 43. és a 41. ábra grafikonjai. A POD értékeit bemutató 40. ábrán meglepő dolgot találhatunk, a legmagasabb találati arány a numerikus előrejelzés produkálta és a TAF-ra vonatkozó POD értékek is több helyen megközelítik vagy akár át is lépik az analóg és a hibrid előrejelzés szintjét. Emellett az is megállapítható, hogy a TAF esetén látható monotonitás hiány vagy fluktuáció itt is a legnagyobb gyakorisággal alkalmazott repülésmeteorológiai határértékekhez kötődik.



40. ábra: Az előrejelzési időszak első 6 órájára vonatkozó átlagos POD értékek a vizsgált repülőtereken az egyes kategória határok függvényében

Ezt az ábrát a FAR értékeket bemutató 41. ábrával összevetve egyből láthatjuk, hogy a numerikus előrejelzés POD-nál vezető szerepe csak a téves riasztások emelkedő számával párhuzamosan érhető el és a TAF lokális maximumai is ugyanezen okból tudják csak megközelíteni az analóg és a hibrid előrejelzések teljesítményét.



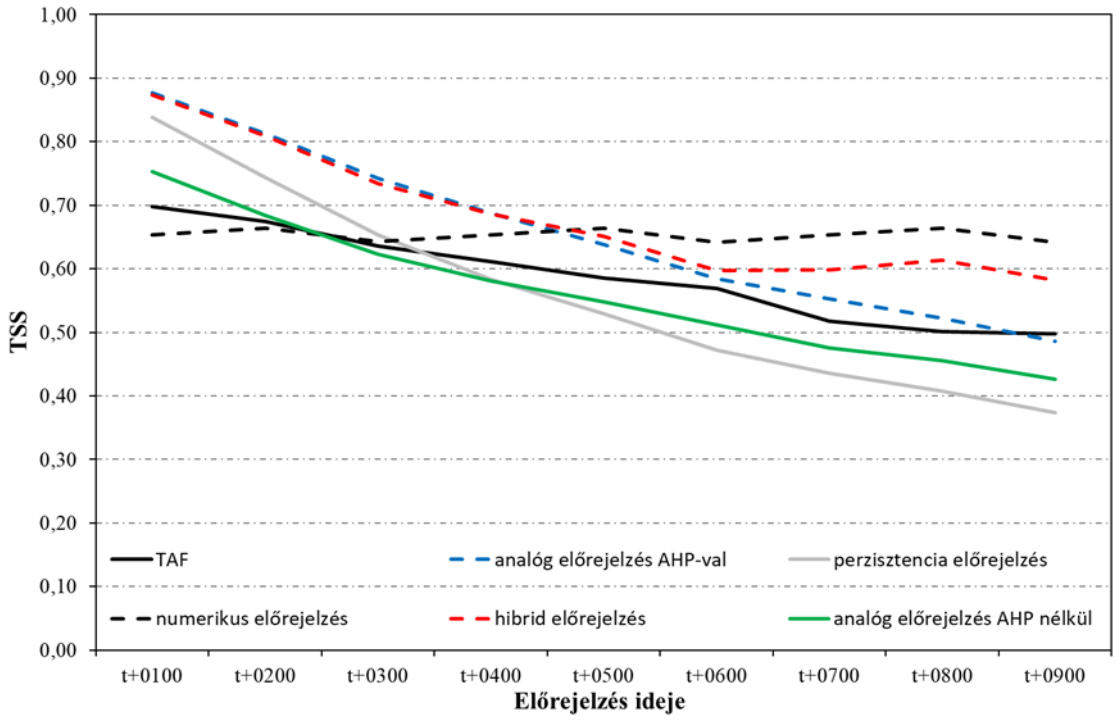
41. ábra: Az előrejelzési időszak első 6 órájára vonatkozó átlagos FAR értékek a vizsgált repülőtereken az egyes kategória határok függvényében

Ahogyan korábban megmutattam, a TSS a POD és a POFD különbségeként áll elő, amiből következik, hogy a ritka események esetén, mint a például a nagyon alacsony látástávolság, a korrekt elutasítás magas számaránya miatt értéke a POD-hoz fog tartani. Azaz az IGEN előrejelzések arányának növelésével, nem csak a találatok, hanem a téves riasztások száma is növekszik, ami a POFD növekedéséhez vezetve éppen ellentétes előjellel járul hozzá a TSS értékéhez. Ennek ellenére azt láthatjuk a 42. ábrán, hogy a numerikus előrejelzés teljesítménye a többi előrejelzéshez képest lényegesen jobb értékeket mutat az időbeli menetben, mint a későbbiekben bemutatandó HSS esetében. A numerikus előrejelzés TSS értéke már *t+0400* és *t+0500* között meghaladja az AHP módszerrel súlyozott analóg és a hibrid előrejelzés teljesítményét és ezt követően a hibrid előrejelzés kivételével mindegyik módszerhez képest növeli előnyét. A meglepően jó eredmények arra vezethetők vissza, hogy a téves riasztások száma és ebből következően a POFD értéke még a nem túl ritka események esetében sem kompenzálja megfelelően az IGEN előrejelzések számának növekedését. Mindez könnyen belátható az alábbi konkrét verifikációs példán keresztül. A szolnoki repülőtérre és *t+0300* időpontra és 1500 méteres kategória határra vonatkozó TSS értékek az AHP-s analóg és a numerikus előrejelzés esetében közel megegyezők, rendre 0,67 és 0,65. Azonban a hasonló értékekhez a kontingencia mátrix erősen eltérő elemi értékei tartoznak (10. táblázat).

Előrejelzés típusa	*a*	*b*	*c*	*d*	*TSS*
Analóg AHP-val	124	65	54	2673	0,67
Numerikus	137	326	41	2412	0,65

10. táblázat: Kategorikus előrejelzések kontingencia mátrixa

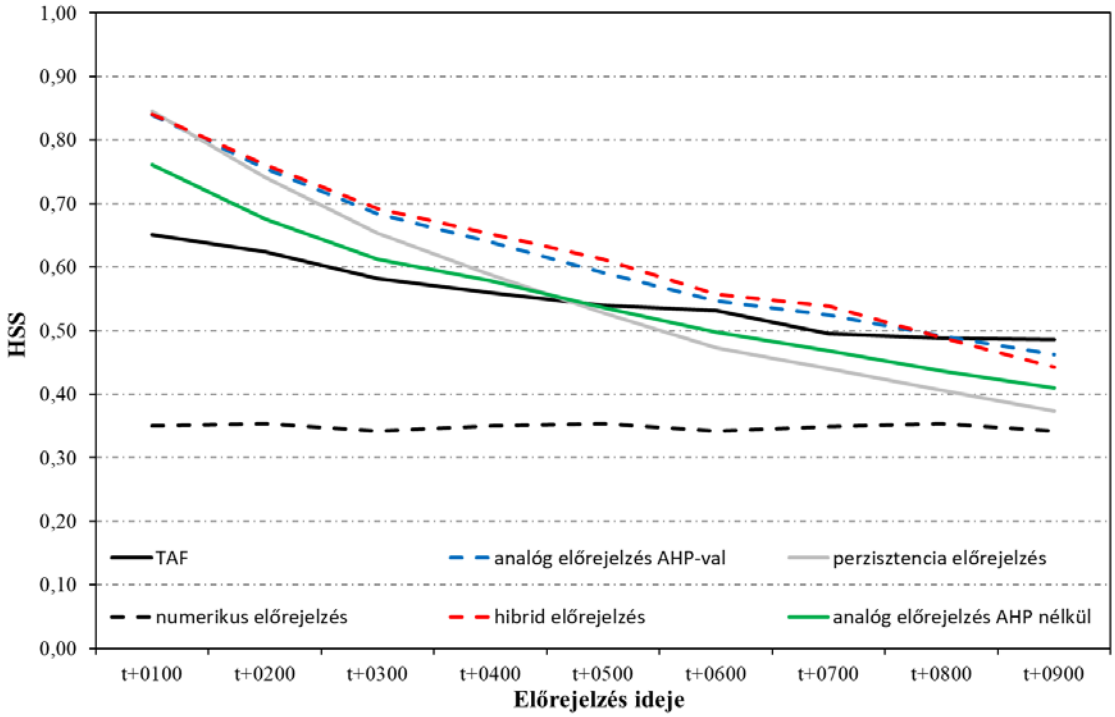
A fenti táblázat alapján könnyű észrevenni, hogy míg a POD számlálójában lévő $a+c$ összeg azonos, addig a téves riasztások száma (b) mintegy ötszörös a numerikus előrejelzés javára. Ez a hatalmas növekedés azonban mégsem biztosít kellő mértékű kompenzációt a TSS értékében a korrekt negatív előrejelzések nagy száma, azaz az előrejelzett esemény viszonylag alacsony klimatológiai gyakorisága ($\alpha \approx 15$) miatt.



42. ábra: A különböző kategória határokra (1000 – 5000 méterig 100 m-es lépésekkel) vonatkozó átlagos TSS értékek a vizsgált repülőtereken az előrejelzési idő függvényében

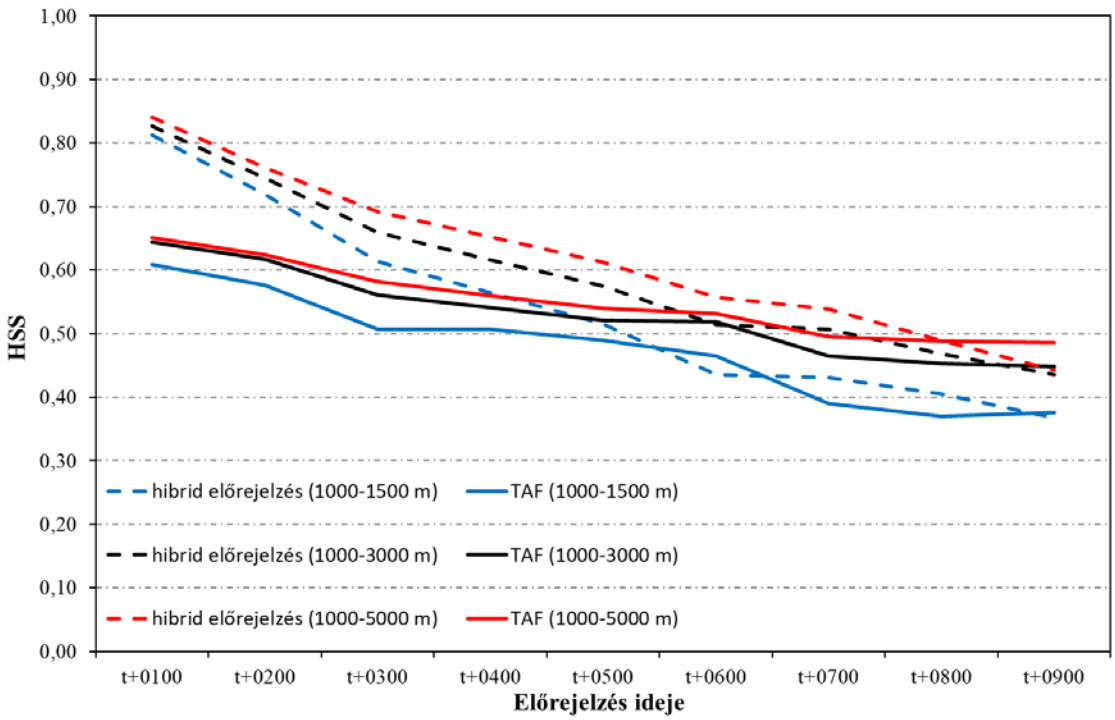
Ahogyan az előző fejezetben is jeleztem, Heidke skill score (HSS) egy olyan összetett verifikációs mérőszám ami kis relatív gyakoriságú események kategorikus előrejelzéseinek objektív kiértékelésére is kiválóan alkalmas. A HSS alapján nyert megállapítások más paraméterrel való visszaellenőrzése nem szükséges, bár az eddig ismertetett eredmények mind alátámasztják az alábbi következtetéseket. Az AHP módszerrel meghatározott súlyok

alkalmazása szignifikánsan javította az analóg előrejelzés teljesítményét a teljes előrejelzési időszakban. Ennek ellenőrzéséhez elég a 43. ábra analóg előrejelzéseinek grafikonjaira tekinteni: az AHP-s eljárás HSS értékei a teljes előrejelzési időszakban 10-13 %-kal haladják meg az anélkül készült analóg előrejelzés hasonló értékeit. A két grafikon közötti távolság végig egyenletes, időbeli függőség a lefutásában nem fedezhető fel.



43. ábra: A különböző kategória határokra (1000 – 5000 méterig 100 m-es lépésekkel) vonatkozó átlagos HSS értékek a vizsgált repülőtereken az előrejelzési idő függvényében

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 mutatnom, hogy a feltüntetett értékek a korábban is említett kategória határokra (1000-5000 m) vonatkozó átlagot jelentik. Alacsonyabb kategória intervallumra vonatkozó átlagok esetén a TAF táviratok HSS értékei a csökkenő határral párhuzamosan az előrejelzési időszakban egyre korábban válnak versenyképessé a hibrid előrejelzéssel. Ennek oka egyrészt a TAF távirat időben jóval kiegyensúlyozottabb teljesítményében, másrészt abban keresendő, hogy az alacsonyabb kategóriák előrejelzése esetén a hibrid előrejelzés HSS értékei az analóg rész miatt gyorsabb ütemben csökkennek időben, ahogyan azt a 44. ábra is szemlélteti.

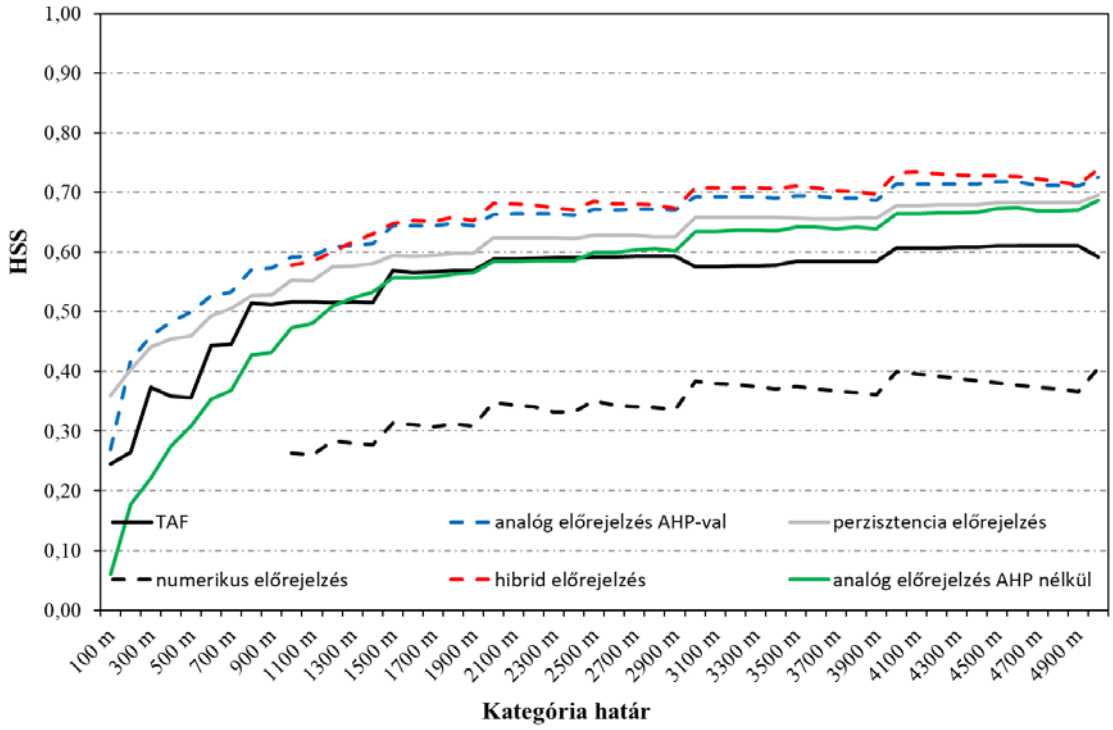


44. ábra: A különböző kategória intervallumokra vonatkozó átlagos HSS értékek a hibrid előrejelzés és a TAF esetén az előrejelzési idő függvényében

Ahogyan korábban bemutatásra került, a kategorikus előrejelzések verifikációs eljárása során a különböző verifikációs paraméterek a kontingencia mátrix elemeinek segítségével kerülnek kiszámításra. Nyilvánvalóan, ha a kategória határ megváltozása nem generál változást kontingencia mátrix elemeiben, akkor a vizsgált verifikációs paraméterek értéke is azonos marad. Ez könnyen észrevehető a 45. ábrán, ahol az egyes grafikonok lokálisan közel vízszintes szakaszokat 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.

Ahogyan az előző, 44. ábrával kapcsolatban is említettem, az AHP módszerrel meghatározott súlyok alkalmazása szignifikánsan javította az analóg előrejelzés teljesítményét a teljes

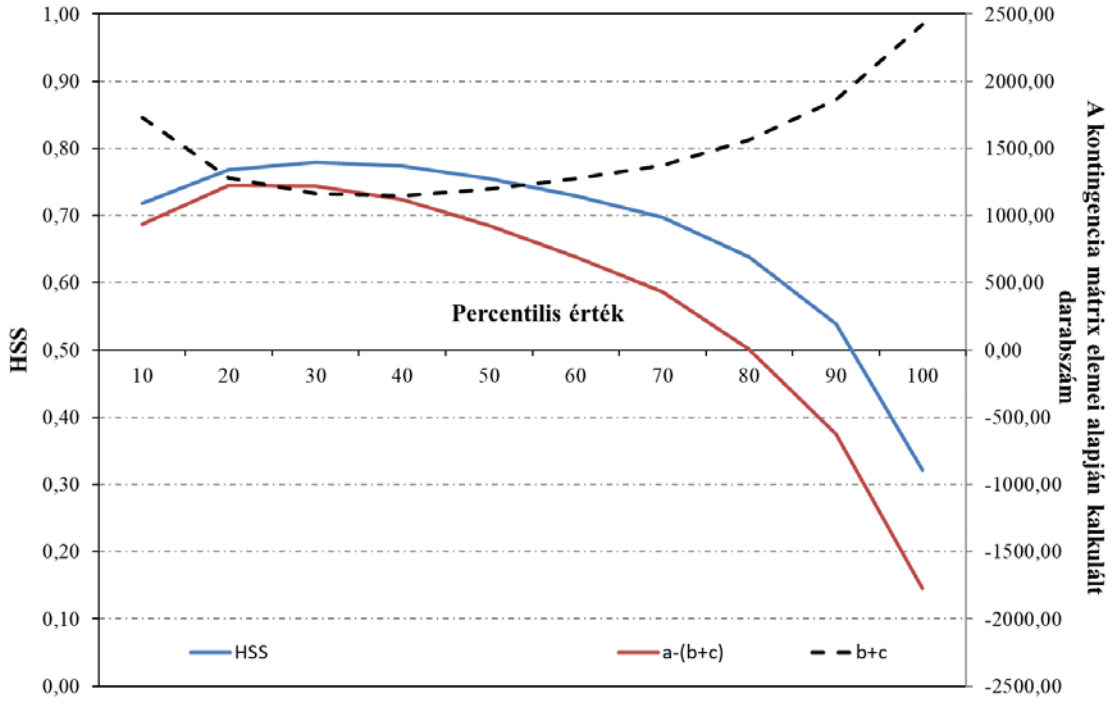
előrejelzési időszakban, ráadásul a legnagyobb növekedés az alacsony látástávolságok esetén következett be (45. ábra), ahol a pontos prognózisoknak még kritikusabb szerep jut.



45. ábra: Az előrejelzési időszak első 6 órájára vonatkozó átlagos HSS értékek a vizsgált repülőtereken az egyes kategória határok függvényében

A 45. ábrán látható eredmények esetén egyedül a 100 méteres kategória határ esetén nem előzi meg az analóg és a hibrid (az értelmezési tartományában) prognózis 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 (amely azonban ezen az ábrán nem látszik, tekintettel arra, hogy az ábra az első 6 óra adatait tartalmazza) a TAF fokozatosan átveszi a vezető szerepet még a magasabb kategória határok esetén is. Ezzel együtt kijelenthető, hogy a mind az analóg, mind pedig a hibrid előrejelzés jelentős hozzáadott értékkel rendelkezik a TAF táviratokhoz képest a vizsgált teljes kategória tartományban az előrejelzés első 6 órájában. Ez egyben azt is jelenti, hogy a fent említett prognózisok alkalmazhatósága független a kategória határ megválasztásától.

Ahogyan az előrejelző módszerekről szóló fejezetben bemutattam, az analógiás előrejelzések készítése során a determinisztikus látástávolság prognózis előállításához a leghasonlóbb időjárási szituációkat követő időpontok észlelt látástávolság értékeinek 30. percentilis értéke kerül felhasználásra. A megfelelő percentilis érték meghatározásához előzetes verifikáció került végrehajtásra. Ennek során a 2012-es év összes előrejelzési adata (4 vizsgált repülőtér, napi 8 előrejelzés órás időlépcsővel) kiértékelésre és átlagolásra került. Az előrejelzések elkészítése természetesen a vizsgálat tárgyához igazodóan minden 10. percentilis értékre megtörtént.



46. ábra: Az előzetes verifikáció alapján a 2012-es év analógiás prognózisainak előrejelzési időszakra vonatkozó átlagos HSS értékei (kék vonal), a kontingencia mátrix b és c elemeinek összegzett darabszáma és a találatok és ez utóbbi összegzett daranszám különbsége (a – (b + c)) a percentilis értékek függvényében

A kiértékelés során a korábban már bemutatott Heidke skill score értéke valamint a hibás előrejelzések kategóriáinak száma, azaz a kontingencia mátrix *b* és *c* elemeinek összege és a találatok és ez utóbbi összeg különbsége (*a – (b + c)*) került részletes elemzésre. A 46. ábrán látható görbék ugyan szemre nem a legmarkánsabb szélsőértékekkel rendelkeznek, azonban a konkrét számadatokat tekintve egyértelmű a 30. percentilis kiválasztása, mint az analógiás eljárás determinisztikus előrejelzésének készítése során alkalmazott érték.

V.3. Következtetések

Az eredmények verifikációja című fejezet két nagyobb alfejezetre tagolódott. Ezek közül az elsőben magát az alkalmazott verifikációs módszert és a felhasznált adatokat, míg a másodikban a módszertan alkalmazásával előálló verifikációs eredményeket mutattam be.

A verifikációs eljárások alapos szakirodalmi áttekintése után a vizsgált előrejelzések ellenőrzésére a kategorikus előrejelzések verifikációja esetén alkalmazható eljárást választottam ki. Ebben nagy súllyal az is szerepet játszott, hogy a repülési eljárások alkalmazása során is gyakran dinamikusan változó, különböző szempontokat követő határértékek figyelembe vételére van szükség a látástávolság vonatkozásában. A választott módszer a verifikációs alapelvek megtartása mellett tudta biztosítani a kiértékelés teljes értékű végrehajtását. Kizárólag a TAF táviratok verifikációja esetén nem volt ez biztosított, így azok esetében az előrejelzések kategorikus kiértékelését lehetővé tévő, önálló verifikációs módszertan került kidolgozásra. Ennek a TAF verifikációs eljárásnak az operatív használatba vétele folyamatban van az MH GEOSZ Meteorológiai Támogató Osztályán a teljes katonai repülésmeteorológiai támogatás kiértékelése érdekében.

A verifikációs eredményeket bemutató alfejezetben több alkalommal is rámutattam a teljeskörű, részletes verifikáció fontosságára. Az eredmények alapján egyértelművé tettem, hogy az AHP módszerrel meghatározott súlyok jelentősen javították az analógiás előrejelzés teljesítményén.

A TAF táviratok eredményeivel történő összehasonlítás alapján megállapítottam, hogy az analóg és a hibrid előrejelzések lényegesen jobb verifikációs eredményei miatt ezen előrejelzések alkalmazása magas hozzáadott értékkel bírna a repülésmeteorológiai támogatás végrehajtása során. Ráadásul az eredmények azt a feltételezést is alátámasztották, miszerint alkalmazásuk független a kategória határ megválasztásától.

A hibrid előrejelzések időben stabil eredményeire alapozva az is kijelenthető, hogy a hibrid előrejelzések teljesítménye a numerikus előrejelzés növekvő súlya ellenére sem mutat szignifikáns visszaesést az analóg előrejelzéshez képest az abszolút kategória eltérést figyelembe vevő súlyozás miatt.

ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

A katonai repülésmeteorológiai támogatás rendszerének részletes áttekintése és bemutatása alapján megállapítottam, hogy a vázolt szabályozói háttér összetettsége, a meteorológiai szakmai valamint a katonai elemek szoros összefonódása megkérdőjelezhetetlenné teszi a meteorológiai támogató tevékenység szerepét a katonai repülések biztosításában. Elemzésemben rámutattam, hogy a meteorológiai támogatás valós végrehajtása olyan többszintű, jól felépített szervezeti struktúrán alapszik, ami képes modern, újszerű előrejelzési eljárások gyakorlati adaptálására.

A támogatás alapelveinek szisztematikus megtartásával a meteorológiai támogatás a felhasználói igényekhez és a műveletek szükségleteihez igazodva látja el releváns információkkal a döntéshozókat a döntéshozatali folyamat megfelelő szakaszaiban. Ahogyan korábban is megfogalmaztam: a döntéshozatali folyamat során a cél annak a cselekvési változatnak a kiválasztása, amely a kívánt végállapothoz legközelebb segíti a döntés meghozatalában érdekelt felet. Ennek érdekében a döntéshozatali folyamat bemeneti információinak minél pontosabbá tétele és ebből adódóan a lehetséges bizonytalanságok csökkentése a döntéshozó elemi érdeke. Ebből következően megállapítottam, hogy az értekezésemben bemutatott látástávolság előrejelző eljárások nem sértik a korábban vázolt alapelveket, illetve nem igénylik a katonai repülések meteorológiai támogatását végző szervezeti struktúra legkisebb mértékű átalakítását sem. Így mind a repülőtéri, mind pedig a központi támogató elemek munkafolyamataiba egyszerűen integrálhatók.

A látástávolsággal és annak előrejelzésével kapcsolatos szakirodalmi vonatkozások átfogó és részletes bemutatásával rávilágítottam a látástávolság fizikai hátterének összetettségére, ami még napjainkban is fontos akadályozó szerepet játszik a látástávolságot befolyásoló fizikai és kémiai folyamatok pontos modellezésében. Ezzel párhuzamosan tisztáztam a látástávolsághoz kötődő fogalmakat és kifejezéseket, amelyek a meteorológiai támogatást szabályozó dokumentumokban is megjelennek.

Megállapítottam, hogy a látástávolság előrejelzésében alkalmazott eljárások annak ellenére is nagyon lassú fejlődésen mentek keresztül, hogy a látástávolság előrejelzésének problematikája a repülésmeteorológiai tudományos kutatások kezdetétől központi szerepet játszott.

Elemző munkámban bemutattam, hogy a mai leghatékonyabb látástávolság előrejelző eljárások kivétel nélkül statisztikai alapú módszertanra épülnek, igazolva ezzel az általam is alkalmazott módszertan időszerűségét és modernitását.

A repülésre veszélyes egyéb paraméterekkel kapcsolatos szakirodalmi vonatkozások beutatásával rávilágítottam a fuzzy logikán alapuló analógiás előrejelzések egyéb meteorológiai változókon való lehetséges alkalmazhatóságára, aminek eredményeként arra jutottam, hogy a felhőalap magasság mellett a széllökés előrejelzés esetén lehet realitása az analógiás módszer alkalmazásának, tekintettel arra, hogy ennek a paraméternek az esetében a lokális befolyásoló tényezők szerepe kiemelkedően magas lehet.
A látásávolság kiemelt szerepét a szakirodalmi vonatkozások megállapításai és az analitikus úton származtatott elméleti megfontolások mellett az időjárási okokkal összefüggésbe hozható repülő események statisztikáival is alátámasztottam. Ezzel párhuzamosan arra is rámutattam, hogy a repüléssel illetve a repülés biztonságával foglalkozó nemzetközi szervezetek stratégiai céljaival összhangban olyan összetett egymásra épülő rendszerek alakultak ki, amelyek a folyamatos visszacsatolásokkal kiegészülve lehetővé teszik, hogy az egyre pontosabb előrejelzések ténylegesen hozzájáruljanak a repülésbiztonság magasabb szintjének biztosításához. A veszélyek pontosabb előrejelzése, azaz például a hatékonyabb, jobb verifikációs eredményekkel rendelkező előrejelző eljárások alkalmazása, megteremti a kockázatok sikeres kezelésének lehetőségét. A kockázatok sikeres kezelése pedig a repülési feladatok biztonságosabb végrehajtásához járul hozzá, hosszabb távon statisztikailag is igazolva a repülésbiztonság magasabb szintjét.

A katonai repülés meteorológiai támogatásához kialakított látástávolság előrejelző eljárások konstrukciós hátterének valamint a módszer kifejlesztése és alkalmazása során felhasznált eljárások módszertani leírásának részletes bemutatása során rávilágítottam, hogy a tisztán analógiás elvű előrejelzések kizárólag METAR táviratokat igényelnek bementi adatokként. Ez egyben azt is jelenti, hogy amennyiben historikus adatbázis rendelkezésre áll, akkor az előrejelző módszer szinte átalakítás nélkül alkalmazható. Ezzel megállapítottam, hogy az eljárás műveleti környezetben is könnyen adaptálható, ami az általában adathiányos területeken kiemelt értékkel bír.
A verifikációs eljárások szakirodalmi vonatkozásainak áttekintése alapján megállapítottam, hogy repülési eljárások esetében is alkalmazott határértékek széleskörű figyelembe vételére van szükség a látástávolság előrejelzések ellenőrzése során.

A verifikációs eljárások alapos szakirodalmi áttekintése alapján a vizsgált előrejelzések ellenőrzésére a kategorikus előrejelzések verifikációja esetén alkalmazható eljárást választottam ki. Ebben a döntésemben nagy súllyal az is szerepet játszott, hogy a választott módszer a verifikációs alapelvek megtartása mellett tudta biztosítani a kiértékelés teljes értékű

végrehajtását. Annak érdekében, hogy az összes vizsgált előrejelzési produktum esetében alkalmazható legyen az eljárás, a TAF táviratok kategorikus kiértékelését lehetővé tévő, önálló verifikációs módszertant dolgoztam ki.

A verifikációs eredmények elemzésével rámutattam, hogy az AHP módszerrel meghatározott súlyok jelentősen javították az analógiás előrejelzés teljesítményét. A TAF táviratok eredményeivel történő összehasonlítás alapján megállapítottam, hogy az analóg és a hibrid előrejelzések lényegesen jobb verifikációs eredményei miatt ezen előrejelzések alkalmazása magas hozzáadott értékkel bírna a repülésmeteorológiai támogatás végrehajtása során. Az eredmények részletes kiértékelésével arra is rámutattam, hogy az AHP súlyok alkalmazása független a kategória határ megválasztásától.

A hibrid előrejelzések időben stabil eredményei alapján rávilágítottam, hogy a hibrid előrejelzések teljesítménye a numerikus előrejelzés növekvő súlya ellenére sem mutat szignifikáns visszaesést az analóg előrejelzéshez képest az abszolút kategória eltérést figyelembe vevő súlyozás miatt.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Átfogó, részletes szakirodalmi kutatást hajtottam végre a látástávolság előrejelzésének kérdéskörében, melynek eredményeként egy olyan magyar nyelvű, összefoglaló munkát dolgoztam ki, ami a látástávolság előrejelzésével kapcsolatos tudományos kutatások jó elméleti kiindulási alapja lehet.
2. Elfogulatlan módszertant képviselő, átfogó verifikációs eljárások segítségével bebizonyítottam az AHP súlyok alkalmazásának hasznosságát az analógiás előrejelzések esetében.
3. Olyan összetett TAF verifikációs módszertant dolgoztam ki, ami lehetővé teszi a kitűzött ellenőrzési alapelvek megtartása mellett a különböző típusú előrejelzések összehasonlító verifikációját. Ennek segítségével megmutattam, hogy az analóg és hibrid előrejelzések verifikációs eredményei ultra-rövid időtávon meghaladják a repülőtéri előrejelzések teljesítményét függetlenül a választott kategória határtól.
4. A verifikációs eredmények alapján igazoltam, hogy a hibrid előrejelzések, a numerikus előrejelzések kezdeti (*t+0000*) beválásának figyelembe vételével, az analóg modell teljesítményének szintjére kerülnek.
5. Deduktív megközelítéseket alkalmazva megállapítottam, hogy az alacsony látástávolság, mint veszélyforrás pontosabb előrejelzésével az ehhez kapcsolódó repülésbiztonsági kockázat mérsékelhető, hozzájárulva ezzel a repülések biztonságosabb végrehajtásához.

AJÁNLÁSOK

Javaslom az értekezésemben bemutatott verifikációs módszertan operatív alkalmazását az MH repülésmeteorológiai előrejelzéseinek előírás szerinti verifikációs kötelezettségének teljesítése során.

Javaslom a kidolgozott előrejelző módszerek operatív alkalmazását a katonai repülések meteorológiai biztosítása során a repülésbiztonsági kockázatok csökkentése és a műveleti hatékonyság növelése érdekében. Javaslom, hogy a hibrid előrejelzések alkalmazásba vétele esetén az összeállításukhoz szükséges numerikus modell adatok előállítását az MH külső segítség és produktum igénybevétele nélkül önállóan végezze, biztosítva ezzel a nem katonai szervezetektől való függőségének csökkentését.

Javaslom, hogy értekezésem tudományos eredményeit és következtetéseit építsék be a meteorológus tisztek szakmai felkészítésének tematikájába.

TÉMAKÖRBŐL KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓIM

LEKTORÁLT FOLYÓIRATBAN MEGJELENT CIKKEK

1. **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: pp. 192-197. (2012)
2. 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) pp. 11-18. (2012)
3. **Tuba Zoltán**, Bottyán Zsolt, Wantuch Ferenc, Vidnyánszky Zoltán, Hadobács Katalin: Javaslat katonai műveletek tervezésének meteorológiai támogatási modelljére. HADMÉRNÖK 8:(3) pp. 294-304. (2013)
4. Hadobács Katalin, **Tuba Zoltán**, Wantuch Ferenc, Bottyán Zsolt, Vidnyánszky Zoltán: A pilóta nélküli légijárművek meteorológiai támogató rendszerének kialakítása és alkalmazhatóságának bemutatása esettanulmányokon keresztül. REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 25:(2) pp. 405-421. (2013)
5. **Tuba Zoltán:** Pilótanélküli repülőeszközök (UAV-k) és a látástávolság egyes kérdései. REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 26:(2) pp. 94-105. (2014)
6. **Tuba Zoltán:** Merevszárnyú repülőgépek felületi jegesedésének alternatív csökkentési módszerei. REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 1: pp. 46-58. (2014)
7. **Tuba Zoltán:** A repülésmeteorológia biztonságtechnikai vonatkozásai. HONVÉDSÉGI SZEMLE: A MAGYAR HONVÉDSÉG KÖZPONTI FOLYÓIRATA (2008-) 143: pp. 90-96. (2015)
8. **Tuba Zoltán**, Bottyán Zsolt: Analógiás elven alapuló repülésmeteorológiai előrejelzések és a makroszinoptikus időjárási szituációk kapcsolatának vizsgálata. REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 27:(2) pp. 162-168. (2015)
9. **Tuba Zoltán**, Kardos Péter, Szabó Péter: AMDAR adatok lehetséges felhasználása a repülésmeteorológiai előrejelzésben. REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 28:(2) pp. 165-178. (2016)
10. **Tuba Zoltán**, Bottyán Zsolt: Analóg és hibrid módszerek alkalmazása a horizontális látástávolság előrejelzésében. REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 29:(2) pp. 211-224. (2017)

IDEGEN NYELVŰ KIADVÁNYBAN MEGJELENT CIKKEK

1. **Tuba Z**, Vidnyánszky Z, Bottyán Z, Wantuch F, Hadobács K: Application of Analytic Hierarchy Process in fuzzy logic-based meteorological support system of unmanned aerial vehicles ACADEMIC AND APPLIED RESEARCH IN MILITARY SCIENCE (AARMS) 12:(2) pp. 221-228. (2013)
2. Bottyán Z, Gyöngyösi A Z, Wantuch F, **Tuba Z**, Kurunczi R, Kardos P, Istenes Z, Weidinger T, Hadobács K, Szabó Z, Balczó M, Varga Á, Bíróné Kircsi A, Horváth Gy: Measuring and Modeling of Hazardous Weather Phenomena to Aviation Using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS) IDŐJÁRÁS / QUARTERLY JOURNAL OF THE HUNGARIAN METEOROLOGICAL SERVICE 119 (3) pp. 307-335. (2015)
3. **Tuba Z**, Bottyán Z: Fuzzy Logic-Based Analogue Forecasting and Hybrid Modeling of Horizontal Visibility METEOROLOGY AND ATMOSPHERIC PHYSICS 130:(2) pp. 265-277. (2018)

KONFERENCIA KIADVÁNYBAN MEGJELENT ELŐADÁS

1. Complex weather support system for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) mission planning and execution In: Proceedings of Annual meeting of European Meteorological Society. Konferencia helye, ideje: Reading, Egyesült Királyság, 2013.09.09-2013.09.13. Reading: p. 1.
2. Application of Analogue Ensemble in Horizontal Visibility Forecasting In: Proceedings of Annual meeting of European Meteorological Society. EMS Annual Meeting Abstracts Vol. 14, EMS2017-208 Konferencia helye, ideje: Dublin, Írország 2017.09.04-07.

FELHASZNÁLT IRODALOM/IRODALOMJEGYZÉK

[1] Szun Ce: *A háború művészete*, Helikon Kiadó, Budapest, 2018. ISBN: 9789632273907

[2] Ált/213 Magyar Honvédség geoinformációs támogatási doktrína. A Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálat kiadványa 2014.

[3] F/2 Magyar Honvédség összhaderőnemi felderítő doktrína. A Magyar Honvédség kiadványa 2013.

[4] Ált/43 Magyar Honvédség összhaderőnemi doktrína. A Magyar Honvédség kiadványa 2012.

[5] Command and Control for Joint Land Operations, Joint Publications 3-31

[6] Allied Joint Doctrine For Non-Article 5 Crisis Response Operations, Joint Publications 3-4

[7] Allied Doctrine for Meteorological and Oceanographic Support to Joint Forces, Joint Publications 3-11

[8] The NATO Core Geographic Services System http://www.esri.com/industries/defense/~/media/files/pdfs/industries/defense/pdfs/nato.pdf

[10] NATO METOC Orientation Course: NATO Recognized Environmental Picture (REP)

[11] Meteorological and Oceanographic Operations, Joint Publications 3-59

[12] Sticz László, Csák Zoltán: A katonai döntéshozatali folyamat tendenciái napjainkban, *Hadtudomány*, 18, 1-15. 2008.

[13] Intelligence Preparation of the Battlefield/Battlespace, Army Techniques Publication No. 2-01.3

[14] Kézikönyv a meteorológiai támogatás végrehajtásáról, Főnökségi kiadvány, 2014.

[15] Dr. Hille Alfréd: *Légkörtan*, Atheneum kiadó, Budapest, 1941.

[16] W. S. Pike: A historical interpretation of fog and low cloud as hazards to aviation in Britain, *Weather*, 51 (1), 2-11. 2012.

[17] H. C. Willett: Fog and haze, their causes, distribution, and forecasting. *Monthly Weather Review*, 56 (11), 435-468. 1928.

[18] International Civil Aviation Organization (ICAO) Meteorological Service for International Air Navigation. Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation, 20th edition, Montreal, Canada, 2018.

[19] World Meteorological Organization. Technical regulations. Secretariat of the World Meteorological Organization, 2018.

[20] Bottyán Zsolt: A közszolgálati célú repülések meteorológiai támogatásáról II.: légkörünk jelenségei repülésmeteorológiai megközelítésben In: *Szilvássy László (szerk.) Repüléstudományi Szemelvények: A közfeladatot ellátó repülések meteorológiai biztosításának kérdései.* 152 p. Szolnok: Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő Intézet, 2017. pp. 27-50. (ISBN:978-615-5845-26-0)

[21] H. Koschmieder: Theory of horizontal visibility. *Contribut. Phys. Free Atmos*, 12, 33-53. 1924.

[22] *Guide to meteorological instruments and methods of observation.* World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland, 2008.

[23] L. Caraffa, J. P. Tarel: Daytime fog detection and density estimation with entropy minimisation. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (pp. 25). 2014.

[24] Bencze György, Major György, Mészáros Ernő: *Fizikai meteorológia*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1986.

[25] J. L. Gaumet, A. Petitpa: Lidar-transmissometer visibility comparisons over slant and horizontal paths. *Journal of Applied Meteorology*, 21 (5), 683-694. 1982.

[26] https://en.wikipedia.org/wiki/runway_visual_range#/media/file:lisbon%27s_runway_21.jpg

[27] International Civil Aviation Organization (ICAO): Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices. Doc 9328, AN/908 3rd Edition 2005.

[28] C. LeRoy Meisinger: The fog menace in aviation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2 (4), 55-56. 1921.

[29] E. B. Calvert: Radio distribution of forecasts and warnings. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2 (6), 73-75. 1921.

[30] W. R. Gregg: Visibility. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2 (6), 75. 1921.

[31] F. Entwistle: Fog. *The Journal of the Royal Aeronautical Society*, 32 (209), 342-384. 1928.

[32] F. Entwistle: The development of meteorological services for civil aviation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 54 (228), 293-298. 1928.

[33] W. Goodenough, Q. Riley, H. R. Mill, G. C. Simpson, A. Stephenson: The weather on a greenland air route: Discussion *The Geographical Journal* 80 (1) 22-30. 1932.

[34] H. Diamond: Radio System for Landing Aircraft during Fog. *The Scientific Monthly* 37 (1), 94-96. 1933.

[35] H. Diamond, F. W. Dunmore: A Radio System for Blind Landing of Aircraft in Fog. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 16, No. 11 pp. 678-685. 1930.

[36] https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930080775.pdf (2016.06.20.)

[37] P. F. Clapp, R. G. Stone: The causes and forecasting of fogs at Cheyenne, Wyoming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 19 (2), 66-73. 1938.

[38] P. R. K. Rao: Weather Forecasting For Aviation With Special Reference To Local Forecasts. *In Proceedings of the National Institute of Sciences of India* (Vol. 5, p. 129). National Institute of Sciences of India. 1939.

[39] Jr, P. Williams: A Comparative Study of Fog and Low Ceilings at the Portland, Ore.,(Swan Is.) Airport and the New Portland-Columbia Airport. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 22 (3), 109-112. 1941.

[40] T. E. Jermin: A Study of Fog and Low Cloud At Pendleton, Oregon. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 22 (4), 151-161. 1941

[41] W. H. Woodward: Fog and stratus at Seattle. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 22 (6), 242-249. 1941.

[42] D. A. Mathews: Use of a Heating-Condensation Ratio in Time-Forecasting of Fog in the Great Valley of California. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 24 (6), 231-238. 1943.

[43] N. Johnson: Meteorology in War. *Royal United Services Institution Journal*, 94 (574), 237-247. 1949.

[44] A. Simon: Methods of Stratus and Fog Forecasting for Payne Field (Farouk Airport) and Vicinity, Egypt. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 31 (7), 257-263. 1950.

[45] Jr H. G. Houghton: Method of dispelling fog. U.S. Patent No. 2,052,626. 1 Sep. 1936.

[46] R. T. Stone: Method for dispersing natural atmospheric fogs and clouds. U.S. Patent No. 2,908,442. 13 Oct. 1959.

[47] H. Elton, G. Alfred: Methods of dispersing fogs. U.S. Patent No. 2,895,679. 21 Jul. 1959.

[48] C. A. Pearson, M. J. Koomen, R. Tousey: Visual Measurements of Atmospheric Transmission of Light at Night. *Bulletin of the American Meteorological Society* 33 (3), 117-121. 1952.

[49] D. R. Brown: Meteorological range meters, MK II and MK III. *Journal of the American Society for Naval Engineers* 63 (1) 95-98. 1951.

[50] J. R. Bibby: A Photo-electric Visibility Meter. *75th anniversary volume of the Journal of the Meteorological Society of Japan* 378. 1957.

[51] https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/lt31-Datasheet-B210416EN-E.pdf (2018.06.20.)

[52] J. S. Restivo: Persistence probability. No. TP-66-1. Weather Wing (4TH) ENT AFB CO, 1966.

[53] J. T. McCabe: Estimating conditional probability and persistence. No. AWS-TR-208. Air Weather Service Scott AFB IL, 1968.

[54] R. J. Shafer, S. J. Donaldson, W. R. Biggers, P. W. Funke, J. T. Hilworth: Research directed toward the use of synoptic simulation to develop forecast models compatible for use in system 433L. Eastern Air Lines Inc. Atlanta GA. 1962.

[55] R. B. Carson, C. H. Rodney: On the forecasting of winter fog: A geographical approach. *Journal of Applied Meteorology* 2 (3), 351-357. 1963.

[56] J. R. Bocchieri, R. L. Crisci, H. R. Glahn, F. Lewis, F. T. Globokar: Recent developments in automated prediction of ceiling and visibility. Journal of Applied Meteorology, 13 (2), 277-288. 1974.

[57] H. R. Glahn, D. A. Lowry: The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. *Journal of applied meteorology*, 11 (8), 1203-1211. 1972.

[58] W. H. Klein, H. R. Glahn: Forecasting local weather by means of model output statistics. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 55 (10), 1217-1227. 1974.

[59] H. Hughes: Model Output Statistics Forecast Guidance (No. USAFETAC-TN-76-3). Air Force Environmental Technical Applications Center Scott AFB ILL. 1976.

[60] E. B. Fawcett: Current capabilities in prediction at the National Weather Service's National Meteorological Center. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 58 (2), 143-149. 1977.

[61] J. R. Bocchieri, H. R. Glahn, F. T. Globokar: An Application of Model Output Statistics to the Prediction of Ceiling and Visibility. National Weather Service Silver Spring MD Techniques Development Lab. 1973.

[62] G. J. Sikula, T. H. V. Haar: Very short range local area weather forecasting using measurements from geosynchronous meteorological satellites. *Geophysik und Bioklimatologie*, Serie A, 22 (2-3), 227-256. 1973.

[63] https://en.wikipedia.org/wiki/ATS-3#/media/File:ATSIII_10NOV67_153107.jpg (2016.06.20)

[64] T. Yamada, G. Mellor: A simulation of the Wangara atmospheric boundary layer data. *Journal of the Atmospheric sciences*, 32 (12), 2309-2329. 1975.

[65] T. Yamada, G. Mellor: A numerical simulation of BOMEX data using a turbulence closure model coupled with ensemble cloud relations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105 (446), 915-944 1979.

[66] D. A. Oliver, W. S. Lewellen, G. G. Williamson: The interaction between turbulent and radiative transport in the development of fog and low-level stratus. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35 (2), 301-316. 1978.

[67] L. Musson-Genon: Numerical simulation of a fog event with a one-dimensional boundary layer model. *Monthly Weather Review*, 115 (2), 592-607. 1987

[68] J. Mason: The physics of radiation fog. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 60 (1), 486-499. 1982.

[69] S. D. Burk, W. T. Thompson: A vertically nested regional numerical weather prediction model with second-order closure physics. *Monthly Weather Review*, 117 (11), 2305-2324. 1989.

[70] I. Gultepe, G. A. Isaac: Scale effects on averaging of cloud droplet and aerosol number concentrations: observations and models. *Journal of Climate*, 12 (5), 1268-1279. 1999.

[71] J. Teixeira, P. M. Miranda: Fog prediction at Lisbon airport using a one-dimensional boundary layer model. *Meteorological Applications*, 8 (4), 497-505. 2001.

[72] M. D. Müller, C. Schmutz, E. Parlow: A one-dimensional ensemble forecast and assimilation system for fog prediction. *Pure and Applied Geophysics*, 164 (6-7), 1241-1264. 2007.

[73] I. Gultepe, M. D. Müller, Z. Boybeyi: A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models. Journal of applied meteorology and climatology, 45 (11), 1469-1480. 2006.

[74] Á. Molnár, D. Párkányi, K. Imre, V. Gácser, E. Czágler: A closure study on aerosol extinction in urban air in Hungary. *Időjárás, Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 120 (2), 163-181. 2016

[75] I. Gultepe, R. Tardif, S. C. Michaelides, J. Cermak, A. Bott, J. Bendix, W. Jacobs: Fog research: A review of past achievements and future perspectives. *Pure and Applied Geophysics*, 164 (6-7), 1121-1159. 2007.

[76] I. Gultepe, S. G. Cober, P. King, G. Isaac, P. Taylor, B. Hansen: The fog remote sensing and modeling (FRAM) field project and preliminary results. In *AMS 12th Cloud Physics Conference* pp. 9-14. 2006.

[77] B. Zhou, J. Du, J. McQueen, G. Dimego, G. Manikin, B. Ferrier, Z. Toth, H. Juang, M. Hart, J. Han: An introduction to NCEP SREF aviation project. In *Preprint. In 11th Conference* Vol. 27, 4-8. 2004.

[78] M. T. Stoelinga, T. T. Warner: Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event. *Journal of Applied Meteorology*, 38 (4), 385-404. 1999.

[79] F. Wantuch: Visibility and fog forecasting based on decision tree method. *Időjárás*, 105, 29-38. 2001.

[80] D. F. Leipper: Fog forecasting objectively in the California coastal area using LIBS. *Weather and forecasting*, 10 (4), 741-762. 1995.

[81] R. L. Vislocky, J. M. Fritsch: An automated, observations-based system for short-term prediction of ceiling and visibility. *Weather and Forecasting*, 12 (1), 31-43. 1997

[82] S. M. Leyton, J. M. Fritsch: Short-term probabilistic forecasts of ceiling and visibility utilizing high-density surface weather observations. *Weather and Forecasting*, 18 (5), 891-902. 2003.

[83] A. Pasini, S. Potestà: Short-range visibility forecast by means of neural-network modelling: a case-study. *Il Nuovo Cimento*, 18 (5), 505-516. 1995.

[84] A. Pasini, V. Pelino, S. Potestà: A neural network model for visibility nowcasting from surface observations: Results and sensitivity to physical input variables. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106 (D14), 14951-14959. 2001.

[85] D. Fabbian, R. de Dear, S. Lellyett: Application of artificial neural network forecasts to predict fog at Canberra International Airport. *Weather and forecasting*, 22 (2), 372-381. 2007.

[86] C. Marzban, S. Leyton, B. Colman: Ceiling and visibility forecasts via neural networks. *Weather and forecasting*, 22 (3), 466-479. 2007.

[87] Hadobács Katalin, Bottyán Zsolt: Neurális hálózatok és alkalmazásuk a repülés-meteorológiában. *Repüléstudományi Közlemények*, Szolnok, 27 (2), 36-48. 2015.

[88] Nagy Roland: Új módszerek vizsgálata a légiforgalmi irányításban használatos, látástávolságra vonatkozó döntéstámogató célprognózisok készítésében Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtéren. *Diplomamunka*. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Kardos Péter). 69 p. 2014.

[89] Fricke Cathy, Kardos Péter: Neurális hálózatok alkalmazása a látástávolság ultrarövidtávú előrejelzésében. *Repüléstudományi Közlemények*, Szolnok, 29 (2), 103-110. 2017.

[90] L. A. Zadeh: Fuzzy sets. *Information and control*, 8 (3), 338-353. 1965.

[91] B. K. Hansen: Analog forecasting of ceiling and visibility using fuzzy sets. In *2nd Conference on Artificial Intelligence*, American Meteorological Society (pp. 1-7). 2000.

[92] D. Riordan, B. K. Hansen: A fuzzy case-based system for weather prediction. *Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications*, 10 (3), 139-146. 2002.

[93] B. K. Hansen: A fuzzy logic–based analog forecasting system for ceiling and visibility. *Weather and Forecasting*, 22 (6), 1319-1330. 2007

[94] T. Hicks, T. Crawford, M. Wilson: A Fuzzy Logic System for Automated Short Term Aviation Weather Forecasts. In *Proceedings of the 3rd Conference on Artificial Intelligence Applications to the Environmental Science*, 2003.

[95] 14/2000. (XI. 14.) KöViM rendelet a Magyar Köztársaság légterében és repülőterein történő repülések végrehajtásának szabályairól

[96] Z. Tuba, Z. Vidnyánszky, Z. Bottyán, F. Wantuch, K. Hadobács: Application of Analytic Hierarchy Process in fuzzy logic-based meteorological support system of unmanned aerial vehicles. *AARMS: Academic & Applied Research in Military Science*, 12 (2), 2013.

[97] D. E. Rudack, J. E. Ghirardelli: A comparative verification of localized aviation model output statistics program (LAMP) and numerical weather prediction (NWP) model forecasts of ceiling height and visibility. *Weather and Forecasting*, 25 (4), 1161-1178. 2010.

[98] B. Zhou, J. Du, J. McQueen, G. Dimego: Ensemble forecast of ceiling, visibility and fog with NCEP Short-Range Ensemble Forecast System (SREF). In *Aviation, Range and Aerospace Meteorology Special Symposium on Weather-Air Traffic Management Integration, 89th AMS Annual Meeting*. 2009.

[99] S. Benjamin, C. Alexander, S. Weygandt, J. Brown, T. Smirnova, M. Hu, G. Thompson: Improved Ceiling and Visibility Forecasts from the US NOAA HRRR/RAP-Hydrometeor Assimilation and Modeling. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* 19. p. 19312. 2017.

[100] Z. Bottyán, A. Z. Gyöngyösi, F. Wantuch, Z. Tuba, R. Kurunczi, P. Kardos, Z. Istenes, T. Weidinger, K. Hadobács, Z. Szabó, M. Balczó, Á. Varga, A. Bíróné Kircsi, G. Horváth: Measuring and modeling of hazardous weather phenomena to aviation using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS). *Időjárás, Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 119 (3), 307-335. 2015.

[101] Várkonyi Anikó, Kardos Péter: Felhőalap és felhőborítottság rövid távú előrejelzése neurális hálózat segítségével, *Repüléstudományi Közlemények*, 30 (1), 127-138. 2018.

[102] R. W. Gent, N. P. Dart, J. T. Cansdale: *Aircraft Icing*. Philosophical Transactions of The Royal Society. Lond. A., 358, 2873-2911. 2000.

[103] B. L. Messinger: Equilibrium temperature on an unheated icing surface as a function of airspeed. *Journal Aeronautical Science*, 20, 29-41. 1953.

[104] Óvári Gyula: Biztonságtechnika a repülésben, a repülőeszközök jégtelenítő rendszerei, *Repüléstudományi Közlemények*, 20 (2), 2008.

[105] Wantuch Ferenc, Simon Sándor, Koczor Anita: Légi jármű jegesedése egy esettanulmány kapcsán, *Repüléstudományi Közlemények*, 23 (2), 2011.

[106] D. Cornell, C. A. Donahue, C. Keith: A Comparison of Aircraft Icing Forecast Models (No. AFCCC/TN-95/004). *Air Force Combat Climatology Center Scott AFB* IL. 1995.

[107] J. Reisner, R. M. Rasmussen, R. T. Bruintjes: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124 (548), 1071-1107. 1998.

[108] E. P. Lozowski, J. R. Stallabrass, P. F. Hearty: The icing of an unheated, nonrotating cylinder. Part I: A simulation model. *Journal of climate and applied meteorology*, 22 (12), 2053-2062. 1983.

[109] E. P. Lozowski, J. R. Stallabrass, P. F. Hearty: The icing of an unheated, nonrotating cylinder. Part I: Icing wind tunnel experiment. *Journal of climate and applied meteorology*, 22 (12), 2063-2074. 1983.

[110] Z. Bottyán: Estimation of structural icing intensity and geometry of aircrafts during different conditions – a fixed-wing approach. *Időjárás, Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 115 (4), 275-288. 2011.

[111] B. C. Bernstein, T. A. Omeron, F. McDonough, M. K. Politovich: The relationship between aircraft icing and synoptic-scale weather conditions. *Weather and forecasting*, 12 (4), 742-762. 1997.

[112] Bottyán Zsolt, Tuba Zoltán: felületi jegesedést okozó időjárási helyzetek statisztikai vizsgálata és a jégakkréció becslése pilóta nélküli repülőeszközök (UAVs) esetében, *Repüléstudományi Közlemények*, 24 (2), 2012.

[113] A. Tafferner, T. Hauf, C. Leifeld, T. Hafner, H. Leykauf, U. Voigt: ADWICE: Advanced Diagnosis and Warning System for Aircraft Icing Environments. *Weather and forecasting*, 18 (2), 184-203. 2003.

[114] R. Sharman, C. Tebaldi, G. Wiener, J. Wolff: An integrated approach to mid-and upper-level turbulence forecasting. *Weather and forecasting*, 21 (3), 268-287. 2006.

[115] J. N. Koshyk, K. Hamilton: The horizontal kinetic energy spectrum and spectral budget simulated by a high-resolution troposphere–stratosphere–mesosphere GCM. *Journal of the atmospheric sciences*, 58 (4), 329-348. 2001.

[116] Götz Gusztáv: Turbulencia, káosz, pillangóhatás. *Légkör* 51 (4), 15-22. 2006.

[117] J. A. Dutton, H. A. Panofsky: Clear air turbulence: A mystery may be unfolding. *Science*, 167 (3920), 937-944. 1970.

[118] R. Honnert, V. Masson, F. Couvreux: A diagnostic for evaluating the representation of turbulence in atmospheric models at the kilometric scale. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68 (12), 3112-3131. 2011.

[119] Y. Seity, P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, V. Masson: The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, 139 (3), 976-991. 2011.

[120] R. D. Sharman, J. D. Doyle, M. A. Shapiro: An investigation of a commercial aircraft encounter with severe clear-air turbulence over western Greenland. *Journal of Applied Meteorology and climatology*, 51 (1), 42-53. 2012.

[121] T. P. Lane, R. D. Sharman: Intensity of thunderstorm-generated turbulence revealed by large-eddy simulation. Geophysical Research Letters, 41 (6), 2221-2227. 2014.

[122] R. D. Sharman, T. Lane: Aviation Turbulence. Springer International Publishing Switzerland. 2016.

[123] N. Wildmann, S. Ravi, J. Bange: Towards higher accuracy and better frequency response with standard multi-hole probes in turbulence measurement with remotely piloted aircraft (RPA). *Atmospheric Measurement Techniques*, 7 (4), 1027-1041. 2014.

[124] W. H. Klein, H. R. Glahn: Forecasting local weather by means of model output statistics. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 55 (10), 1217-1227. 1974.

[125] G. M. Carter: Automated prediction of surface wind from numerical model output. *Monthly Weather Review*, 103 (10), 866-873. 1975.

[126] J. R. Wiedenfeld: Localized Aviation MOS Program (LAMP): Statistical guidance of wind speed, direction, and gusts for aviation weather. In *Preprints, 21st Conf. on Weather Analysis and Forecasting/17th Conf. on Numerical Weather Prediction, Washington*, DC, American Meteorological Society Vol. 1. 2005.

[127] T. L. Thorarinsdottir, T. Gneiting: Probabilistic forecasts of wind speed: ensemble model output statistics by using heteroscedastic censored regression. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, 173 (2), 371-388. 2010.

[128] L. Delle Monache, T. Nipen, Y. Liu, G. Roux, R. Stull: Kalman filter and analog schemes to postprocess numerical weather predictions. *Monthly Weather Review*, 139 (11), 3554-3570. 2011.

[129] A. K. Showalter: A stability index for thunderstorm forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34 (6), 250-252. 1953.

[130] R. A. Peppler: A review of static stability indices and related thermodynamic parameters. *Illinois State Water Survey*. 1988.

[131] C. A. Doswell III: The Operational Meteorology of Convective Weather. Volume 1. *Operational Mesoanalysis* (No. AWS/TN-83/001). Air Weather Service Scott AFB IL. 1982.

[132] J. W. Wilson, N. A. Crook, C. K. Mueller, J. Sun, M. Dixon: Nowcasting thunderstorms: A status report. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (10), 2079-2100. 1998.

[133] A. J. Litta, U. C. Mohanty: Simulation of a severe thunderstorm event during the field experiment of STORM programme 2006, using WRF—NMM model. *Current Science* 95 (2), 2008.

[134] Á. Horváth, I. Geresdi, K. Csirmaz: Numerical simulation of a tornado producing thunderstorm: A case study. *Időjárás/Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 110 (3-4), 279-297. 2006.

[135] Nemzeti légügyi stratégia 2011.

[136] Németh József: A repülésbiztonság, mint stratégiai kérdés. *Repüléstudományi közlemények*, 16 (2), 2004.

[137] Dudás Zoltán: Repülőesemény statisztikák. *Repüléstudományi közlemények*, 18 (2), 2006.

[138] Kiss Sándor: *Biztonságtechnika alapjai. Főiskolai jegyzet*, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Bolyai János Katonai Műszaki Főiskolai kar, Budapest, 2004.

[139] Tuba Zoltán: A repülésmeteorológia biztonságtechnikai vonatkozásai. *Honvédségi Szemle: A Magyar Honvédség központi folyóirata (2008-)* (143) 90-96. 2015.

[140] E. Edwards: Man and machine: systems for safety. In: *Proceedings of British Airline Pilots Associations Technical Symposium. British Airline Pilots Associations*, pp. 21-36. London, Egyesült Királyság, 1972.

[141] F. H. Hawkins: *Human Factors in Flight*. Ashgate Publishing Limited, Egyesült Királyság, 1993.

[142] MC 0445/2 – NATO Criteria and Standards For Airfields.

[143] International Civil Aviation Organization (ICAO): Safety Management Manual (SMM). Doc 9859, Third edition, 2013.

[144] Dudás Zoltán: A repülési biztonságkultúra fejlesztésének lehetőségei a Magyar Honvédség légierejében különös tekintettel az emberi tényező formálására. PhD értekezés, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Kossuth Lajos Hadtudományi Kar, Hadtudományi Doktori Iskola, Budapest, 2007.

[145] http://www.kbsz.hu/j25/dokumentumok/2010-317.pdf (2018.01.02.)

[146] Bottyán Zsolt: A CFIT típusú repülőgép-katasztrófák túlélési arányának alakulása néhány földrajzi paraméter függvényében. *Repüléstudományi közlemények*, 11 (1), 1999.

[147] Bottyán Zsolt: Kísérlet egy repülőgép-katasztrófa meteorológiai viszonyainak rekonstrukciójára – a Malév HA-MOH repülőgépének balesete. *Repüléstudományi közlemények*, 20 (3), 2008.

[148] Federeal Aviation Administration: Weather-related aviation accident study 2003–2007 2010.

https://www.asias.faa.gov/i/studies/2003-2007weatherrelatedaviationaccidentstudy.pdf (2018. 08. 28.)

[149] A. J. Fultz, W. S. Ashley: Fatal weather-related general aviation accidents in the United States. *Physical Geography*, 37 (5), 291-312. 2016.

[150] EASA integrated the 'Weather Information to Pilots' project within the 'All Weather Operations' (AWO) activities (RMT.0379)

https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA-Weather-Information-to-Pilot-Strategy-Paper.pdf (2018. 08. 28.)

[151] R. Khatwa, A. L. C. Roelen: An Analysis of Controlled Flight Into Terrain (CFIT) Accidents of Commercial Operators 1988 Through 1994. *Flight Safety Digest,* 15 (4). 1996.

[152] https://www.ntsb.gov/news/speeches/rsumwalt/documents/sumwalt_140811.pdf (2019.01.02)

[153] P. Herzegh: 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.

[154] R. L. Bankert, M. Hadjimichael: Data mining numerical model output for single-station cloud-ceiling forecast algorithms. *Weather and Forecasting*, 22 (5), 1123-1131. 2007.

[155] J. E. G. Ghirardelli, B. Glahn: The Meteorological Development Laboratory's Aviation Weather Prediction System. *Weather and Forecasting* 25, 1027–1051. 2010.

[156] R. E. Bateman, P. Herzegh: An exploration of an automated analysis product for ceiling and visibility: potential impacts on general aviation weather decision making. *23rd Conference on IIPS on 15–18 January 2007, San Antonio, TX, USA*, 2007.

[157] T. Bergot, D. Carrer, J. Noilhan, P. Bougeault: Improved site-specific numerical prediction of fog and low clouds: A feasibility study. *Weather and Forecasting*, 20, 627–646. 2005.

[158] L. S. Groff, J. M. Price: General aviation accidents in degraded visibility: a case control study of 72 accidents. *Aviation, space, and environmental medicine*, 77 (10), 1062–1067. 2006.

[159] C. G. Souders, R. C. Showalter: 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.

[160] R. Keith, S. M. Leyton: An experiment to measure the value of statistical probability forecasts for airports. *Weather and Forecasting*, 22 (4), 928–935. 2007.

[161] Future Aeronautical Meteorological Information Service Delivery, White Paper, Developed by the ICAO Meteorology Panel

https://www.icao.int/airnavigation/METP/Panel%20Documents/White%20Paper%20Future%20Aeronautical%20Meteorology%20Information%20Delivery%2011October2018.docx (2019.01.02.)

[162] K. Petty, B. Carmichael, G. Wiener, M. Petty, M. Limber: A fuzzy logic system for theanalysis and prediction of cloud ceiling and visibility. *9th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Orlando, Fl.*, American Meteorological Society 331–333., 2000.

[163] T. Saaty: A scaling method for priorities in hierarchical structures, *Journal of mathematical psychology*, 15 (3), 234-281., 1977.

[164] Z. Tuba, Z. Bottyán: Fuzzy Logic-Based Analogue Forecasting and Hybrid Modeling of Horizontal Visibility *Meteorology and Atmospheric Physics*, 130 (2), 265-277. 2018.

[165] Temesi József: *A döntéselmélet alapjai*. Aula, 2002.

[166] Rapcsák Tamás: *Többszempontú döntési problémák*. MTA Sztaki, 2007.

[167] Gyarmati József: Döntési modell kialakítása közbeszerzési eljárás során. *Hadmérnök*, 3, 36-52., 2007.

[168] J. Gyarmati, S. Felházi, G. Kende: Choosing the Optimal Mortar for an Infantry Battalion's Mortar Battery with Analytic Hierarchy Process using Multivariate Statistics. In: *Gyarmati József – Felházi Sándor – Kende György: Decision Support Methodologies for Acquisition of Military Equipment*, Brüsszel, Belgium, 2009.10.22-2009.10.23. Brüsszel: NATO RTO, pp. 1-12. (ISBN: 978-92-837-0101-9) 2009.

[169] T. L. Saaty: How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48 (1), 9-26. 1990.

[170] Tuba Zoltán: Pilótanélküli repülőeszközök (UAV-k) és a látástávolság egyes kérdései. *Repüléstudományi Közlemények* 26 (2) 94-105. 2014.

[171] 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), 11-18. 2012.

[172] 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, 192-197, 2012.

[173] C. A. Doswell III: Verification of Forecasts of Convection: Uses, Abuses, and Requirements. *Preprints, 5th Australian Severe Thunderstorm Conference Bureau of Meteorology, 29 July - 2 August, Avoca Beach, New South Wales, Australia,* 1996.

[174] A. H. Murphy: What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting. *Weather and forecasting*, 8 (2), 281-293. 1993.

[175] C. A. Doswell III, R. Davies-Jones, D. L. Keller: On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables. *Weather and Forecasting* 5 (4), 576–585, 1990.

[176] P. Nurmi: 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.)

[177] I.T. Jolliffe, D.B. Stephenson: *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Sciences.* Wiley, 2003.

[178] C. K. Kluepfel: 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.)

[179] G. Mahringer: Terminal aerodrome forecast verification in Austro Control using time windows and ranges of forecast conditions. *Meteorological Application* 15 (1) 113–123, 2008.

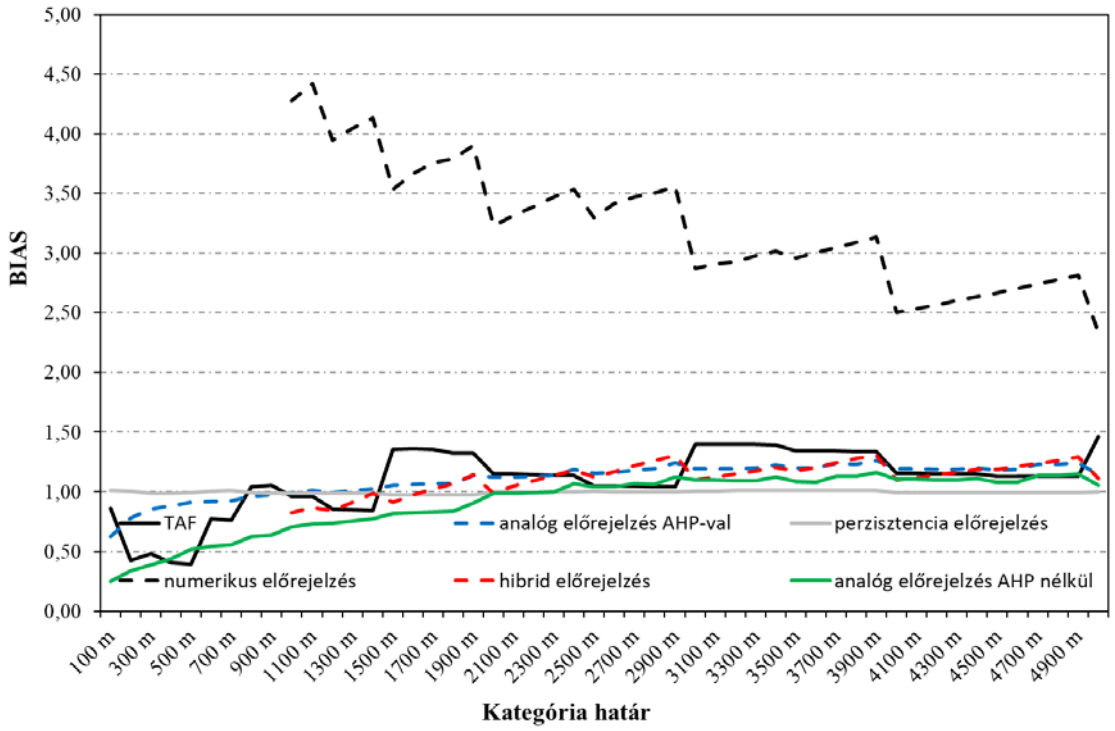
FOGALMAK ÉS RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

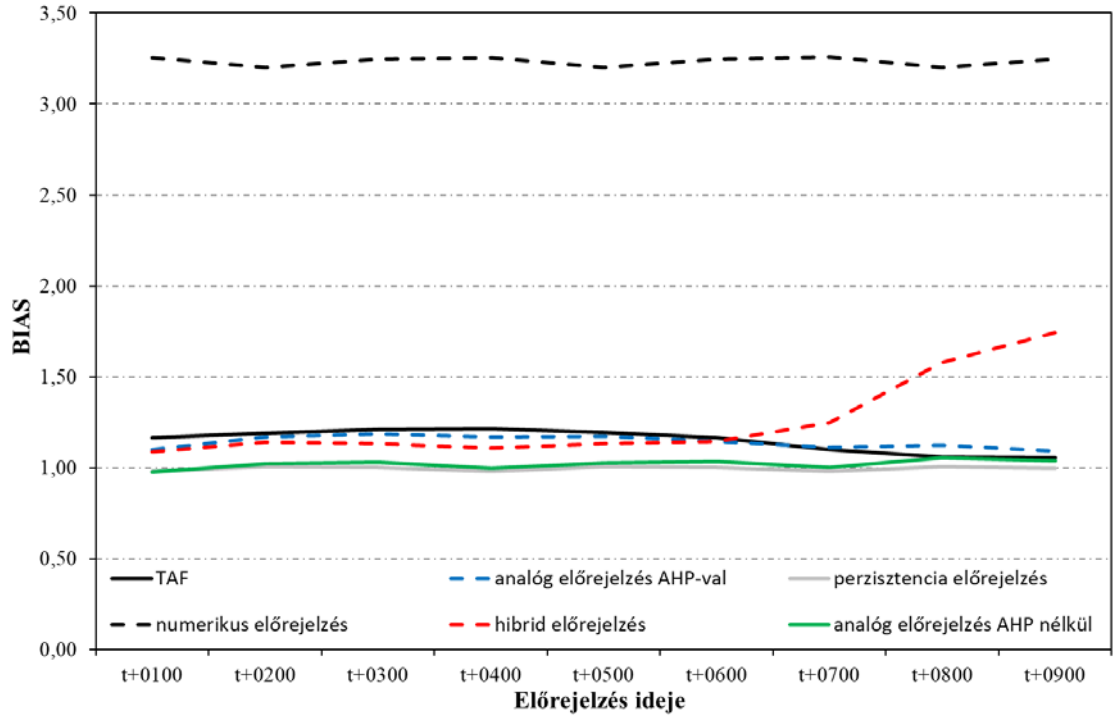
ABV	Atom, Biológiai, Vegyi
AHP	Analytic Hierarchy Process
AWO	All Weather Operation
CAVOK	Ceiling And Visibility OK
CBRN	Chemical, Biological, Radiological, Nuclear
CFIT	Controlled Flight Into Terrain
CSI	Critical Success Index
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EPAS	European Plan for Aviation Safety
FAR	False Alarm Ratio
FOGSI	FOG Stability Index
GEM	Global Environmental Multiscale
GFS	Global Forecast System
HIT	HIT rate
HSS	Heidke Skill Score
HVKF	Honvéd Vezérkarfőnök
ICAO	International Civil Aviation Organization
IFR	Instrument Metorological Conditions
IMC	Instrument Flight Rules
IMETOC	Integrated Meteorological and Oceanographic
IPB	Intelligence Preparation of Battlefield/Battlespace
LVIK	Légi Vezetési és Irányítási Központ
MCPP	Marine Corps Planning Process
MDMP	Military Decision-Making Process
METAR	METeorological Aerodrom Report
MH GEOSZ	Geoinformációs Szolgálat
MHP LESZ	Magyar Honvédség Parancsnokság Légierő Szemlélőség
MOR	Meteorological Optical Range

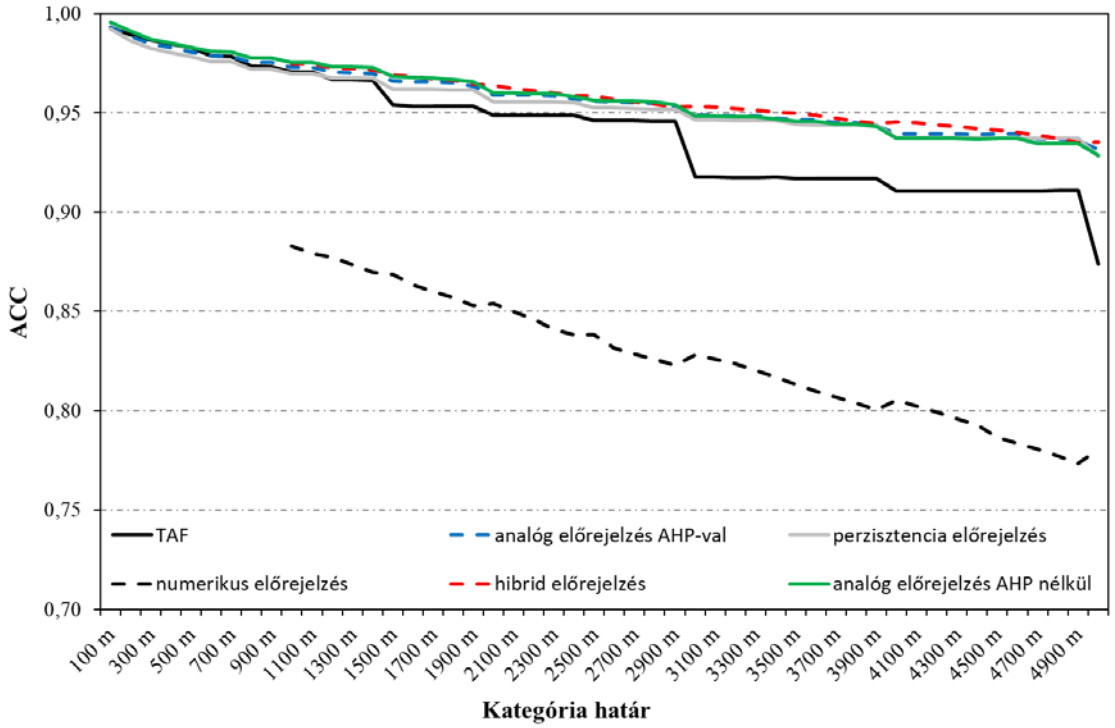
MOS	Model Output Statistic
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NATO	North Atlantic Treaty Organisation
NIMCC	NATO IMETOC Coordination Center
NTSB	National Transportation Safety Board
OMSZ	Országos Meteorológiai Szolgálat
PIREP	PIlot REPort
POD	Probability of Detection
POFD	Probability of False Detection
RAP	Recognized Air Picture
REA	Rapid Environmental Assessment
REP	Recognized Environmental Picture
RGP	Recognized Ground Picture
RVR	Runway Visual Range
SMS	Safety Management System
STANAG	STANdardization Agrement
SWIM	System Wide Information Management
TAF	Terminal Aerodrom Forecast
TS	Threat Score
UTC	Universal Time Coordinated
VFR	Visual Flight Rules
VMC	Visual Meteorological Conditions
WMO	World Meteorological Organization

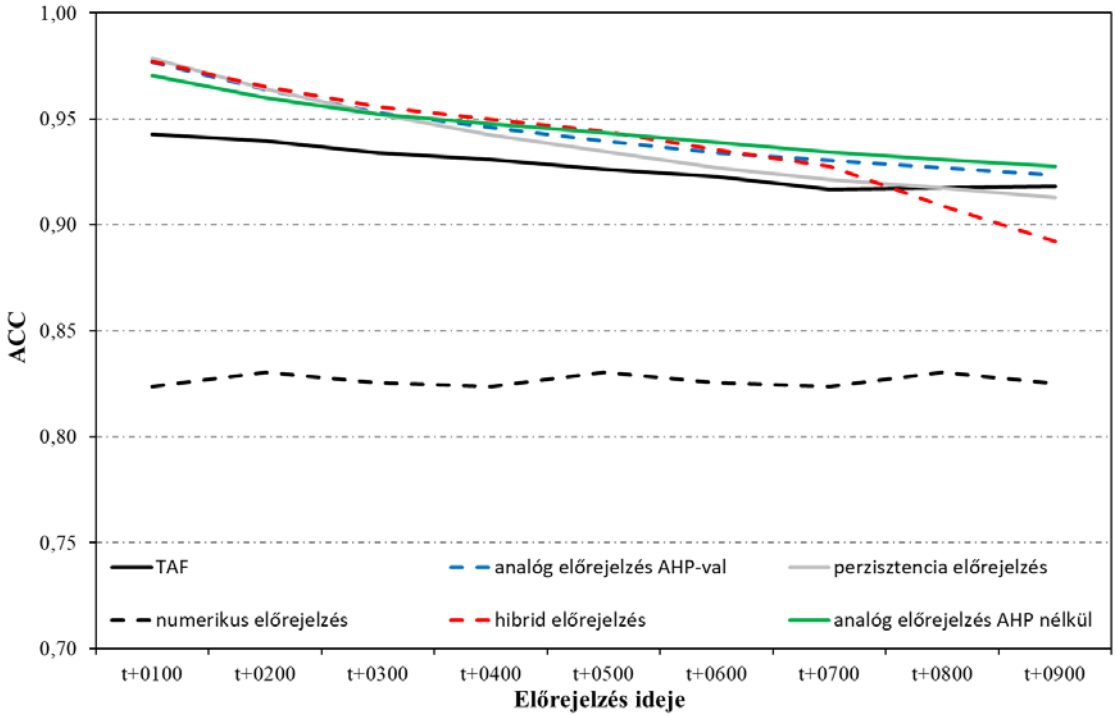
FÜGGELÉK/ MELLÉKLETEK

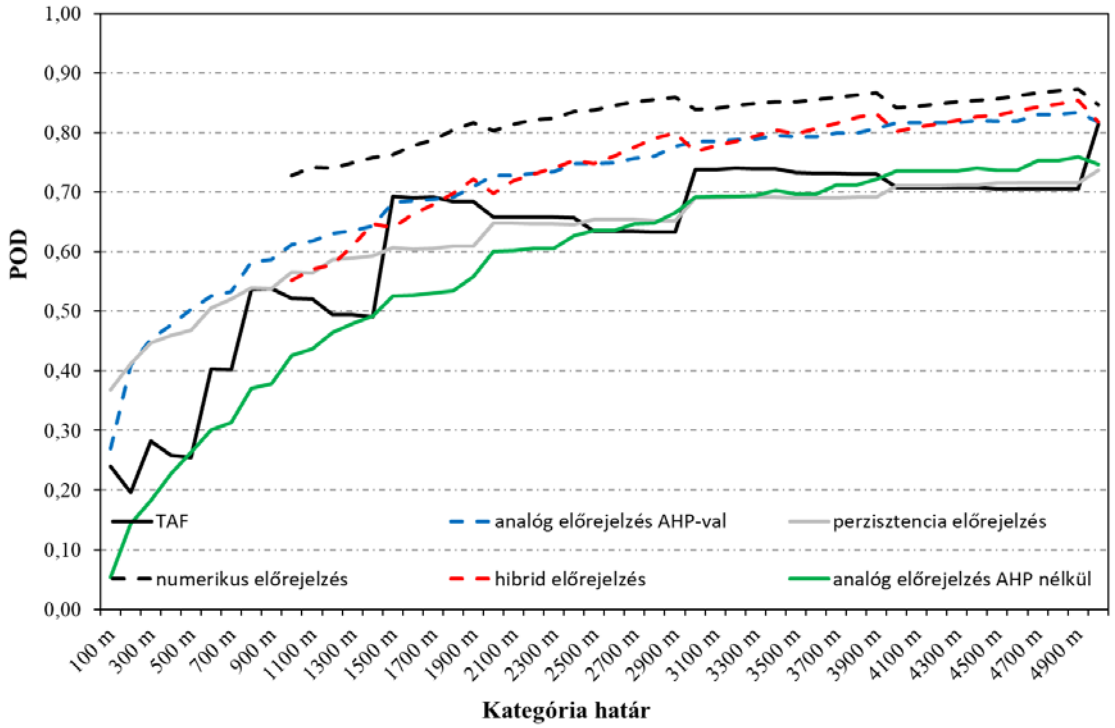
A verifikációs paraméterek kategória határra és az előrejelzés idejére átlagolt értékei:

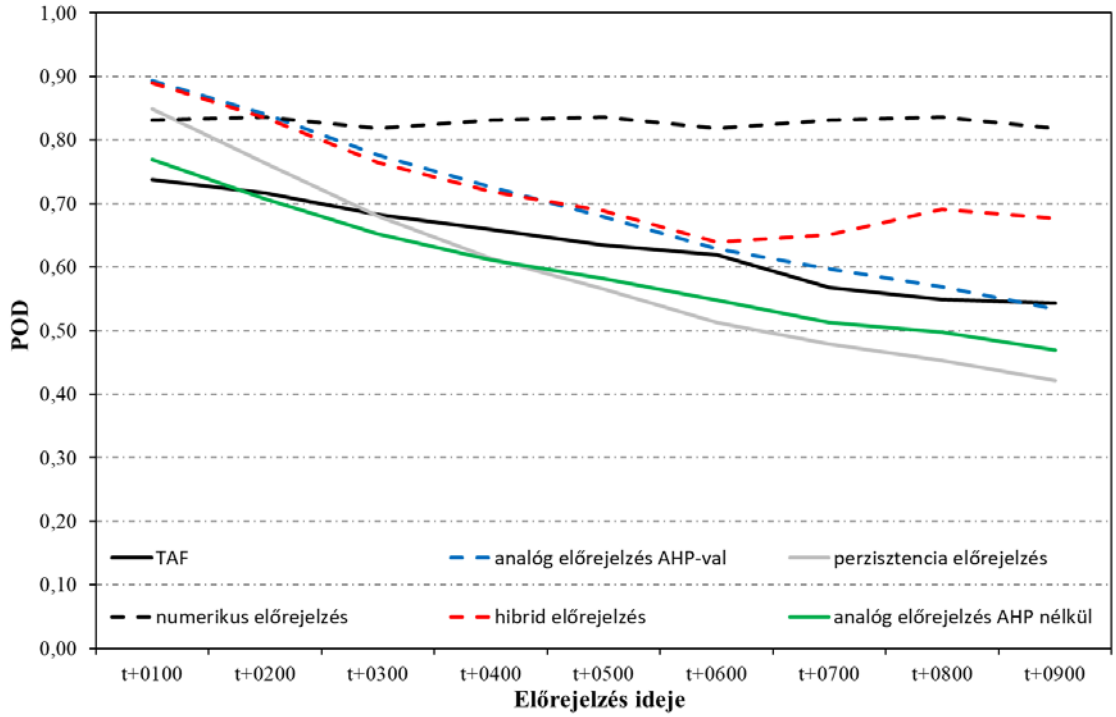


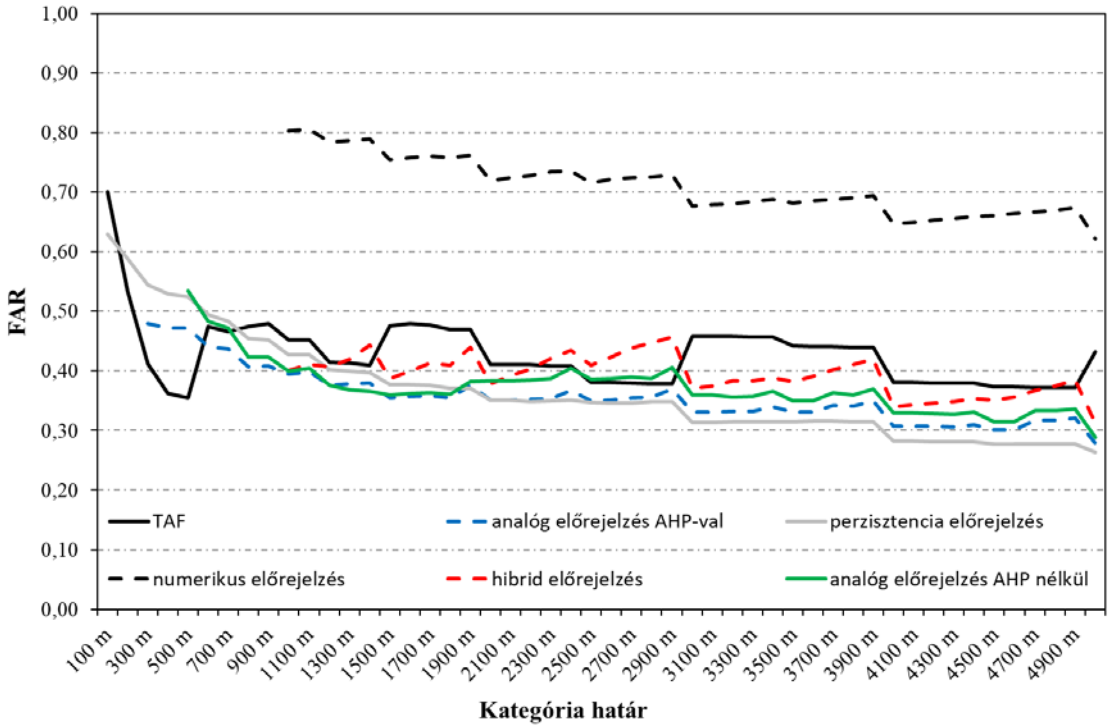


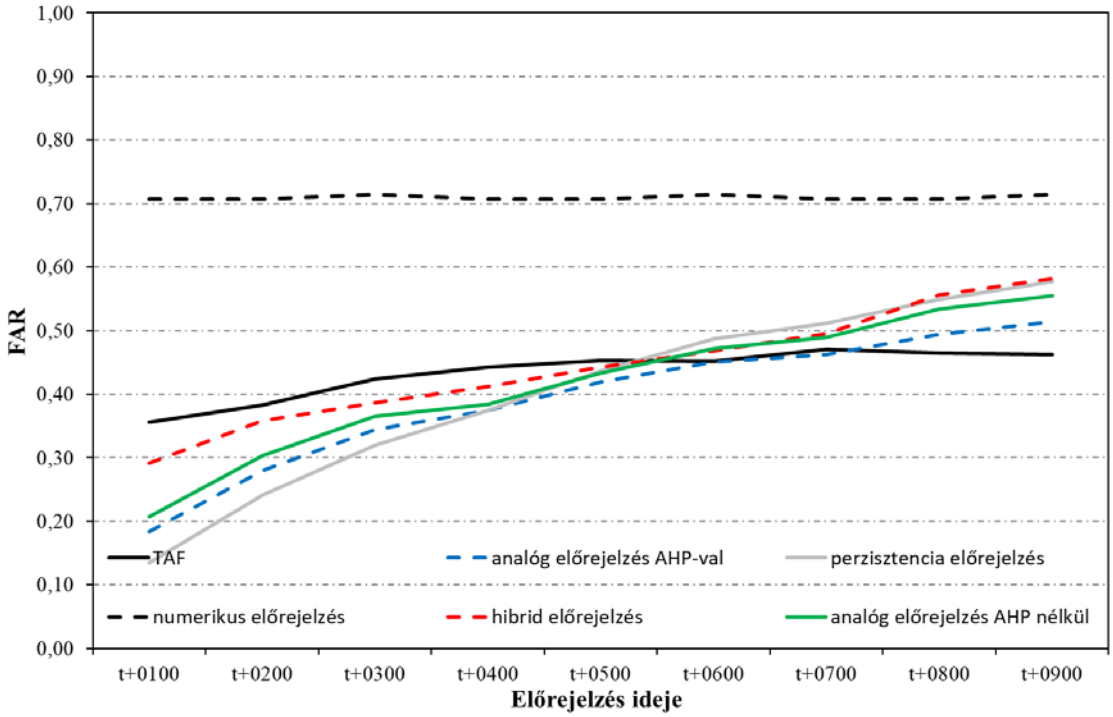

1,00
0,95
0,90
0,85
0,80
0,75
0,70
ACC
TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
100 m
300 m
500 m
700 m
900 m
1100 m
1300 m
1500 m
1700 m
1900 m
2100 m
2300 m
2500 m
2700 m
2900 m
3100 m
3300 m
3500 m
3700 m
3900 m
4100 m
4300 m
4500 m
4700 m
4900 m
Kategória határ

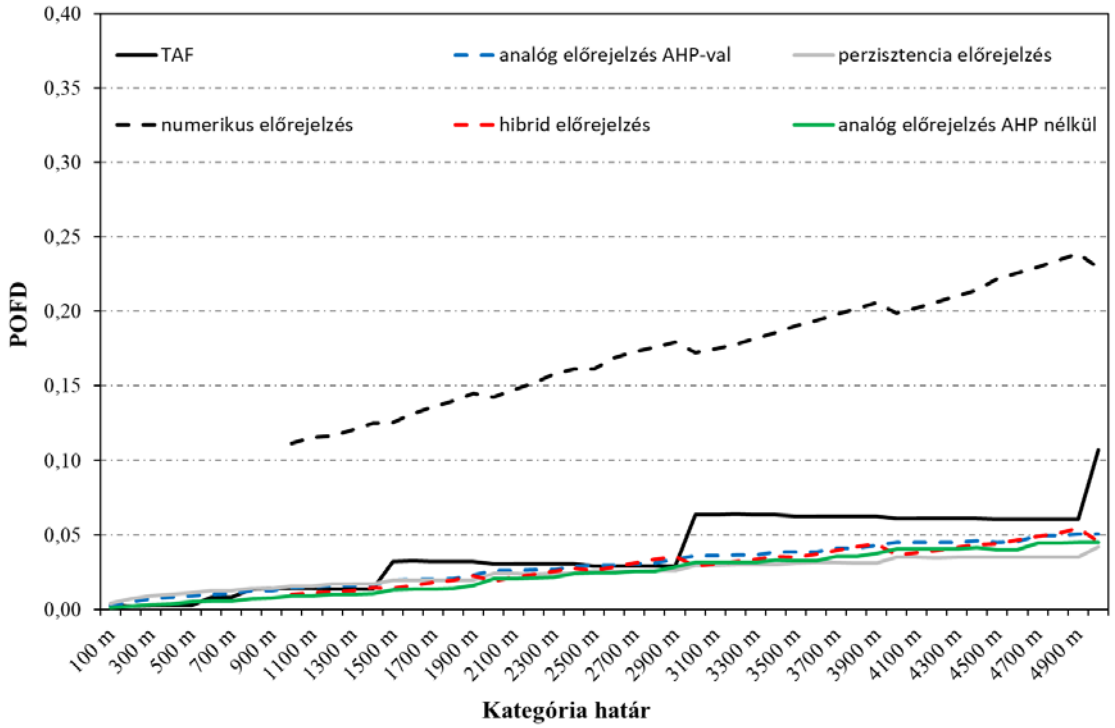

1,00
0,95
0,90
0,85
0,80
0,75
0,70
ACC
TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
t+0100
t+0200
t+0300
t+0400
t+0500
t+0600
t+0700
t+0800
t+0900
Előrejelzés ideje

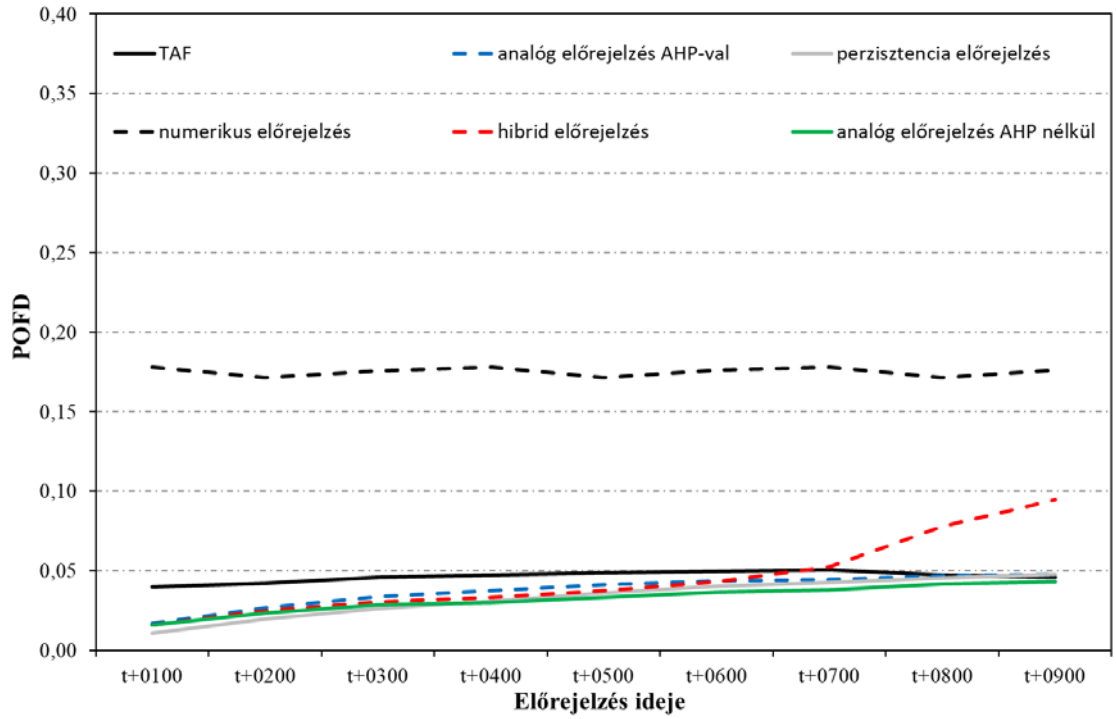

POD
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
100 m
300 m
500 m
700 m
900 m
1100 m
1300 m
1500 m
1700 m
1900 m
2100 m
2300 m
2500 m
2700 m
2900 m
3100 m
3300 m
3500 m
3700 m
3900 m
4100 m
4300 m
4500 m
4700 m
4900 m
Kategória határ

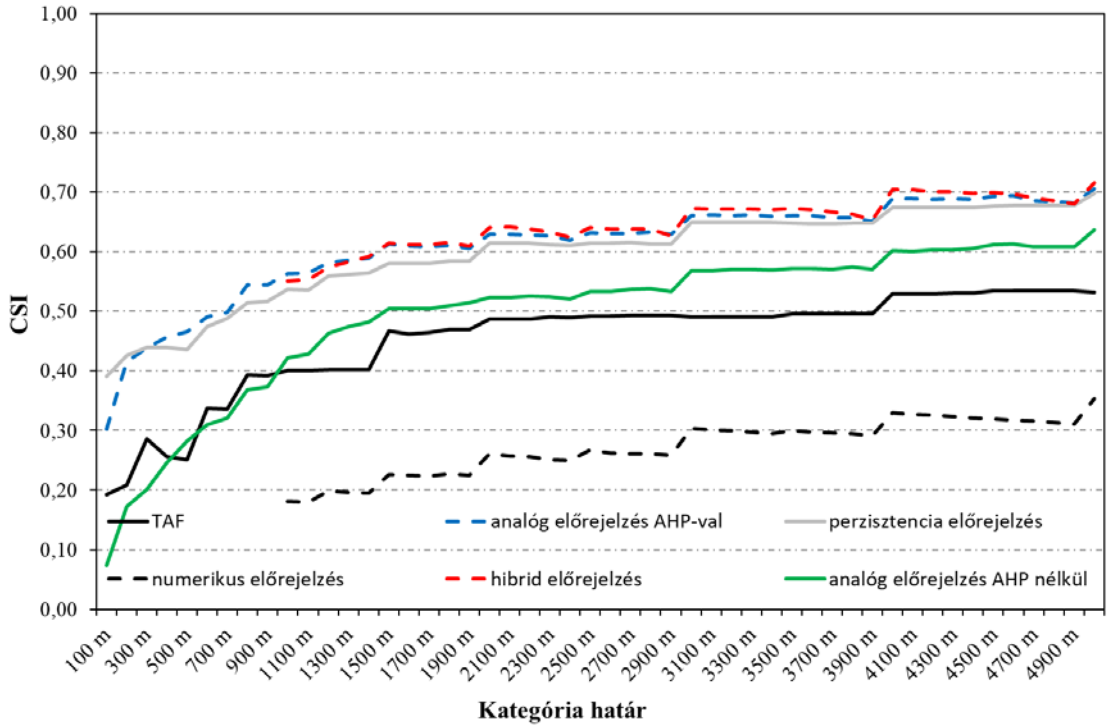

POD
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
t+0100
t+0200
t+0300
t+0400
t+0500
t+0600
t+0700
t+0800
t+0900
Előrejelzés ideje

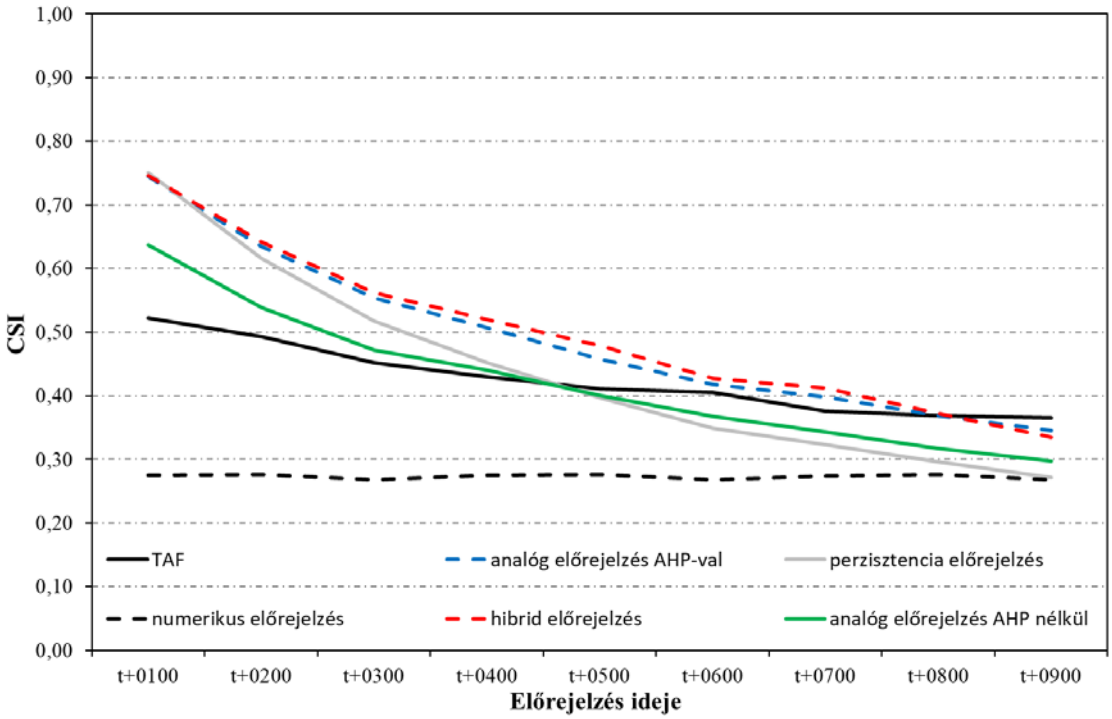

1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
FAR
TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
100 m
300 m
500 m
700 m
900 m
1100 m
1300 m
1500 m
1700 m
1900 m
2100 m
2300 m
2500 m
2700 m
2900 m
3100 m
3300 m
3500 m
3700 m
3900 m
4100 m
4300 m
4500 m
4700 m
4900 m
Kategória határ

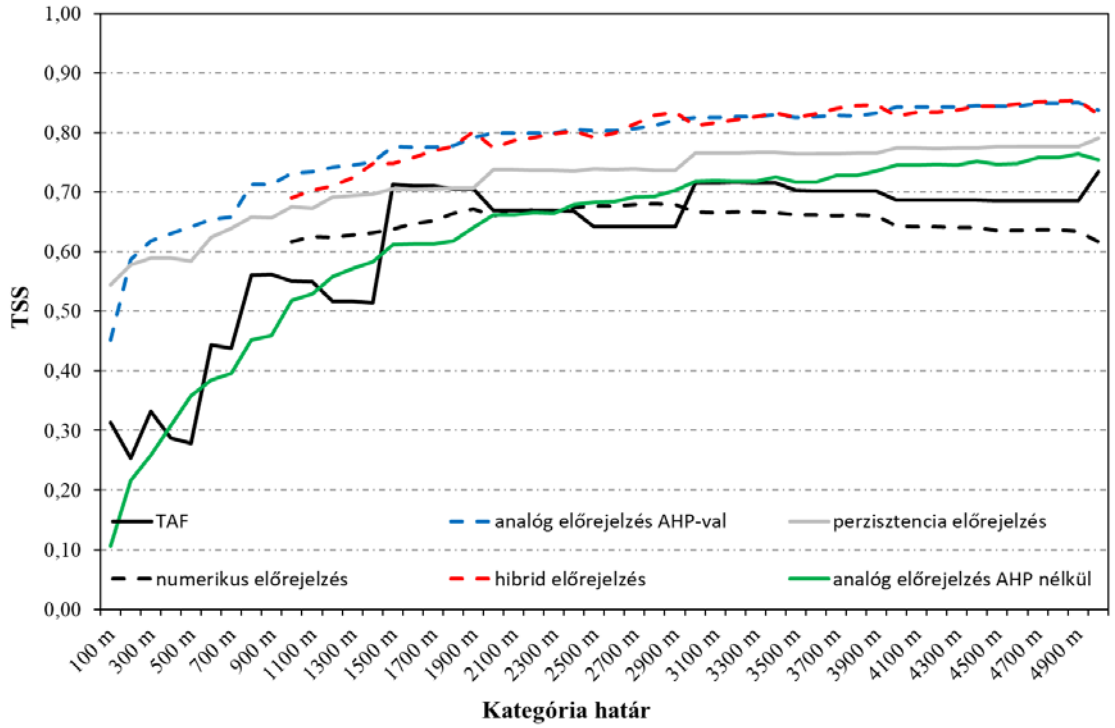

1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
FAR
TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
t+0100
t+0200
t+0300
t+0400
t+0500
t+0600
t+0700
t+0800
t+0900
Előrejelzés ideje

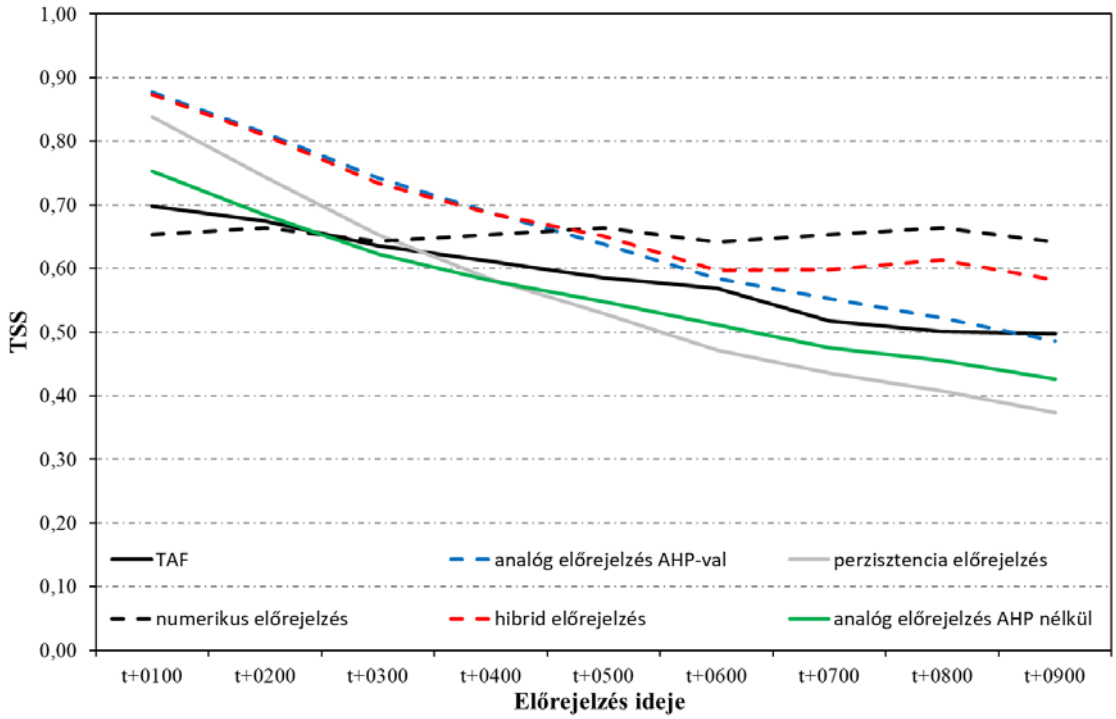

TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
POFD
0,40
0,35
0,30
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0,00
100 m
300 m
500 m
700 m
900 m
1100 m
1300 m
1500 m
1700 m
1900 m
2100 m
2300 m
2500 m
2700 m
2900 m
3100 m
3300 m
3500 m
3700 m
3900 m
4100 m
4300 m
4500 m
4700 m
4900 m
Kategória határ

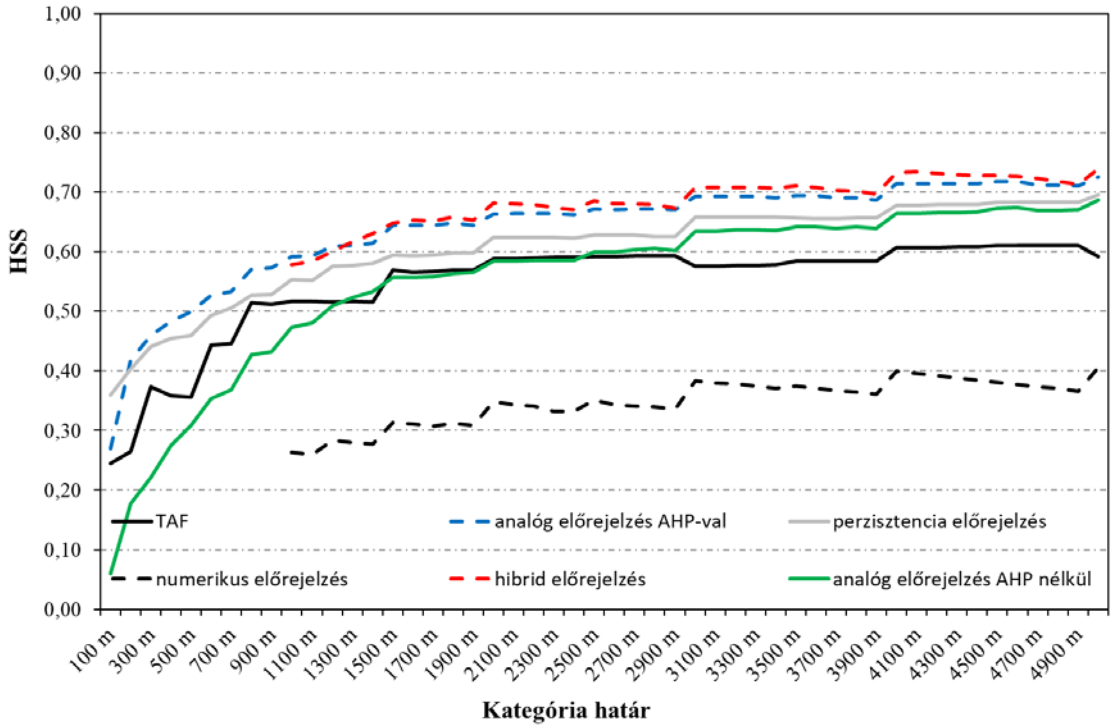

TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
POFD
0,40
0,35
0,30
0,25
0,20
0,15
0,10
0,05
0,00
t+0100
t+0200
t+0300
t+0400
t+0500
t+0600
t+0700
t+0800
t+0900
Előrejelzés ideje

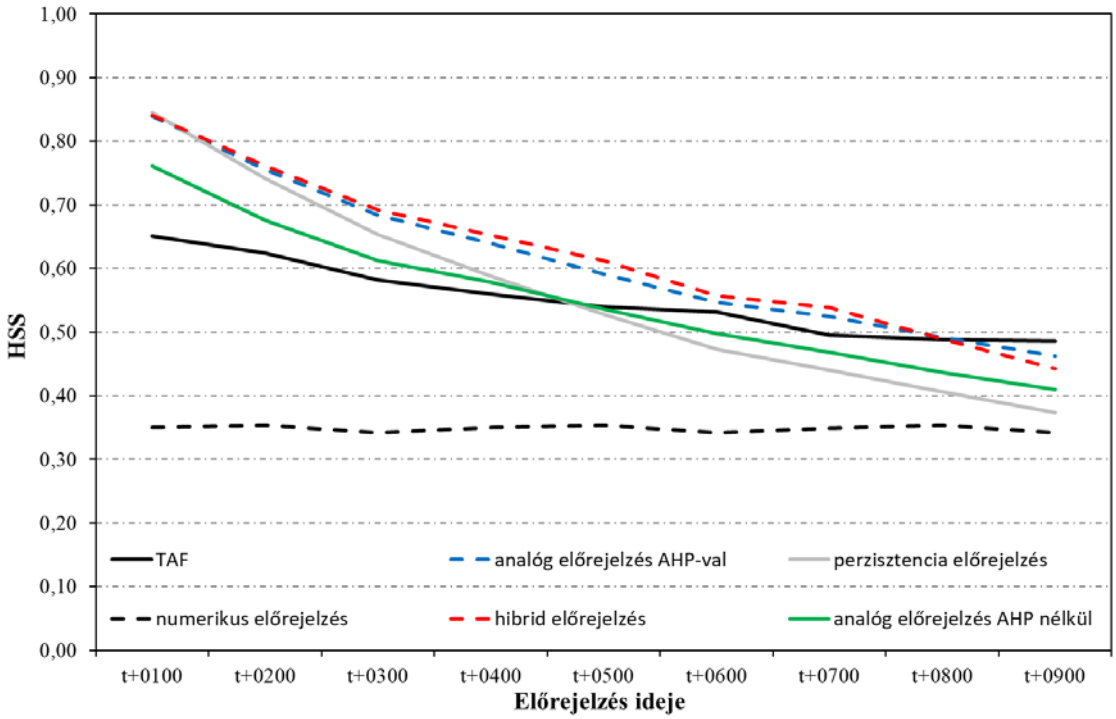

1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
CSI
TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
100 m
300 m
500 m
700 m
900 m
1100 m
1300 m
1500 m
1700 m
1900 m
2100 m
2300 m
2500 m
2700 m
2900 m
3100 m
3300 m
3500 m
3700 m
3900 m
4100 m
4300 m
4500 m
4700 m
4900 m
Kategória határ


1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
CSI
TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
t+0100
t+0200
t+0300
t+0400
t+0500
t+0600
t+0700
t+0800
t+0900
Előrejelzés ideje


1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
TSS
TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
100 m
300 m
500 m
700 m
900 m
1100 m
1300 m
1500 m
1700 m
1900 m
2100 m
2300 m
2500 m
2700 m
2900 m
3100 m
3300 m
3500 m
3700 m
3900 m
4100 m
4300 m
4500 m
4700 m
4900 m
Kategória határ


1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
TSS
TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
t+0100
t+0200
t+0300
t+0400
t+0500
t+0600
t+0700
t+0800
t+0900
Előrejelzés ideje


HSS
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
100 m
300 m
500 m
700 m
900 m
1100 m
1300 m
1500 m
1700 m
1900 m
2100 m
2300 m
2500 m
2700 m
2900 m
3100 m
3300 m
3500 m
3700 m
3900 m
4100 m
4300 m
4500 m
4700 m
4900 m
Kategória határ


HSS
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10
0,00
TAF
analóg előrejelzés AHP-val
perzisztencia előrejelzés
numerikus előrejelzés
hibrid előrejelzés
analóg előrejelzés AHP nélkül
t+0100
t+0200
t+0300
t+0400
t+0500
t+0600
t+0700
t+0800
t+0900
Előrejelzés ideje