

ANALÓGIÁS KÖDELŐREJELZŐ MÓDSZEREK HASZNÁLATÁNAK
LEHETŐSÉGEI BUDAPEST LISZT FERENC NEMZETKÖZI
REPÜLŐTÉREN

DIPLOMAMUNKA

Meteorológus mesterszak – időjárás előrejelző szakirány



Készítette:

Ország Ferenc

Témavezetők:

Kardos Péter

Hungarocontrol Zrt. Repülésmeteorológiai részlegvezető

Dr. Matyasovszky István

ELTE Földrajz- és Földtudományi Intézet Meteorológiai Tanszék

Tanszéki konzulens:

Soósné dr. Dezső Zsuzsanna

ELTE Földrajz- és Földtudományi Intézet Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Földrajz- és Földtudományi Intézet

Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2016

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	3
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	5
2.1 A KÖD DINAMIKUS- ÉS SZINOPTIKUS METEOROLÓGIAI HÁTTERE	5
2.1.1 A LÉGKÖRI NEDVESSÉG	5
2.1.1.1 A LÉGKÖR NEDVESSÉGTARTAMÁT KIFEJEZŐ MÉRŐSZÁMOK	5
2.1.1.2 A CLAUSIUS-CLAPEYRON-FÉLE EGYENLET	6
2.1.2 A KÖD	7
2.1.3 A KÖDKÉPZŐDÉSHEZ ÉS -FELOSZLÁSHOZ SZÜKSÉGES PARAMÉTEREK	8
2.1.3.1 A KÖDKÉPZŐDÉS LEHETSÉGES FAJTÁI	9
2.1.3.2 A KÖD FELOSZLÁSNAK LEHETŐSÉGEI	9
2.1.4 KÖDTÍPUSOK	10
2.1.4.1 RADIÁCIÓS- VAGY KISUGÁRZÁSI KÖD	10
2.1.4.2 ADVEKCIÓS VAGY ÁRAMLÁSI KÖD	11
2.1.4.3 OROGRAFIKUS VAGY LEJTŐKÖD	11
2.1.4.4 FRONTÁLIS KÖD	11
2.1.4.5 KEVEREDÉSI KÖD	12
2.1.5 A KÖD ELŐREJELZÉSÉNEK MÓDSZEREI ÉS JÖVŐBELI LEHETŐSÉGEI	12
2.1.5.1 TAPASZTALATI ÖSSZEFÜGGÉSEK	12
2.1.5.2 NEURÁLIS HÁLÓZATOK	13
2.1.5.3 LINEÁRIS REGRESSZIÓS MODELLEK	13
2.1.5.4 HASONLÓSÁGI METRIKÁN ALAPULÓ MODELLEK	13
2.2 A KÖDDEL KAPCSOLATOS ALAPVETŐ REPÜLÉSMETEOROLÓGIAI ISMERETEK	14
2.2.1 A LÉGIKÖZLEKEDÉS METEOROLÓGIAI KÜSZÖBÉRTÉKEI	14
2.2.1.1 „VISUAL FLIGHT RULES” (VFR) ÉS „INSTRUMENT FLIGHT RULES” (IFR)	14
2.2.1.1.1 „LOW VISIBILITY PROCEDURE” (LVP)	15
3. A BUDAPESTI LISZT FERENC NEMZETKÖZI REPÜLŐTÉR, AZ ALMOS MÉRŐHÁLÓZAT, ÉS A FELDOLGOZOTT ADATOK	18
3.1 A FERIHEGYI REPÜLŐTÉR VÁZLATOS TÖRTÉNETE	18
3.2 A LISZT FERENC NEMZETKÖZI REPÜLŐTÉR JELENE	19
3.3 AZ ALMOS REPÜLŐTÉRI METEOROLÓGIAI MÉRŐHÁLÓZAT	19

3.4 AZ ADATOK	21
4. A HASZNÁLT PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA A KÖD STATISZTIKUS KLIMATOLÓGIAI VIZSGÁLATÁN KERESZTÜL A FERIHEGYI REPÜLŐTÉREN	22
4.1 A KÖD ELŐFORDULÁSÁNAK ÉVEN BELÜLI ÉS NAPI ELOSZLÁSA	22
4.2 A FELHASZNÁLANDÓ PARAMÉTEREK MEGÁLLAPÍTÁSA, ISMERTETÉSE	24
4.3 A KÖD ÉS FELOSZLÁSÁNAK STATISZTIKUS KLIMATOLÓGIAI VIZSGÁLATA	27
4.3.1 ELSŐ MEGKÖZELÍTÉS - A KÖD STATISZTIKAI KLIMATOLÓGIAI VIZSGÁLATA A HUNGAROCONTROL ALMOS RENDSZERÉNEK ADATAI ALAPJÁN	27
4.3.2 A KÖD FELOSZLÁSÁNAK - CSÖKKENT LÁTÁSTÁVOLSÁG MEGSZŰNÉSÉNEK - STATISZTIKUS KLIMATOLÓGIAI VIZSGÁLATA	31
5. KÖDRE OPTIMALIZÁLT FUZZY-LOGIKÁS ANALÓGIAKERESŐ WINDOWS OS ALATT FUTÓ ASZTALI ALKALMAZÁS	33
5.1 A FUZZY LOGIKÁN ALAPULÓ ANALÓGIAKERESŐ ALKALMAZÁS	33
5.1.1 A FUZZY LOGIKÁN ALAPULÓ ANALÓGIAKERESŐ ELJÁRÁS ALKALMAZÁSA WINDOWS FEJLESZTŐI KÖRNYEZETBEN (MICROSOFT VISUAL STUDIO, C# NYELV)	33
5.2 A LEGHASONLÓBB IDŐPONT MEGHATÁROZÁSA	34
5.3 A KIVÁLASZTOTT IDŐPONTOT KÖVETŐ IDŐSZAK IDŐPONTJAINAK LEVÁLOGATÁSA ÉS ELEMZÉSE	35
5.3.1 ELSŐ ESETTANULMÁNY – 2014.01.07. KÖD A TELJES ELŐREJELZETT IDŐSZAKBAN	36
5.3.2 MÁSODIK ESETTANULMÁNY – 2014.11.01. KÖD MEGSZŰNÉSE AZ ELŐREJELZETT IDŐSZAK VÉGÉRE	40
5.3.3 HARMADIK ESETTANULMÁNY – 2013.11.16-17. IDŐSZAKOSAN MEGÉLÉNKÜLŐ SZÉL OKOZTA LÁTÁSTÁVOLSÁG-JAVULÁS	44
6. ÖSSZEFOGLALÁS, KONKLÚZIÓ	48
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	50
IRODALOMJEGYZÉK	51
ÁBRAJEGYZÉK	52
FÜGGELÉK	54

1. BEVEZETÉS

Egy repülőtér üzemeltetését, így a repülőgépek fel-, és leszállásakor alkalmazandó eljárásokat nagyban befolyásolja az időjárás, az időjáráson belül is legjobban a látástávolság alakulása. „Safety first!”, a biztonság mindenekelőtt, szól a repülés első és legfontosabb szabálya. Ha a repülőtéren olyan időjárási helyzet áll elő, hogy a fel- és leszállás nem hajtható végre biztonságosan, a repülést biztosító személyzet úgy dönthet, hogy bezárja a repülőtérrel. Ha a pilóta úgy ítéli, hogy az időjárási helyzet miatt nem képes a repülőgéppel biztonságosan landolni, akkor várakozó légtérbe repül, amíg az időjárás meg nem változik, vagy úgynevezett kitérő repülőtérre mehet, ahol megfelelőek az időjárási körülmények a leszálláshoz, vagy végső esetben visszatérhet a kiindulási repülőtérre. Minden fent felsorolt esemény bekövetkezése rontja a repülőtér üzemeltetésének gazdaságosságát.

Belátható okok miatt a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtérrel kiszolgáló Hungarocontrol zRt. meteorológus csoportja arra törekszik, hogy várható vagy bekövetkezett köd esetén minél pontosabban meghatározhassák a köd viselkedését: kialakulásának időpontját, a ködös időszak várható időtartamát, a köd feloszlásának ütemét és időpontját. A legkisebb forgalomkiesés, így a gazdaságos üzemeltetés érdekében a Hungarocontrol meteorológiai csoportja igyekszik feltérképezni és kiaknázni a legpontosabb célprognózisok ígéretét hordozó módszereket, újításokat.

A statisztikus szemléletű időjárás-előrejelző módszerek a XXI. század elejére nowcasting időtávon olyan pontosságra képesek, hogy egyes módszerek esetében lehetőség nyílt azok repülésmeteorológiai alkalmazására (*Hansen 2007*). A módszerek hazai interpretálása folyamatosan történik, ennek keretében készülhetett el jelen dolgozat is.

A diplomamunkám célja egy olyan asztali alkalmazás fejlesztése, ami az új, statisztikai szemléletű megközelítésből vizsgálja a köd viselkedését. A pillanatnyi időhöz leghasonlóbb múltbeli időpontot és előzményeit egy meghatározott hasonlósági logika alapján kikeresi, így – lévén múltbeli esemény – az adatbázis későbbi időpontokra vonatkozó rekordjai alapján következtet a köd várható viselkedésére.

Diplomamunkám elején ismertetem a ködöt dinamikus- és szinoptikus meteorológiai szempontból, tekintve hogy a program tervezésekor a statisztikus klimatológiai vizsgálatok mellett támaszkodtunk előzetes fizikai feltételezésekre, ismeretekre is.

Ezt követően ismertetem a ferihegyi adatbázison végzett klimatológiai vizsgálat célját, módszerét és eredményeit, ami az analógiakereső program paramétereinek meghatározásához, és az alkalmazás „ködre optimalizálásához” volt szükséges.

Végül bemutatom az általam elkészített analógiás ködelőrejelző asztali alkalmazást, leírom, és három olyan példán szemléltetem a működését, amikor a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtéren a látástávolság köd miatt annyira lecsökkent, hogy a repülőgépek nem szállhattak le.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 A KÖD DINAMIKUS ÉS SZINOPTIKUS METEOROLÓGIAI HÁTTERE

2.1.1 A LÉGKÖRI NEDVESSÉG

A Földet körülvevő légkör számos gáz keverékéből áll, ezen kívül különféle cseppfolyós és szilárd anyagokat is tartalmaz diszperz (szétszórt) állapotban. A légköri levegő fő összetevői a nitrogén, az oxigén, a szén-dioxid és a nemesgázok csoportjába tartozó argon (Péczely, 1979). A légkör egy további fontos összetevője a víz, amelynek az aránya a légkörben elérheti a 4%-ot is, és jellegzetessége, hogy szilárd (jég), cseppfolyós (víz) és gázhalmazállapotban (vízgőz) is megtalálható a levegőben. A légköri nedvesség mértéke, amellet, hogy látványos meteorológiai események esetén, mint a felhőképződés, csapadékhullás, harmat-, zúzmara, vagy ködképződés vitathatatlan szerepet játszik, a földi sugárzási mérleg alakulását is befolyásolja, a vízmolekulákon (elsősorban infravörös tartományban) történő sugárzásabszorpció és -emisszió által.

2.1.1.1 A LÉGKÖR NEDVESSÉGTARTAMÁT KIFEJEZŐ MÉRŐSZÁMOK

A nedves levegő állapotának egyértelmű leírásához a három alapállapot-jelzőn kívül egy negyedik paraméterre is szükség van, ami a rendszer vízgőztartamát jellemzi (Götz és Rákóczi, 1981). A meteorológiában a légköri nedvesség leírására a következő mennyiségek a leggyakrabban használtak.

- *Gőznyomásnak* (e) nevezzük a vízgőz parciális nyomását, ha a vízgőz száraz levegővel keveredik. A *telítési gőznyomás* (e_s) megadja az adott hőmérsékletű, telített levegőben levő vízgőz parciális nyomását. A levegő nedvességtartamának jellemzésére gyakran a gőznyomás és az adott hőmérsékleten vett telítési gőznyomás közti különbséget, a *telítési hiányt* $D = e_s - e$ használjuk.
- A *Relatív nedvesség* (f) megadja, hogy a lehetséges víztartalom hány százaléka van a levegőben $f = \frac{e}{e_s} \cdot 100$, ekkor $0 < f < 100$, eltekintve a túltelítettség állapotától, amikor $f = 100\%$, és megindul a kondenzáció.
- A *Harmatpont*, (vagy *harmatponti-hőmérséklet* T_d) az a hőmérséklet, ahol a gőznyomás egyenlő a telítési gőznyomással.
- A *Harmatpont-depresszió* (T_{def}) a léghőmérséklet és a harmatpont közti különbség. $T_{def} = T - T_d, T_{def} \geq 0$.

- A *keverési arány* (r) alatt, a vízgőz M_v tömegének, és a száraz levegő M_d tömegének az arányát értjük: $r = \frac{M_v}{M_d} \left(\frac{\text{kg vízgőz}}{\text{kg száraz levegő}} \right)$.
- A *Specifikus nedvesség* (q) megadja az 1kg levegőben lévő vízgőz mennyiségét, gyakorlatilag az r keverési arányt tömegegységre vonatkoztatja.

2.1.1.2 A CLAUSIUS-CLAPEYRON-FÉLE EGYENLET

Ha a nyomás és a hőmérséklet mindenütt azonos, és komponensenként a kémiai potenciál is megegyezik minden fázisban, egy k komponensű, n fázisú rendszer egyensúlyban van. A Clausius-Clapeyron-féle egyenlet egyensúlyban lévő fázisok esetén megadja a fázisátalakulási hőmérséklet változását a nyomásváltozás függvényében:

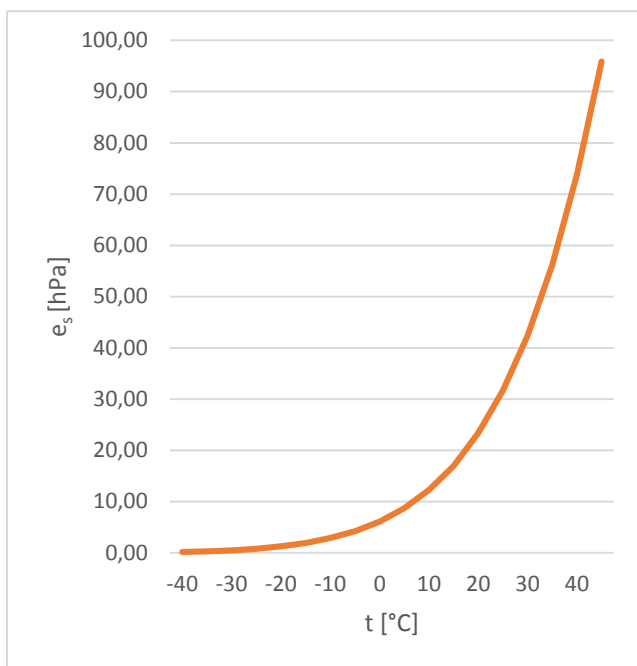
$$\frac{dT}{dp} = \frac{T(\alpha_2 - \alpha_1)}{L}, \quad (2.1)$$

ahol L a fázisátalakulás látens hője, T a fázisátalakulás hőmérséklete, és α pedig a megfelelő fázisok specifikus - vagy fajlagos - térfogata. A telítési gőznyomás (e_s) az a nyomás, ahol a víz, és a vízgőz ugyanazzal a kémiai potenciállal rendelkeznek, így lecseréljük rá a 2.1 egyenlet nyomását. A telítési gőznyomás így már csak a hőmérséklettől függ. Ennek megfelelően a telítési gőznyomás hőmérsékletfüggését a következő egyenletek írják le:

$$\frac{dT}{de_s} = \frac{T(\alpha_v - \alpha_w)}{L_{wv}}, \text{ illetve } \frac{dT}{de_s} = \frac{T(\alpha_v - \alpha_i)}{L_{iv}}. \quad (2.2-3)$$

A Clausius-Clapeyron egyenlet integrált alakja megadja a telítési gőznyomás hőmérsékletfüggésének formuláját, ahol a fázisátalakulás latens hőjét elhanyagoljuk, T_0 pedig 1942 K:

$$e_s(T) = \text{const.} \cdot \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right). \quad (2.4)$$



2.1. ábra Telítési gőznyomás - hőmérséklet görbe (vízfelszín felett) Saját szerkesztésű ábra. Forrás: Weidinger T. et al., 2007: Alapvető nedvességi karakterisztikák II.2.1. táblázat adatai alapján In: Klasszikus dinamikus meteorológiai példatár I. (szerk.: Weidinger T. és Tasnádi P.). ELTE Eötvös Kiadó, Budapest. 50. oldal

A harmatpont (T_d) az a hőmérséklet, ahol a víz és a vízgőz ugyanazzal a kémiai potenciállal rendelkeznek, így a fentiek szerint T_d csak a nyomástól függ. A telítési gőznyomás görbéje a kémiai potenciált a hőmérséklettől és a nyomástól függő kétdimenziós felületként mutatja be. Ekkor a görbe jelenti a felület választóvonalát a víz kémiai potenciálja és az attól különböző vízgőzé között. A görbe mentén a víz és vízgőz egyensúlyban van. A hőmérséklet vagy a nyomás növelésével illetve csökkentésével megkezdődik a kondenzáció, vagy a párolgás. A telítési görbe fölött a víz folyékony, alatta gőz fázisban van jelen.

2.1.2 A KÖD

Amikor a vízgőz kondenzációja a talaj közeli levegőben megy végbe, pára vagy köd képződik. A köd a talaj közelében a levegőben lebegő kicsi vízcseppek vagy jégkristályok összessége, látható lefelé irányuló mozgás nélkül akkor, ha a horizontális látástávolság egy kilométer alá csökken (páráság, ha a látástávolság öt kilométer alá csökken).

A köd tehát a látástávolság romlását okozza. Amikor az észlelő a horizontális látástávolságot 1000 méter alattinak becsüli, ködöt jelent. Ekkor a ≡ szimbólum használatos. Előfordulhat, hogy a köd felső határa szemmagasság alatt van, ekkor ez sekély köd, ebben az esetben a ≡ jelölést használják. Abban az esetben, ha a látástávolság meghaladja az 1000 métert, de nem éri el az 5000 métert, páráságról van szó, amit a térképeken = jelöl. Akkor, ha a látástávolság 1000 méter alá csökken, de ennek az oka nem a légköri nedvesség, akkor szárazlégköri homályról beszélünk, jele: ∞. Ha a köd jégkristályokat is tartalmaz, a neve jégköd. Helyenként ⇄ szimbólummal jelölik, máshol sima ködöt adnak.

A ködöt alkotó cseppek átmérője $5\mu\text{m}$ és $50\mu\text{m}$ közt változik. A köd minél sűrűbb, a cseppek annál nagyobbak. A légkör víztartalma ekkor $0,01$ és $0,3\text{g/m}^3$ között változik. A köd magassága szintén nagyon változó, a szemmagasság alatt elhelyezkedő sekély ködtől egészen a 7-800 méteres vertikális kiterjedésű ködig.

2.1.3 A KÖDKÉPZŐDÉSHEZ ÉS -FELOSZLÁSHOZ SZÜKSÉGES PARAMÉTEREK



2.1. kép Köd a Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtéren. Forrás: <http://www.bevezetem.hu/cikk/megint-fennakadasokat-okoz-kod-liszt-ferenc-repuloteren> (letöltve: 2015.04.13 20:05)

A köd, csakúgy, mint a felhők, a légkör nedvességtartamának kondenzációs magvakra történő kicsapódásával keletkezik. A kondenzációs magvak a légkörben gyakorlatilag mindig megfelelő mennyiségben jelen vannak, ezért a továbbiakban ismét a légköri nedvességgel foglalkozunk. Amíg a felhőképződés esetén a légréteg harmatpont alá süllyedéseért nagyrészt az emelkedése a felelős, a köd képződésénél három módon válhat telítetté: párolgás útján történő vízgőztartalom növekedésével, a levegő

harmatpontra való hűlésével, különböző hőmérsékletű, de telítéshez közelálló levegőfajták keveredésével. Mindhárom folyamat eredményeképp kialakulhat köd, de a felsorolt tényezők általában együtt hatnak, viszont egyik vagy másik döntő szerepet játszhat a folyamatban. (Makainé és Tóth, 1977)

2.1.3.1 A KÖDKÉPZŐDÉS LEHETSÉGES FAJTÁI

A levegő telítetté válása harmatpont alá hűlés következtében

- A felszín intenzív kisugárzása annak a lehűléséhez vezet. A talaj közeli levegő ekkor szintén hűl, így a hőmérséklet harmatpont alá is csökkenhet. Ekkor *radiációs- vagy kisugárzási köd* keletkezik.
- Egy hideg felszín fölé érkező nedves légrétegben is megindulhat a ködképződés, ha a hideg felszín fölé érve a levegő hőmérséklete harmatpont alá csökken. Ez az *advekción vagy áramlási köd*.
- Ha az áramló levegőnek egy hegyoldal áll az útjában, az emelkedő levegő adiabatikusan fog hűlni. Ilyenkor *orografikus vagy lejtőköd* képződik.

Egyidejű nedvességszállítás és hűlés, illetve nedves levegővel való keveredés során

- A környezet levegőjénél melegebb esőcseppek bepárologhatnak esés közben a légkörbe, így jöhet létre például a *frontális köd*.
- Nyílt vízfelszín fölött a bepárolgás igen intenzív lehet, ha a víz melegebb, mint a környező levegő. Ezt nevezzük *párolgási ködnek*.
- A vízgőz vertikális irányú turbulens transzportja következtében alakulhat ki a *keveredési köd*.

2.1.3.2 A KÖD FELOSZLÁSNAK LEHETŐSÉGEI

A köd felmelegedés okozta feloszlása

- A felszín besugárzás következtében melegszik.
- A köd meleg felszín fölé áramlik.
- A levegő lejtőn lefelé áramlik, így adiabatikusan melegszik.
- A kisugárzás megszűnése felvonuló közepmagas szintű felhőzet miatt.

A köd vízgőzelvonás okozta feloszlása

- Amikor hó hullik keresztül a ködön, a jégkristályok megkötik a légkörben található nedvességet, és cseppekké koagulálnak.

A köd turbulens keveredés okozta feloszlása

- Ekkor a köd gyakran elemelkedik a talajtól, és Stratus réteget alkot.

2.1.4 KÖDTÍPUSOK

A ködök osztályozásánál a köd keletkezése szerint különböztetjük meg a különböző ködtípusokat. Ezen felül megkülönböztetünk légtömegben belüli, illetve fronthoz kapcsolódó ködöt. Az előbbi esetben a levegő a telítettséget bepárolgással, vagy lehüléssel éri el, utóbbi esetben a két különböző légtömeg hat egymásra, így válik telítetté a légréteg.

2.1.4.1 RADIÁCIÓS- VAGY KISUGÁRZÁSI KÖD



2.2. kép A kisugárzási köd keletkezése Forrás: https://www.ec.gc.ca/meteo-weather/279AC7ED-E09D-4E2A-A884-57321EA46B24/figure4b-2_en.jpg (letöltve: 2015.04.13 20:21)

A radiációs- vagy kisugárzási köd tipikus példája a légtömegben belüli ködnek. Lokálisan képződik, olyan időszakokra jellemző, amikor a napi hőingás jelentős. Ilyen időjárási helyzet állhat elő például egy napsütéses őszi napon. Radiációs köd akkor keletkezik, amikor naplemente után, derült égbolt esetén a talaj közeli levegő hőmérséklete lehül a hosszuhullámú kisugárzás következtében. Ezáltal a talaj közelében a levegő termikusan egyre stabilabb lesz, amely

gyengíti, majd megszünteti a turbulens átkeveredést. A kisugárzás következtében a levegő harmatpont alá hűl, és bekövetkezik a kondenzáció. A radiációs köd vastagsága néhány méter és néhány 100 méter közötti.

A fentiek alapján a kisugárzási köd keletkezéséhez szükséges feltételek: nagy relatív nedvesség a felszín közelében (ekkor már kis hűlés is elegendő a harmatpont eléréséhez), derült ég (ez biztosítja az erős kisugárzást), gyenge talaj menti szél. Ha szélcsend van, akkor vagy harmat, vagy sekély talaj menti köd képződik. Ennél erősebb szél átkeveri a levegőt, a talaj mentén feloszlatja a ködöt, és az átkeveredés alacsony szintű felhők kialakulásához vezet (Sándor és Wantuch, 2005).

2.1.4.2 ADVEKCIÓS VAGY ÁRAMLÁSI KÖD



2.3. kép Az áramlási köd kialakulása Forrás: http://www.hko.gov.hk/education/edu01met/wxphe/ele_water4seasons_e.htm (Letöltve: 2015.04.13 19:54)

Különösen télen, amikor meleg nedves levegő áramlik egy hideg felszín fölé, áramlási köd keletkezhet. A meleg levegő alsó rétege a hideg felszíntől lehűlve telítetté válik és bekövetkezik a kondenzáció. Advekciónak a ködök keletkezéséhez, a

mérsékelt, 3-7 m/s-os légmozgás a legkedvezőbb. A mérsékelt szél megfelelő átkeveredést biztosít, és lehetővé teszi a köd horizontális elmozdulását. Gyorsan, váratlanul képződik, sűrű vastag rétegben jelentkezik, ezért a közlekedésre, így a repülésre is különösen veszélyes. Napi járása gyakorlatilag nincs, akár napokon keresztül is fennmaradhat.

Vízparti területeken gyakran összefüggésbe hozzák a párolgási köddel, ahol a meleg nedves levegő a vízfelszín felől a hideg szárazföldi felszín fölé áramlik.

2.1.4.3 OROGRAFIKUS VAGY LEJTŐKÖD

Amikor egy hegyoldalon felfele áramlik a levegő, az áramló levegő az orografikus emelés hatására adiabatikusan hűl. Ha a hűlése során eléri a kondenzációs szintet, orografikus, vagy lejtőköd képződik. Az emelkedés kezdetén a légkör rétegzettségének stabilnak kell lennie, különben beindulna a konvekció. A legtöbb esetben lejtőköd alakul ki, előfordul azonban, hogy a kondenzációs szintet a levegő már a völgyben eléri, ekkor völgyi ködről beszélünk.

A fentiek alapján a hegyek luv oldalán alakulnak ki gyakrabban az orografikus köd, míg a lee oldalon ködben szegény területek jellemzők.

Általában az orografikus ködöt nehéz egyértelműen megkülönböztetni az áramlási ködtől.

2.1.4.4 FRONTÁLIS KÖD

Ködök keletkezhetnek front előtt vagy front mögött is. Az előbbi esetben a melegfront felhőzetéből a hidegebb levegőbe hulló viszonylag meleg esőcseppek párolgása okozza a

telítettséget. Ilyenkor a front előtt mintegy 50-100 km-es térségben alacsony Stratus felhőzet vagy köd képződik. Ezt a típust prefrontális ködnek nevezik, és a front átvonulása után megszűnik. A frontális köd úgy is keletkezhet, hogy a felhőrendszer leereszkedik a földfelszínre. Az ilyen köd is a front átvonulásával megszűnik, bár völgyekkel tarkított vidékeken a front elvonultával is megmaradhat.

Bizonyos helyzetekben posztfrontális köd is kialakulhat. Ha a melegszeletor levegője hideg felszín fölé áramlik, alacsony Stratus vagy köd képződhet. Az ilyen módon kialakult köd tulajdonképpen áramlási köd (*Sándor és Wantuch, 2005*).

2.1.4.5 KEVEREDÉSI KÖD

Alacsony Stratus, vagy keveredési köd akkor alakul ki, ha a talaj fölötti hideg levegőréteg fölött meleg, nedves levegő áramlik. Ekkor a meleg nedves levegő a keveredés következtében lehül, és megindul a kondenzáció.

2.1.5 A KÖD ELŐREJELZÉSÉNEK MÓDSZEREI ÉS JÖVŐBELI LEHETŐSÉGEI

A ködös események előrejelzése napjainkban is komoly kihívás a meteorológusoknak. A ködképződés folyamata olyan tér-, és időskálán megy végbe, amit a hagyományosan jól bevált légköri modellek nem tudnak alapvetően megfogni. Vannak természetesen olyan korlátos tartományú modellek, amelyek használhatóak köd előrejelzésére is. Röviden ismertetem a következőkben a köd előrejelzésének leggyakrabban használt módszereit.

2.1.5.1 TAPASZTALATI ÖSSZEFÜGGÉSEK

Az előző alfejezetekben bemutattam azokat a legfontosabb dinamikus, és szinoptikus meteorológiai feltételeket, amelyek együttes teljesülésekor köd képződhet. Egy prognózis összeállítása során figyelembe kell venni azokat a kapcsolatokat, amelyek a látástávolság és különböző meteorológiai elemek között fennállnak (*Makainé és Tóth, 1977*). A következő alfejezetek és fejezetek során bemutatott módszerek hátterét is ezek a kapcsolatok, és tapasztalati összefüggések képzik. A ködös helyzetek tehát kapcsolatba hozhatók a hőmérsékleti inverzióval, azon keresztül pedig a talaj közeli szél sebességével, mivel a kisugárzás okozta hőmérsékletcsökkenés hővezetés útján adódik át az alsó légrétegnek, azután turbulencia útján a magasabb rétegeknek. Így vastagabb hőmérsékleti inverzió csak gyenge légmozgás okozta átkeveredési folyamatok következményeként jöhet létre. A túl

nagy szélesség hatására viszont az inverzió felemelkedik, és a már kialakult köd általában széteszik. Ekkor a látástávolság értékében javuló tendencia figyelhető meg. A látástávolság kapcsolatba hozható a szinoptikus skálájú folyamatokkal is, amelyeket a tengerszintre átszámított légnyomás értékén keresztül vehetünk figyelembe. A köd elsősorban anticiklonális időjárási helyzethez köthető, mivel a legtöbb inverziós eset a Kárpát-medencében anticiklonnal áll kapcsolatban, valamint a téli hidegpárna helyzet is anticiklonális időjárási helyzetben, kisugárzás útján alakul ki (Cséki, 2010).

2.1.5.2 NEURÁLIS HÁLÓZATOK

Amikor nagy mennyiségű bemenő adatot (így meteorológiai változók értékeit) idegrendszerként elágaztatunk, majd különböző súlyok és nemlineáris transzformációk megfelelő kombinációinak alkalmazásával egy adott célérték (például látástávolság) várható értékére becslést adunk, neurális hálózatot használunk. Az elmúlt évben az ELTE Meteorológiai Tanszékén Nagy Roland foglalkozott a ferihegyi repülőtér ködelőrejelzésével. Munkájában feltérképezte a látástávolság és a többi meteorológiai változó közötti nemlineáris kapcsolatokat, és nowcasting döntéstámogató rendszert fejlesztett (Nagy, 2014).

2.1.5.3 LINEÁRIS REGRESSZIÓS MODELLEK

A statisztikai modellek a meteorológiai elemek, és a látástávolság között a matematikai statisztika eszközeivel teremtenek kapcsolatot. Az egyik legelterjedtebb módszer, hogy a látástávolságot a prediktorok függvényében többszörös lineáris regressziós egyenessel közelítik. Ennek a két legelterjedtebb módszere a MOS (Modell Output Statisztika) és a hatékonyabb PP (Perfekt Prognosztika) módszere. Az elmúlt évek során Deák Bianka foglalkozott még köd előrejelzésével a szolnoki helikopterbázison (Deák, 2010).

2.1.5.3 HASONLÓSÁGI METRIKÁN ALAPULÓ MODELLEK

Ellentétben a hagyományos dinamikus megközelítésekkel, ezek a modellek nem az egyes időjárási jelenségek fizikai alapú leírására épülnek. A hasonlósági metrikán alapuló modellek egy klimatológiai adatbázis adatainak feldolgozásával közelítik az időjárás várható alakulását. A módszer lényege, hogy az aktuális időjárási helyzethez meghatározott logika alapján, egy arra alkalmas adatbázisban hasonló helyzeteket keresnek, majd ezek feldolgozásával állítanak elő egy ultrarövid távra (3-6 óra) szóló előrejelzést. Ilyen ultrarövidtávú előrejelzés sikerrel alkalmazható mezo-skálájú folyamatok előrejelzésére. A

hazai és nemzetközi tapasztalatok azt mutatják, hogy ezek az előrejelzések megfelelő pontosságúak lehetnek a repülésmeteorológiai biztosítás számára is (Tuba et al., 2012). Első feladat ekkor a megfelelő adatbázis kialakítása

2.2 A KÖDDEL KAPCSOLATOS ALAPVETŐ REPÜLÉSMETEOROLÓGIAI ISMERETEK

2.2.1 A LÉGIKÖZLEKEDÉS METEOROLÓGIAI KÜSZÖBÉRTÉKEI

A „rossz idő” - mint például a köd - befolyásolja a légi közlekedésben való részvétel lehetőségét, ezért a biztonság és a költséghatékonyság maximalizálása érdekében felállítottak olyan minimumkövetelményeket, amelyeknek teljesülniük kell ahhoz, hogy a légiközlekedés valóban biztonságos legyen. Ezek a minimumkövetelmények függnék a repülőtér és a repülőgép felszereltségétől, valamint a hajózó személyzet (úgy a pilóták, mint a légiutas-kísérők) tapasztalatától. Mivel a köd a látástávolságot befolyásolja a legjelentősebben, ennek a meteorológiai paraméternek a küszöbértékeire összpontosítok a fejezetben.

2.2.1.1 „VISUAL FLIGHT RULES” (VFR) ÉS „INSTRUMENT FLIGHT RULES” (IFR)

Alapvetően a repülésnek két módját különböztetjük meg, úgy, mint a látva repülés szabályai (VFR) szerinti, és a műszerrepülés szabályai (IFR) szerinti repülést. A VFR és IFR repülést az különbözteti meg leginkább, hogy VFR repülés esetén - mint azt a neve is sugallja - a pilóta tájékozódási pontok alapján, műszeres segítség nélkül repüli az útvonalat. Ahhoz, hogy a látva repülés szabályai szerint biztonságosan közlekedhessen egy repülő, bizonyos meteorológiai küszöbértékeknek (VMC - Visual Meteorological Conditions) teljesülniük kell. A VMC-nek nem csak a kiindulási repülőtéren, de a célrepülőtéren is teljesülniük kell, ellenkező esetben a repülőgéppel egy másik, úgy nevezett kitérő repülőtéren kell leszállni. „Bár a műszerrepülés nagymértékben függetlenítette a légi közlekedést az időjárástól, a repülések kezdeti és befejező szakaszát, a fel- és leszállást csak meghatározott látásértékeknél lehet végrehajtani” (Sándor és Wantuch, 2005). Amennyiben a pilótának engedélye van rá, és a repülőgép is fel van szerelve a szükséges eszközökkel, lehetősége van rosszabb időjárási körülmények között is repülni. A műszerrepüléshez kapcsolódó meteorológiai határértékeket az IMC (Instrumental Meteorological Conditions) foglalja össze. Műszerrepülés alatt azt értjük, amikor a pilóta a helyzetét, és a repülési irányt nem vizuálisan határozza meg, hanem valamilyen műszerrel, segédeszközzel. A kereskedelmi

(teher- és utasszállító) repülőgépek mind IFR szerint repülnek. A VMC és IMC küszöbértékeit az 2.1. táblázat tartalmazza, ahol a VIS a horizontális látástávolság, Ceiling pedig a Felhőalap magassága.

2.1. táblázat A látva repülés és a műszerrepülés meteorológiai küszöbértékei

VMC (Visual Meteorological Conditions)	$VIS \geq 5000$ méter ÉS $Ceiling \geq 1500$ ft
IMC (Instrumental Meteorological Conditions)	$5000 \text{ méter} > VIS \geq 1500 \text{ méter}$ VAGY $1500 \text{ ft} > Ceiling \geq 700 \text{ ft}$

2.2.1.1.1 „LOW VISIBILITY PROCEDURE” (LVP)

Amikor a látástávolság kisebb, illetve a felhőalap magassága alacsonyabb, a pilóta kénytelen „Low Visibility” - csökkent látás - feltételek közt repülni. Az ilyen repülésnek természetes feltétele az, hogy a repülőtéren, és a repülőgépnek, beleértve a hajózó személyzetet is, engedélye legyen az ilyen feltételek közti repülésre, felkészült és felszerelt legyen. Az engedéllyel rendelkezőket három kategóriába sorolják (I-III, valamint a III. kategóriát még további háromba). A nemzetközi kategóriákat, és a hozzájuk tartozó küszöbértékeket a függelékben található 2.2. táblázat tartalmazza.

Az elkülönítés minden kategóriában szükséges küszöbérték, ami azt mutatja, hogy a fel- és leszálló repülőgépnek milyen távol kell lenniük egymástól (1 nemzetközi tengeri mérföld (nm) 1,82 kilométerrel egyenlő). A „Base” és „Ceiling” kifejezések a felhőalap magasságára vonatkoznak, ahol az előző már 1 okta borultságtól, míg az utóbbi 5 okta borultságtól számít. Az RVR (Runway Visual Range) a futópálya menti látástávolság, „az a távolság, amelyről a pálya középvonalán elhelyezkedő repülőgép pilótája látja a futópálya felületén levő jelzéseket, vagy a futópálya szegélyfényeit, illetve annak középvonalát meg tudja állapítani” (Sándor és Wantuch, 2005). A „Decision height”, azaz az elhatározási magasság, az a legkisebb magasság a bevezetés során, ahonnan a pilóta még nehézségek nélkül

megszakíthatja a landolást, és átstartolhat. Esetenként, ha olyan meteorológiai helyzet adódik, a repülőtér adhat meg magasabb elhatározási magasságot, mint amit a kategóriák írnak elő.

A Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtér ICAO (International Civil Aviation Organization – Nemzetközi polgári repülési szervezet) E4 besorolású, így a 13R/31L futópályán mindkét irányon CAT II-es, 13L irányon CAT II-es, 31R irányon pedig CAT III/A műszeres megközelítési eljárást biztosító légi navigációs segédeszközökkel van felszerelve. Az LVP protokollt is ennek megfelelően, az ICAO ajánlásait és a helyi sajátosságokat figyelembe véve alakították ki, beiktatva egy felkészülési szintet is. A repülőtérre vonatkozó LVP protokollt a 2.3. táblázat szemlélteti.

2.3. táblázat Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtér LVP eljárásai (Forrás: Repülőtéri rend M4-03 melléklet)

Kategória	RVR/Felhőzet	Elkülönítés (nm)
IMC	„látástávolság 5000m alatt és/vagy a felhőalap 1500 láb alatt van”	Nincs korlátozás
PREP (Felkészülési fázis)	„látástávolság 800m vagy kisebb és/vagy a felhő-alap 400 láb vagy kisebb”	7 nm
LVP-1 (Üzemelési fázis)	„valamelyik futópálya földterési zónájában a futópályamenti látástávolság 600m vagy kisebb és/vagy a felhőalap 200 láb vagy annál kisebb”	10 nm
LVP-2 (Üzemelési fázis)	„báramelyik futópályamenti látástávolság érték kisebb, mint 400m”	10 nm

Amennyiben nincs érvényben LVP, a repülőgépek a Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtéren 3nm minimális követési távolsággal is indulhatnak, az érkezési távolság futópályánként eltérő, 4-5 nm közötti. Ez a távolság PREP (felkészülési fázis) esetén egyből 7nm-re emelkedik, LVP-1 és LVP2 esetén pedig már 10nm (*Repülőtéri rend M4-03 melléklet*). Könnyen belátható, hogy a csökkent látástávolság a repülőtér kapacitását erősen behatárolja, aminek a gazdasági aspektusa a repülőtér-üzemeltetés egyik sarkalatos pontja.

Mindebből következik, hogy a pontos és jó repülőtéri időjárás előrejelzés - így a ködelőrejelzés - iránt a pilóták, a repülést biztosító és kiszolgáló földi személyzet, a légitársaságok, de még az utasok körében is élénk az érdeklődés.

3. A BUDAPESTI LISZT FERENC NEMZETKÖZI REPÜLŐTÉR, AZ ALMOS MÉRŐHÁLÓZAT, ÉS A FELDOLGOZOTT ADATOK

3.1 A FERIHEGYI REPÜLŐTÉR VÁZLATOS TÖRTÉNETE

A világon mindenütt, ahol nincs ezt akadályozó tényező - domborzat, vízrajz, település -, úgy jelölik ki a futópályák irányát, hogy a repülőgépek széllel szemben tudjanak fel-, és leszállni. A 20. század elején Magyarország nemzetközi reptere a budaörsi repülőtér volt. Ennek a repülőtérnek a futópályái nem a fenti módon lettek kijelölve, így amellet, hogy az 1930-as évekre elérte kapacitásának maximumát, üzemeltetése is gazdaságtalan volt. Egy új, a budaörsi repteret kiváltó repülőtér építésének a terve 1938-ban került napirendre. A méréseket a kor kiváló repülésmeteorológusa dr. Hille Alfréd vezette. Az építkezés 1942-ben ifj. Dávid Károly tervei alapján kezdődhetett meg a városközponttól 16 kilométerre. A légikikötőt vegyesen polgári-katonai-sport hasznosításának kívánták kialakítani. A háború alatt érthető módon a katonai épületeket gyorsított ütemben építették, és 1943-ban elindulhatott az aktív légiforgalom. A háborút követően döntöttek Ferihegy újjáépítéséről a polgári légiközlekedés számára. A hivatalos átadásra 1950-ben került sor. A repülőtérrel ekkor csak a Varsói szerződés tagállamaiba lehetett repülni. Az első nyugatra induló akkor már MALÉV járat 1956 nyarán indult Bécsbe. Az első külföldi légitársaság, amelyik járatot indított Ferihegyre, a KLM - holland királyi légitársaság - volt 1957-ben. Az 1960-as évektől nagy fellendülés következett be, amit a '70-es évek fejlesztései követtek, a megnövekedett légiforgalom kiszolgálására. 1977-ben megkezdődött az új irányítótorony, és a régivel párhuzamos új futópálya építése is. Az 1980-as évekre az utasforgalom tovább nőtt, így szükségessé vált egy új terminál kialakítása, amelynek alapkövét 1983-ban tették le. A '90-es évek nyugati nyitása tovább fokozta a repülőtér forgalmát, így 1998-ra megépült a 2B terminál is, ami évi 3,5 millió utas kiszolgálására alkalmas. 2002 januárjától ismét új fejezet kezdődött a repülőtér életében. A Légiforgalmi és Repülőtéri Igazgatóság megszűnt, helyén két új szervezet alakult. A légiforgalom irányítása a HungaroControl, a repülőtér üzemeltetése pedig a Budapest Airport Zrt. feladata lett. 2005-re a Budapest Airport forgalma 7,9 millió főre nőtt, így ismét új beruházások váltak szükségessé. 2005 és 2011 között az állam több lépcsőben eladta a repülőtér üzemeltetési jogát - az időszerű fejlesztéseket elvégző befektetőket keresve -, így az mára teljesen magánkézbe került. A

repülőtér legújabb kori történetét a SkyCourt és az Airport City néven beindított hosszú távú fejlesztési terv írja. A 2-es terminál új központi csarnokát 2009-ben kezdték el építeni és 2011 márciusában avatták fel. A mintegy 28 000 négyzetméteres új épület szervesen kapcsolódik a két régi épülethez, a 2A és 2B terminálokhoz. A SkyCourttal létrejött az egységes 2-es terminál, amelynek becsült utaskapacitása 10,5 millió évente. A SkyCourt tervezése elsősorban az utasforgalom, másodsorban pedig a kereskedelmi és vendéglátási kapacitások fejlesztését célozta a 2-es terminál többlépcsős bővítésével. A 2000-es évek első felétől folyamatosan szigorított biztonsági előírások miatt elsősorban ezen a területen mutatkozott kapacitáshiány, így a kötelező utasbiztonsági átvilágítás a SkyCourtban már egy teljesen új, sokkal nagyobb területen zajlik. A biztonsági folyosókon át a schengeni és nem-schengeni utasok azonos területre, a SkyCourt lélegzetelállító belső terébe érkeznek. Innen 200 méteren belül, vagyis néhány perc alatt valamennyi beszállókapu elérhető.

3.2 A LISZT FERENC NEMZETKÖZI REPÜLŐTÉR JELENE

A volt Ferihegyi, ma Liszt Ferenc nemzetközi repülőtér Budapest belvárosától 16 kilométerre, 1500 hektáros területen terül el. Magyarország legnagyobb nemzetközi reptereként évi több mint 9 millió utast szolgál ki. Napjainkban a Ferihegy 2-es terminál bonyolít csak utasforgalmat, az 1-es terminál szolgálja ki a cargo-t, régi utasforgalmi épületeiben pedig rendezvényház működik.

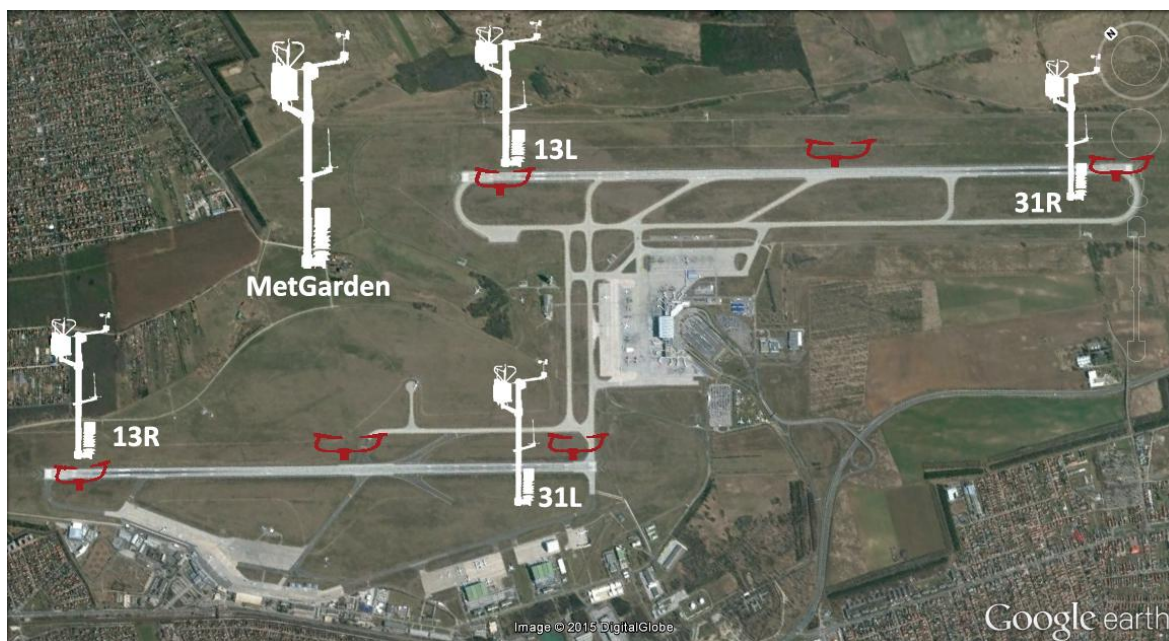
3.3 AZ ALMOS REPÜLŐTÉRI METEOROLÓGIAI MÉRŐHÁLÓZAT

Ferihegyen, az akkor már húsz éve üzemelő ELECMA meteorológiai mérőrendszert 2004-ben az ALMOS Systems mérés technikai cég termékére (továbbiakban ALMOS vagy ALMOS rendszer) cserélték le. A cég 1988 óta foglalkozik meteorológiai és monitoring rendszerek gyártásával és telepítésével. Amellett, hogy világszerte több nemzeti meteorológiai szolgálat mérőhálózatának - Ausztrália, Svájc, Kuvait - a kialakítása is az ő nevükhöz köthető, a világ számos nagy utasforgalmat bonyolító reptérének - Amsterdam, Brüsszel, Sydney - az időjárás-monitoring rendszerét is ők telepítették. Az ALMOS rendszer az ICAO és a WMO ajánlásainak megfelelően 2004 júliusa óta szolgáltat adatot az akkor még Ferihegyi, mára Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtér számára. A műszerpark mennyiségi adatait a 3.1. táblázat, a műszerek elhelyezését a 3.1. ábra szemlélteti. A meteorológiai műszerkeretek a futópályák két végén a 13R, 31L, illetve 13L 31R

(a 13 és a 31 a pályairányt jelöli, 130°-os azimuton megközelítve bal (left) illetve jobb (right) pálya, valamint analóg módon 310°-os azimuton megközelítve bal és jobb pálya) jelzésűek, valamint a MeteoGarden, ami a futópályáktól messzebb található. A diplomamunkám szempontjából az RVR mérők a legfontosabbak, amelyek a futópályák földetérési zónájánál (TDZ - Touchdown Zone: az a terület a futópályán, amelyet két vastag fehér csíkkal jelölnek. A pilótáknak itt kell a repülőgéppel földet érni, hogy elegendő út maradjon a fékezésre.), és a futópálya közepénél vannak elhelyezve így mindkét futópályán biztosítva a teljes pályahosszra vonatkozó RVR értékek rendelkezésre állását. A témával kapcsolatos további paraméterek a térképen jelölt további mérőkeretekből származnak.

3.1. táblázat Az ALMOS rendszer összetevői

Műszer	Mennyiség (db.)
Szélmérő	12
Felhőalap-mérő	4
RVR	6
Jelenidő-szenzor	3
Futópálya-hőmérő	6
Aktív jegesedés mérő	6
Hőmérő	6
Légnyomásmérő	2
Légnedvesség mérő	6
Csapadékmérő	1
Napfénytartam mérő	1
Hórétteg-vastagságmérő	1
Talajhőmérő	4



3.1. ábra A mérőkeretek és az RVR szenzorok elhelyezkedése, Forrás: Google Earth

3.4 AZ ADATOK

A dolgozat háttérét a Hungarocontrol Magyar Légiforgalmi Szolgálat ZRt. ALMOS rendszeréből származó közel tíz éves adatsor adja, ahol a meteorológiai adatok a ferihegyi repülőtérre 2004 nyarától 2014 tavaszáig két perces felbontásban érhetőek el. Annak érdekében, hogy a programok minél gyorsabban fussanak le, az adatbázist úgy alakítottam ki, hogy az adatok időbeli felbontása tíz percenkénti legyen. Az előzetes klimatológiai vizsgálat során, amelyben a programba foglalandó paraméterek számát szűkítettem le, a 13R mérőoszlop, a 13R futópálya menti látástávolság mérő és a MeteoGarden légnyomásmérő adataira támaszkodtam, így egy jól kezelhető 490638 soros adatbázissal tudtam dolgozni. Az analógiakereső program ugyanezt az adatbázist használja, azzal a különbséggel, hogy jóval kevesebb változót vesz figyelembe. Az adatokat éves és havi bontásban táblázatba rendezte, az adathiányos időszakok könnyebb detektálása érdekében. A felmerülő hibák és adathiányok jellemzően az adatsor elején, nagyjából az első egy évben voltak jelentősek, később szinte csak a nyomás adat volt hiányos, egészen 2008-as év közepéig.

Az adatok távoli MySQL adatbázisból voltak elérhetőek. A számításokat és lekérdezéseket helyben legegyszerűbben PHP scriptekkel lehetett elvégezni, ahol ez nem volt megoldható, vagy egyszerűbbnek mutatkozott, ott az IBM SPSS Statistics programot használtam. Az ábrákat Microsoft Office Excelben készítettem.

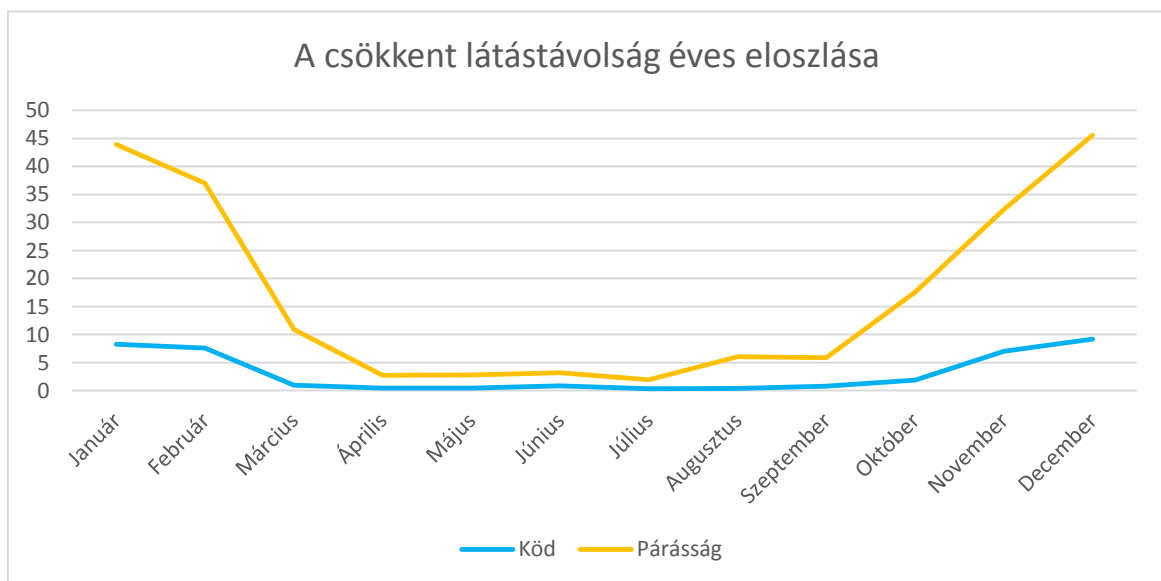
Az analógiakereső program írásakor ezt a távoli MySQL adatbázist kénytelen voltam újra felépíteni a saját számítógépemem, mivel az eredeti adatbázist tároló szerverhez – érthető biztonsági okokból kifolyóan – nem férhettem hozzá külső programból. A probléma áthidalására egy nyílt forráskódú, ingyenes webkiszolgáló alkalmazást, az Apache HTTP Servert futtatom az analógiakereső program futásával egy időben. A helyi adatbázist részben az előzetes vizsgálatok alapján töltöttem fel az ALMOS rendszer válogatott adataival, részben pedig a program tölti fel referenciaadatokkal a lekérdezések során.

4. A HASZNÁLT PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA A KÖD STATISZTIKUS KLIMATOLÓGIAI VIZSGÁLATÁN KERESZTÜL A FERIHEGYI REPÜLŐTÉREN

4.1 A KÖD ELŐFORDULÁSÁNAK ÉVEN BELÜLI ÉS NAPI ELOSZLÁSA

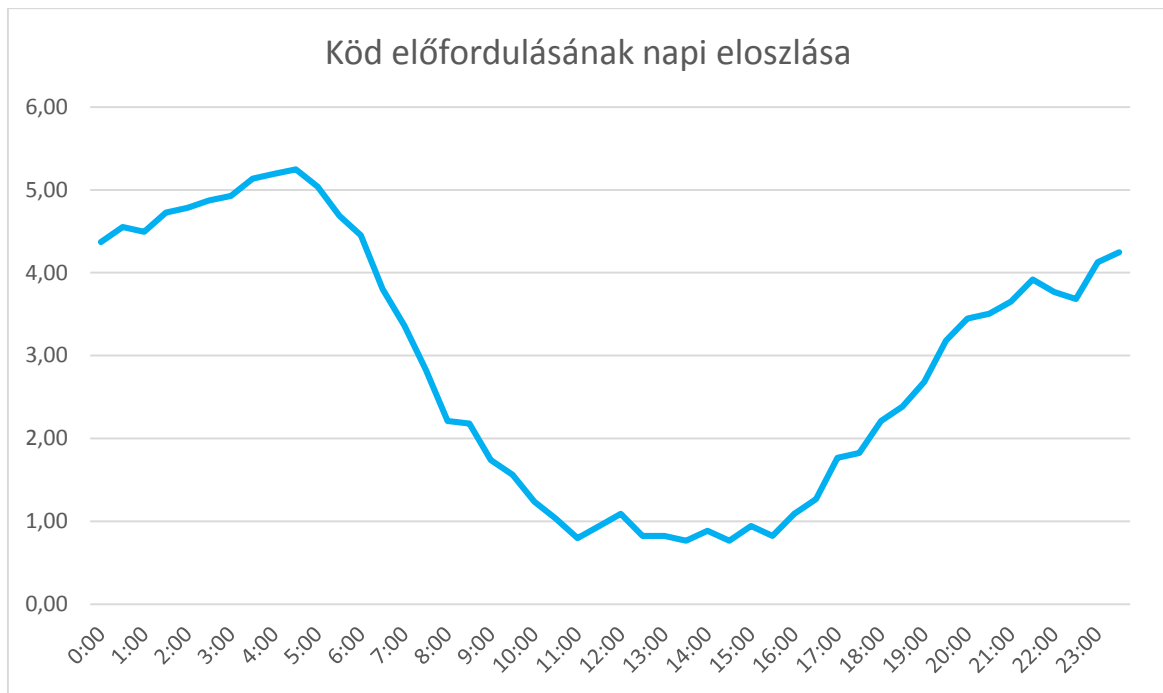
Az analógiakereső program tervezésekor magától értetődőnek tűnt, hogy a köd éves, és napi járását is a vizsgálatba foglaljuk, tekintve, hogy a köd kialakulását és feloszlását befolyásoló paraméterek többségének is éves és napi járása van.

Az ALMOS rendszerből kinyert adatok alapján megmutatható, hogy a csökkent látástávolsággal jellemezhető időszakok nagyrészt a téli félévre vonatkoztathatók (4.1. ábra). A 490638 soros adatbázisból 84842 esetben volt a látástávolság 5000 méter alatti, ami az esetek 17,3 százaléka, és 13976 esetben 1000 méter alatti, ami az összes eset 2,8 százalékát jelenti.



4.1. ábra A csökkent látástávolság éves eloszlása (Saját ábra; adatforrás: ALMOS)

Megmutatható továbbá a ködös esetek napi eloszlása is (4.2. ábra), ami az esti, éjszakai és hajnali időszakokat adja meg, mint a ködre legjellemzőbb napszakok. Az adatok alapján, amit a 4.3. ábra szemléltet, a legködveszélyesebb időpont a hajnal fél öt.



4.2. ábra A Köd előfordulásának napi eloszlása. Az idő UTC, az adatsűrűség 10 perces (Saját ábra; adatforrás: ALMOS)

A Liszt Ferenc nemzetközi repülőtér indulási és érkezési adataiból kiderül, hogy hajnal egy és hat óra között elvétve van csak egy-egy fel vagy leszálló repülőgép. A késő délutáni időszakban viszont, ami a másodmaximum a köd kialakulására jellemző napszakok között, sűrű a menetrend, délután négy és este nyolc között legalább 25-30 repülőgép landol a repülőtéren, amik alacsony látástávolság esetén körözésre, vagy kitérő repülőtérre kényszerülnek, ami mindenképpen gazdaságtalan. Ezt elkerülendő, szükséges a köd kialakulásának és feloszlásának minél pontosabb előrejelzése.

4.2 A FELHASZNÁLANDÓ PARAMÉTEREK MEGÁLLAPÍTÁSA, ISMERTETÉSE

Annak érdekében, hogy az analógiakereső program minél gyorsabban lefuthasson, meg kell szabadulnunk azoktól a kvázi redundáns paraméterektől, amik nem, vagy csak kis mértékben befolyásolják az eredményt. A redundánsok kiszűrésének egyszerű és elegáns módja lehet az adatsoron a stepwise (lépésenkénti) regresszió alkalmazása. A lépésenkénti regresszió a következőképpen néz ki.

Tegyük fel, hogy van N darab valószínűségi változó:

$$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$$

Ezek közül a valószínűségi változók közül szeretnénk az i -edik ξ -t becsülni a többi ξ segítségével

$$\hat{\xi}_i = a_i + \sum_{j \neq i} b_j + \xi_j$$

$a = m_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} m_j$, ahol $m_i = E[\xi_i]$ $i = 1, \dots, N$ additív konstans,

$b_k = -\frac{\sigma_i R_{ik}}{\sigma_k R_{ii}}$, ahol $\{R\}_{ij}$ mátrix = corr $[\xi_i; \xi_j]$.

R_{uv} : \underline{R} mátrix u, v eleméhez tartozó előjeles aldeterminánsa. A szórásnégyzet ekkor:

$D^2 = [(\rho_i - \hat{\rho}_i)] = (1 - \rho^2)\sigma^2$, ahol ρ a többszörös korreláció,

$\rho = \sqrt{1 - \frac{R}{R_{ii}}}$, ahol $R = \det(\underline{R})$. Ekkor a megmagyarázott variancia: $\rho^2 \sigma^2$, ennek kell minél nagyobbak lenni.

A fentiekből látszik, hogy tudunk stepwise regressziót alkalmazni arra, hogy egy adatbázis valószínűségi változóinak segítségével becsüljük az adatbázis egy másik valószínűségi változójának a várható értékét. A kérdés itt is, mint a hasonlósági metrikával dolgozó program esetében is az, hogy melyek azok a paraméterek, amelyek szükségesek ahhoz, hogy becsülni tudjuk az a valószínűségi változót, amire végső soron kíváncsiak vagyunk. Az átláthatóság kedvéért a továbbiakban a prediktorokat ξ -vel, a prediktanduszok η -val jelölöm.

Legyenek a prediktorok ξ_j , $j = 1, \dots, p$, a prediktandusz pedig η . Stepwise regresszióval, az ξ -vel közelítem η -t. Ekkor η becslése a következő:

$$\hat{\eta} = \sum_{j=1}^p a_j \xi_j + b$$

Elméletileg minél több tagot vonunk be a stepwise regresszióba prediktorként, a négyzetes hiba értékének annál jobban csökkennie kell. Azt kell tehát megnéznünk, hogy ha új ξ -t veszünk be az egyenletbe, az milyen mértékben csökkenti a négyzetes hibát. Amikor már csak kicsit csökkenti (vagy egyáltalán nem csökkenti), az azt jelenti, hogy az újonnan behozott ξ előállítható az előző ξ -k lineáris kombinációjaként, tehát nem tartalmaz új (hasznos-) információt.

A szükséges prediktorok meghatározása három lépésben zajlik:

1. A legjobb prediktor meghatározása

$$\hat{\eta} = a \cdot \underbrace{\xi}_{\xi_1, \dots, \xi_p} + b$$

itt ki kell választani a legjobban korreláló ξ -t

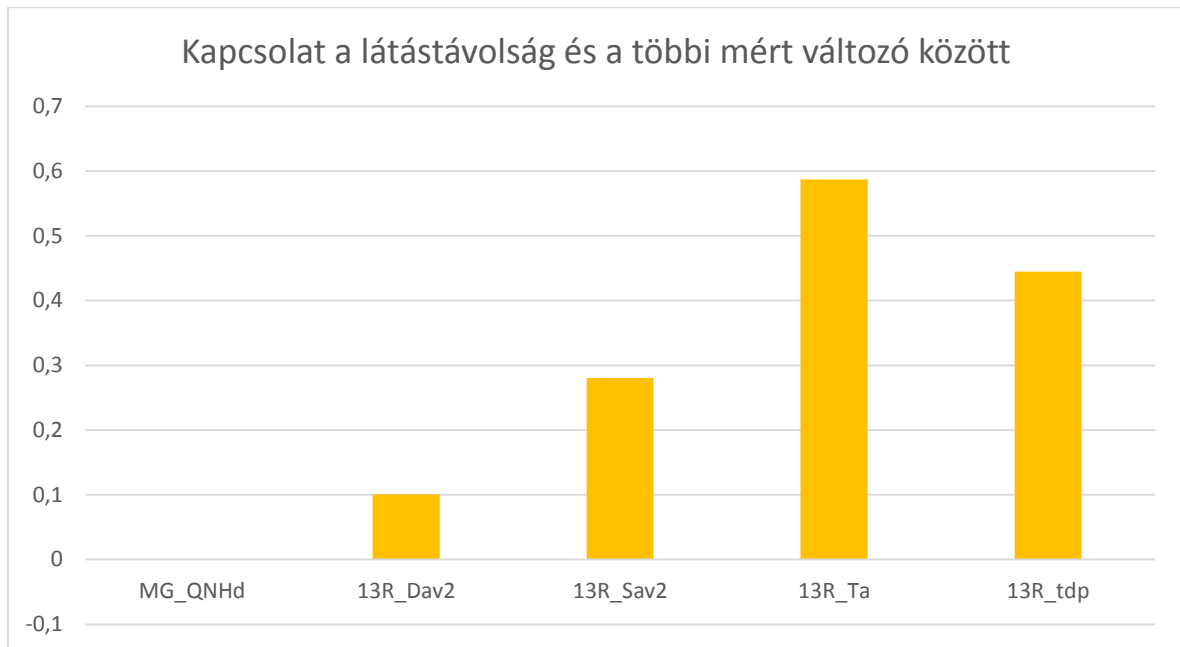
2. A második legjobb prediktor kiválasztása

$$\hat{\eta} = a_1 \cdot \xi_{\text{kiválasztott}} + a_2 \cdot \underbrace{\xi}_{\xi_1, \dots, \xi_p \text{ kivéve } \xi_{\text{kiválasztott}}} + b$$

3. Mindezt addig kell folytatni, amíg a négyzetes hiba nagyságát az új prediktor bevonása már nem csökkenti jelentősen.

Azt feltételezve, hogy a repülőtér teljes területe klimatológiai szempontból egy mérőállomás adatsorával is jól jellemezhető, első közelítésben a számításokat csak a „13R” adatokra, illetve a MeteoGarden tengerszintre átszámított légnyomásadataira futtattam le tíz perces adatsűrűséggel. Az adatsor elején (2004 év vége, 2005 év eleje), illetve több esetben az adatsor további részein is adathiány volt tapasztalható. Ezeket a sorokat az adatbázisból kiszűrve arra az eredményre jutottam, hogy a futópálya menti látástávolsággal (RVR) a legkevésbé a MeteoGarden légnyomásértékei mutatnak statisztikai kapcsolatot (4.3. ábra). Mivel ez utóbbi adat az első négy év során (2008 közepéig) erősen adathiányos, a vizsgálat következő fázisából kivettem.

A látástávolsággal legjobban korreláló prediktor a hőmérséklet (4.3. ábra), így azt választottam legjobb prediktornak. A fenti módszer megmutatta, hogy a felsorolt változók mind csökkentik a négyzetes hibát, így végül csak az adathiányos nyomásértéktől váltam meg.



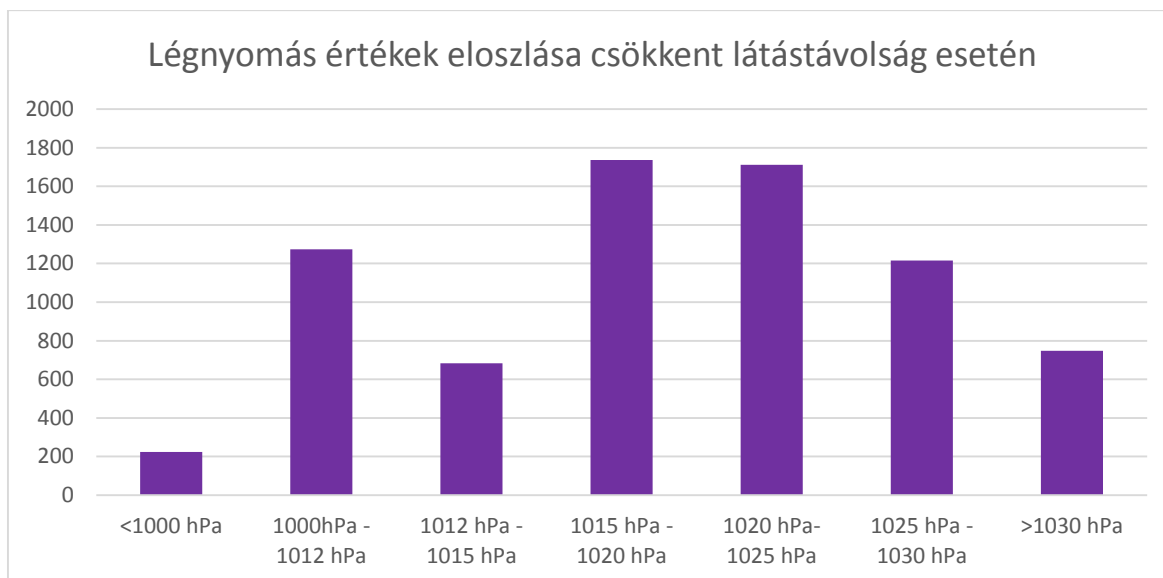
4.3. ábra Kapcsolat a látástávolság, és a többi mért meteorológiai változó között. A vertikális tengelyen a hasonlóság mértékét jellemző korrelációs együttható szerepel. (Saját ábra; adatforrás: ALMOS)

4.3 A KÖD ÉS FELOSZLÁSÁNAK STATISZTIKUS KLIMATOLÓGIAI VIZSGÁLATA

4.3.1 ELSŐ MEGKÖZELÍTÉS - A KÖD STATISZTIKAI KLIMATOLÓGIAI VIZSGÁLATA A HUNGAROCONTROL ALMOS RENDSZERÉNEK ADATAI ALAPJÁN

A Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtér gazdaságos és biztonságos működését a meteorológiai változók közül legerősebben a látástávolság befolyásolja. A meteorológiában, ha a horizontális látástávolság 5000 méter alá csökken páráságról, 1000 méter alatt ködről beszélünk, ha a látástávolságot a levegő nedvességtartalma csökkenti. A repülőtér ICAO E4-es besorolása lehetővé teszi, hogy a repülőgépek csökkent látási körülmények között is végezhesenek fel, illetve leszállást. Az ilyenkor követendő protokoll vázlatos áttekintését a 3.3. táblázat tartalmazza a függelékben. A protokoll 800, 600 és 400 méter alatti látástávolság-értékek alatt követel meg biztonsági intézkedéseket. Az ALMOS adatbázis adatai alapján az összes vizsgált időpont 2,33%-ban volt szükség a felkészülési, 1,96%-ban az LVP-1 és 1,61%-ban az LVP-2 szintű protokoll korlátozásainak az alkalmazására, csökkent látástávolság miatt. Ezek az intézkedések növelik a repülőgépek közti követési távolságot fel és leszálláskor, így csökkentve a gazdaságosságot a biztonság érdekében. Ahogy az előző fejezetekből látszik, van a ködről egy fizikai szemléletű megközelítésünk. Ezt alátámasztandó, és az analógiás nowcasting rendszerben alkalmazott paramétereket meghatározandó az adatbázison végzett statisztikai szemléletű kutatás.

Feltételezzük, hogy a ködös esetekhez a Kárpát-medencében magas nyomással járó szinoptikus helyzet tartozik. A ferihegyi adatok szerint (4.4. ábra) csökkent látástávolság esetén a legjellemzőbbek a normál légköri nyomásnál magasabb, 1015-1025 hPa közötti értékek, de az ennél magasabb, akár 1030 hPa feletti értékek is nagy számban fordulnak elő. A látástávolságot természetesen nemcsak a talajközeli levegőben kondenzálódó víz tudja rontani. Az esetek nem elhanyagolható részében a nyomásértékek kifejezetten alacsonyak voltak, ami nem jellemző a köd kialakulására. Ekkor valószínűbb az intenzív csapadékhullás következtében bekövetkező látástávolság-csökkenés.



4.4. ábra Tengerszintre átszámított légnymás-értékek eloszlása csökkent látástávolság esetén (Saját ábra; adatforrás ALMOS)

A hőmérséklet-értékeket az adatbázis tized fokos pontossággal tárolja. Az ábrázolás egyszerűsítése érdekében az értékeket három fokenként kategóriákba foglaltam. A közel tíz évet felölelő adatbázis 1000 méter alatti látástávolság esetén $-20,2^{\circ}\text{C}$ -os illetve $28,6^{\circ}\text{C}$ -os szélsőértékekkel rendelkezik. A kategóriákat az alábbiak szerint alakítottam ki:

- T1: azoknak az eseteknek a száma, amikor a látástávolság 1000 méter alá csökkent, és a hőmérséklet nem érte el a -6°C -ot,
- T2: azoknak az eseteknek a száma, amikor a látástávolság 1000 méter alá csökkent, és a hőmérséklet -6 és -3°C között volt,
- T3: azoknak az eseteknek a száma, amikor a látástávolság 1000 méter alá csökkent, és a hőmérséklet -3 és 0°C között volt,
- T4: azoknak az eseteknek a száma, amikor a látástávolság 1000 méter alá csökkent, és a hőmérséklet 0 és $+3^{\circ}\text{C}$ között volt,
- T5: azoknak az eseteknek a száma, amikor a látástávolság 1000 méter alá csökkent, és a hőmérséklet 3 és 6°C között volt,
- T6: azoknak az eseteknek a száma, amikor a látástávolság 1000 méter alá csökkent, és a hőmérséklet 6 és 9°C között volt,
- T7: azoknak az eseteknek a száma, amikor a látástávolság 1000 méter alá csökkent, és a hőmérséklet meghaladta a 9°C -ot.

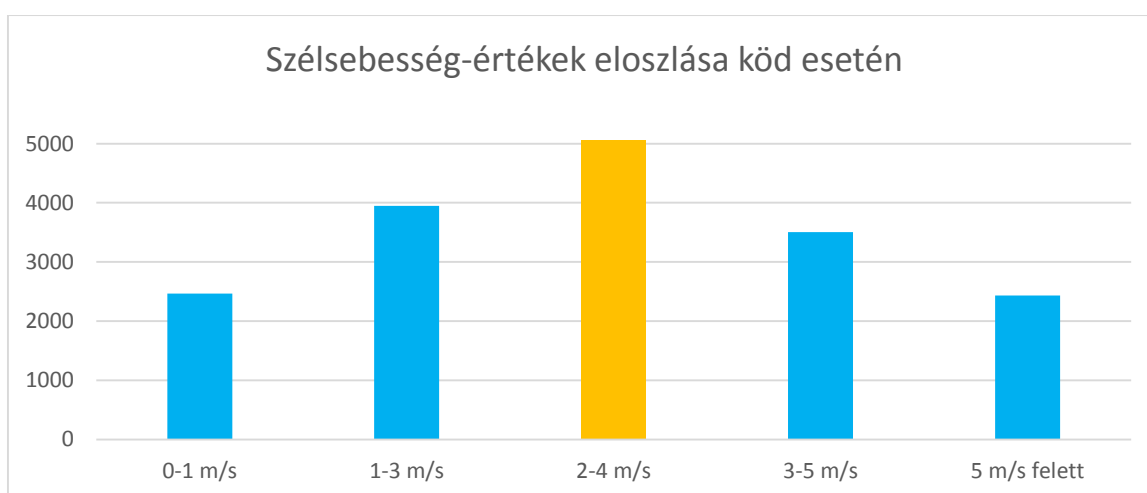
Amennyiben a T1 és T7 kategóriákat tovább bontjuk, az eredmények már egy nagyságrenddel kisebb értéket adnak, mint a T2-T6 kategóriák. Az 4.5. ábrát tekintve látszik,



4.5. ábra Hőmérséklet-kategóriák eloszlása csökkent látás esetén (Saját ábra; adatforrás: ALMOS)

hogy a ködös esetek előfordulásának gyakorisága a -3°C $+3^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékleti intervallumon a legnagyobb. Ezekről az értékektől számítva pozitív és negatív irányba is egyenletesen csökken a csökkent látástávolságú esetek előfordulásainak száma.

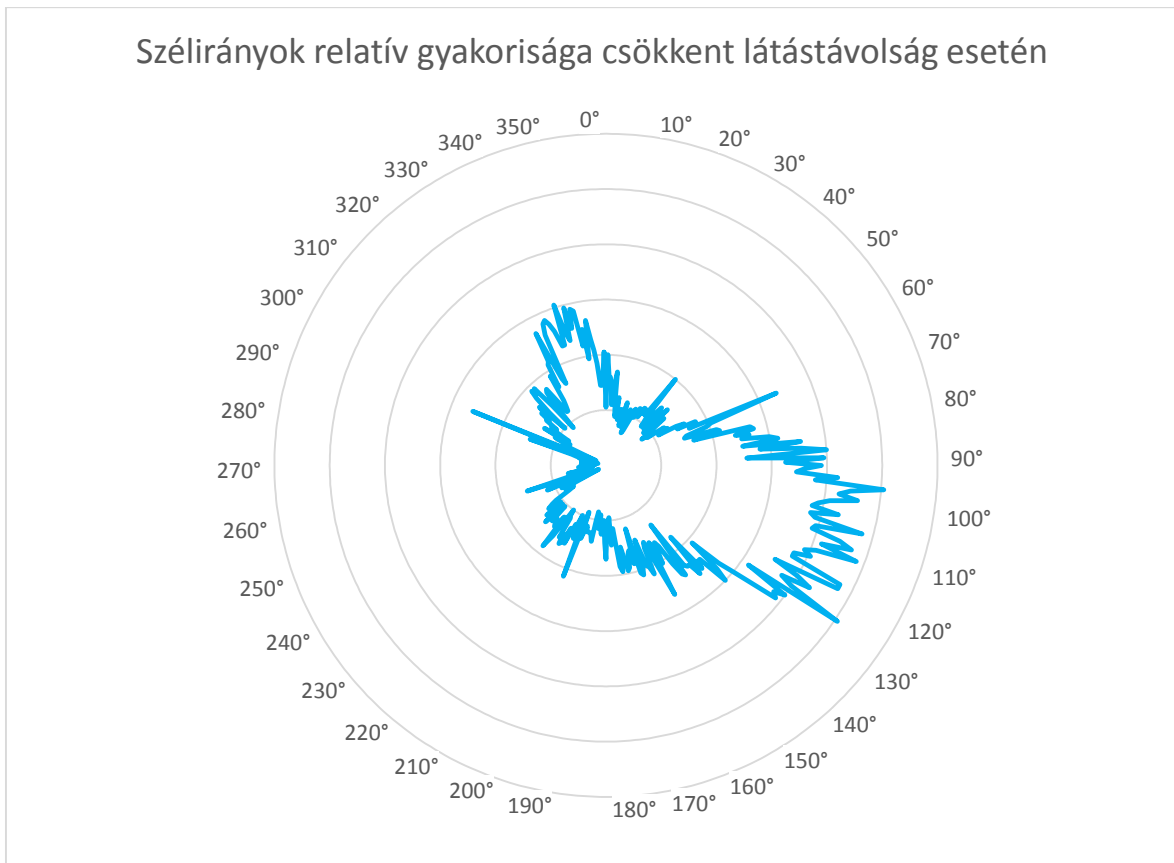
A széleseesség nagyságát tekintve az előző fejezetekből kiindulva szintén rendelkezünk egy fizikai szemléletű elvárással. A ferihegyi adatok pedig igazolják feltevésünket (4.6. ábra), miszerint a köd kialakulásához és fennmaradásához alacsony széleseesség szükséges. A vizsgálat azt mutatja, hogy Ferihegyen a $2\text{-}4\text{ ms}^{-1}$ széleseesség-értékek esetén fordult elő leggyakrabban csökkent látástávolság, az összes eset közel 41%-ban (40,95%).



4.6. ábra Széleseesség-értékek eloszlása csökkent látástávolság esetén (Saját ábra; adatforrás: ALMOS)

A csökkent látástávolsággal járó esetekkor tapasztalható szélirányok relatív gyakoriságára nem volt alapfeltevés. A ferihegyi repülőtér 13R pályaküszöbénél (és a többi

mérőhelyen is) a leggyakoribb szélirány az északnyugati (Takács, 2010). Ehhez képest, bár az 1000 méter alatti látástávolság esetén jelentkező szélirányok relatív gyakoriságában (4.7. ábra) is van egy észak-északnyugati irányt mutató másodmaximum, a leggyakoribb irány mégis a kelet-délkeleti irány.



4.7. ábra A szélirányok relatív gyakorisága csökkent látástávolság esetén (Saját ábra; adatforrás: ALMOS)

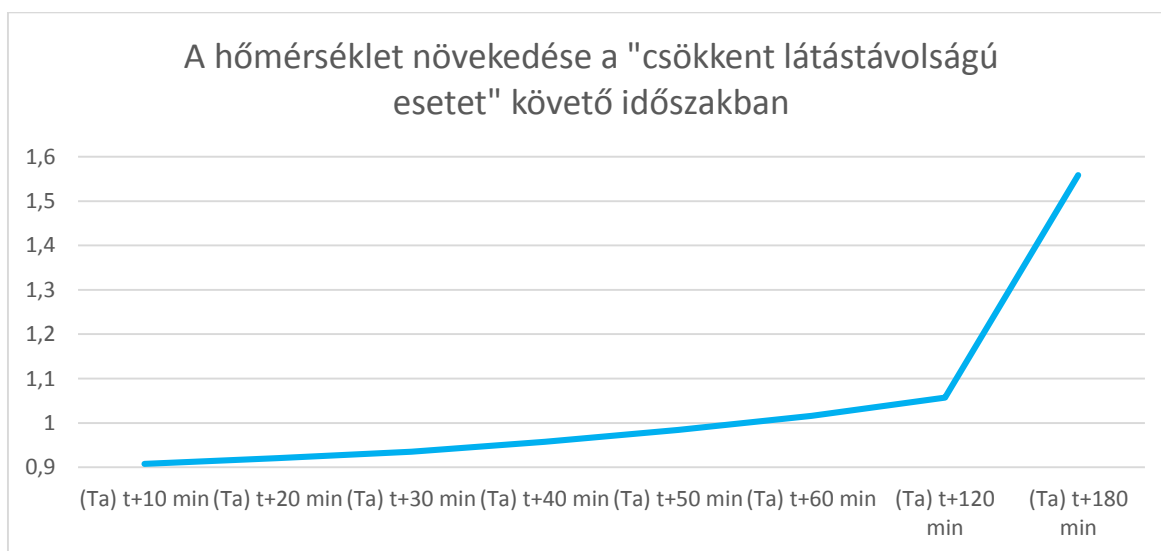
Összefoglalva elmondható, hogy a Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtér 13R pályaküszöbénél 1000 méter alatti látástávolság érték általában akkor jelentkezik, ha a tengerszintre átszámított légnyomás a normál légköri nyomásnál magasabb, leginkább 1015-1025 hPa közötti, a hőmérséklet -3°C és $+3^{\circ}\text{C}$ közötti, a szél sebessége jellemzően 2 ms^{-1} - 4 ms^{-1} közötti, iránya pedig kelet-délkeleti.

4.3.2 A KÖD FELOSZLÁSÁNAK - CSÖKKENT LÁTÁSTÁVOLSÁG MEGSZŪNÉSÉNEK - STATISZTIKUS KLIMATOLÓGIAI VIZSGÁLATA

Akárcsak a köd kialakulásához és fennállásához, a feloszlásához is kapcsolhatunk az előző fejezetek alapján fizikai szemléletű szabályokat, amiknek a ferihegyi helyi specifikációit ez a fejezet hívatott bemutatni. A légnyomás-értékek vizsgálatát ebből az alfejezetből azért hagytam ki, mert nem mutatott jelentős különbséget a csökkent látástávolságú időszak, illetve az azt követő egy-két és három órás időpontban mért tengerszintre átszámított légnyomás-érték (ahol pedig igen, ott valószínűleg a látásromlást a hulló csapadék nagy intenzitása okozta).

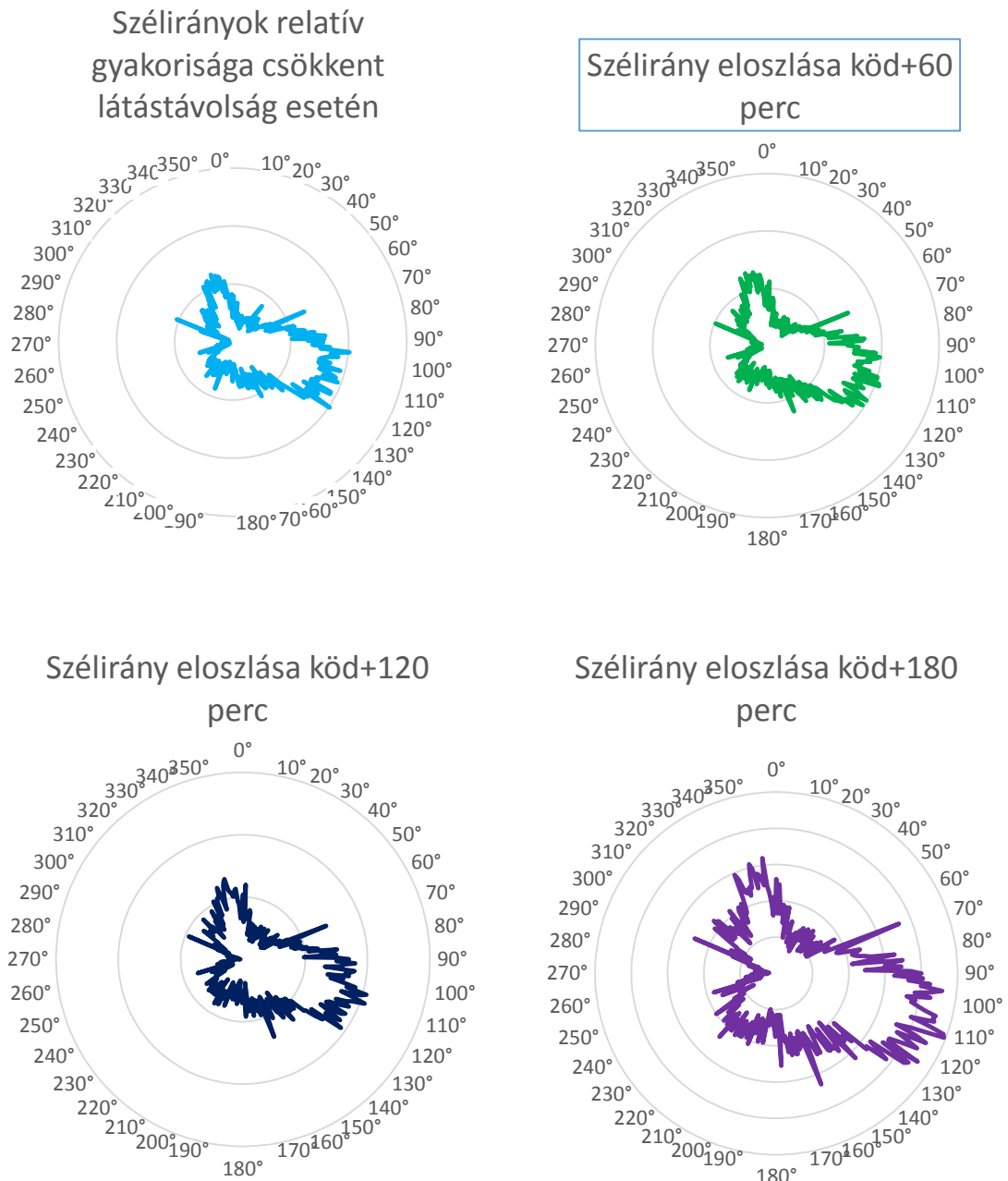
Az előző fejezetekre visszautalva, azt feltételezzük, hogy a köd feloszlásáért a légköri nedvesség csökkenése, a hőmérséklet, vagy a szélesség megnövekedése a felelős. Mivel a nedvességet az állandónak tekintett nyomás, és a hőmérséklet függvényeként tekintjük, vagy nedvesség advekciónál származtatjuk, így most csak a hőmérséklet és a szél változását veszem figyelembe.

Az előző alfejezetből kiderül, hogy a ferihegyi ködös esetek nagy része, -3°C és $+3^{\circ}\text{C}$ közötti hőmérséklet-értékek mellett fordult elő. A ködös időszakokban mért átlaghőmérséklet ennek megfelelően ebben a tartományban, valamivel 1°C alatt található. Az 4.8. ábrán jól látható, hogy a hőmérsékleti értékek a ködös időszakot követően növekvő tendenciát mutatnak már az első órában is, ám a ködöt követő második és harmadik órában válik igazán látványossá a növekedés.



4.8. ábra A hőmérséklet változása a csökkent látástávolságú időszakot követő három órában (Saját ábra, adatforrás: ALMOS)

Bár a szélirány változásában nem mutatható ki ilyen markáns változás, a két és három órával a csökkent látástávolságot követő helyzetben felfedezhető az egyébként uralkodó északnyugati szélirány relatív gyakoriságának növekedése. Az egy, két és három órával köd után mérhető szélirányok relatív gyakoriságát bemutató diagramokat a 4.9. ábra szemlélteti.



4.9. ábra Szélirányok relatív gyakorisága a csökkent látást követő órákban (Saját ábra, adatforrás: ALMOS)

5. KÖDRE OPTIMALIZÁLT FUZZY-LOGIKÁS ANALÓGIAKERESŐ WINDOWS OS ALATT FUTÓ ASZTALI ALKALMAZÁS

A program célja egy olyan Nowcasting időtávú ködelőrejelző módszer megalkotása, ami a pillanatnyi időhöz leghasonlóbb múltbeli időpontot és előzményeit kikeresi, így – lévén múltbeli esemény – az adatbázis későbbi időpontokra vonatkozó rekordjai alapján következtethetünk a kód várható viselkedésére.

5.1 A FUZZY LOGIKÁN ALAPULÓ ANALÓGIAKERESŐ ALKALMAZÁS

A fuzzy halmazelmélet első elméleti leírása a hatvanas évekre tehető. Azóta több tudományterület alkalmazza, főként irányítási, automatizálási problémák megoldására. A meteorológiai alkalmazásának lehetősége abban rejlik, hogy lehetővé teszi az empirikus úton szerzett ismeretek matematikai modellbe foglalását. A fuzzy logika alkalmazása során olyan kifejezések is pontos matematikai jelentéssel láthatók el, mint a „többnyire hasonló”, vagy a „kevésbé hasonló”. Ezt használjuk fel mi is, amikor a célirányosan kialakított adatbázisban keresünk az általunk meghatározott referenciaértékekhez hasonló időpontot. A hasonlósági metrika úgy lett kialakítva, hogy a leghasonlóbb értékek esetén a hasonlóságot jellemző szám nullához tartson. A Fuzzy-hasonlósági metrikát esetünkben egy MySQL utasítás sor tartalmazza, amelynek legegyszerűbb változata megtalálható a függelékben.

5.1.1 A FUZZY LOGIKÁN ALAPULÓ ANALÓGIAKERESŐ ELJÁRÁS ALKALMAZÁSA WINDOWS FEJLESZTŐI KÖRNYEZETBEN (MICROSOFT VISUAL STUDIO, C# NYELV)

Az analógiakereső program tervezésekor olyan jól használható programnyelvet kerestem, aminek az elsajátítása a későbbiek során is hasznomra válhat, alkalmas MySQL utasítások összefűzésére, és asztali alkalmazás kialakítására. A C# mellett felmerült a Java és a PHP is, ám végül a Windows operációs rendszer közép-európai elterjedtsége, valamint a Microsoft jelenlegi erőteljes terjeszkedése más platformok irányába arra készítetett, hogy C# programot fejlesszek.

Első lépésben olyan stabil kapcsolatot kellett kialakítani a program és az adatbázis között, ami alkalmas az adatbázis olvasására, és az adatbázisba való írásra is, majd ezt követően a Fuzzy-logikát tartalmazó kereső-lekérdező MySQL parancs futtatása következett.

5.2 A LEGHASONLÓBB IDŐPONT MEGHATÁROZÁSA

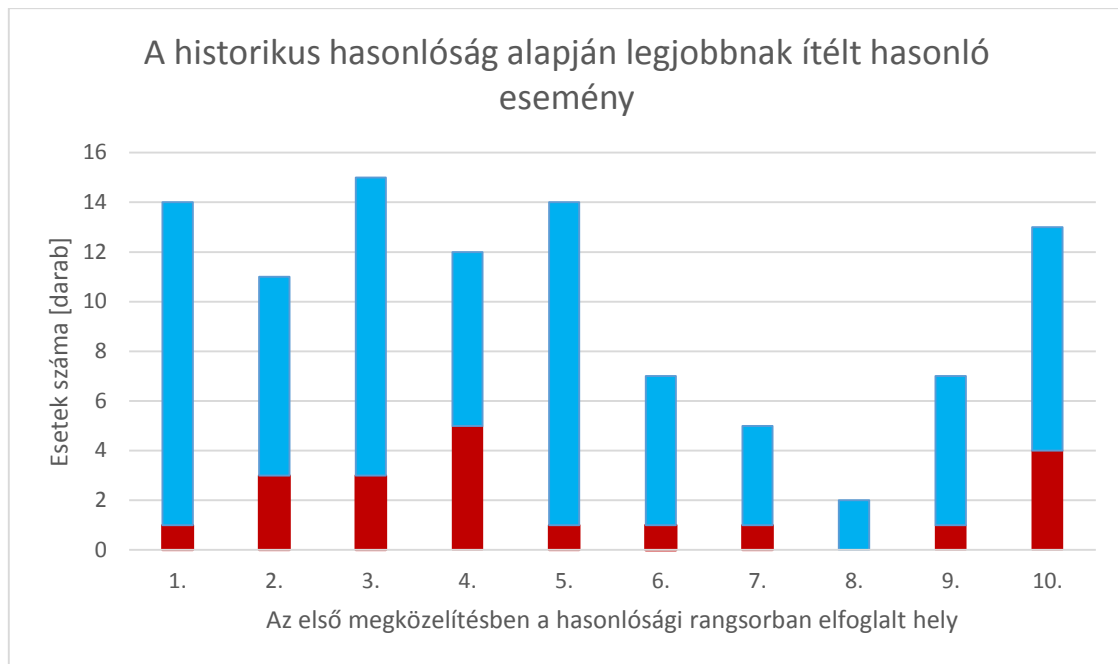
A leghasonlóbb időpont meghatározásához első lépésként az adatbázisban egy előre meghatározott hasonlósági metrika alapján, meghatározott paraméterek szerint egy adott T_0 időponthoz hasonló múltbeli $t_{01}, t_{02}, \dots, t_{020}$ időpontokat keresünk. A metrika a dátum, idő, hőmérséklet, QFE nyomás, relatív nedvesség, szélesebbesség és szélirány paraméterekre a következő:

$$1 - \text{abs}(\sin((\text{dayofyear}(\text{almos.date}) - \text{dayofyear}(\text{ref.date})) * 2 * \pi() / 365)) + 1 - \text{abs}(\sin((\text{time_to_sec}(\text{time}(\text{almos.date})) - \text{time_to_sec}(\text{time}(\text{ref.date}))) * 2 * \pi() / 86400)) + \text{abs}(\text{almos.13R_Ta} - \text{ref.13R_Ta}) + \text{abs}(\text{almos.13R_Tdp} - \text{ref.13R_Tdp}) + \text{abs}(\text{almos.13R_QFE} - \text{ref.13R_QFE}) + \text{abs}(\text{almos.13R_Sav2} - \text{ref.13R_Sav2}) + 1 - 0.5 * (1 + \cos(\pi() * (\text{almos.13R_Dav2} - \text{ref.13R_Dav2}) / 180)))$$

A hazai és nemzetközi tapasztalatokat figyelembe véve azt feltételeztük, hogy nem hagyatkozhatunk erre az egyszerű módszerre a leghasonlóbb helyzet megtalálásakor, szükséges egy másodlagos szűrés beiktatása.

A második lépésben ugyanezzel a metrikával megvizsgáltuk az első lépésben kiválasztott húsz leghasonlóbb eset közül az első 10 leghasonlóbb időpont előzményeit három órára visszamenően – az eredeti húsz időpont megfelezése a helyben használt webservert tárolási kapacitása miatt vált szükségessé -, hogy azok mennyire hasonlítanak az adott eredeti t_0 időpont előzményeihez. Ugyanebben a lépésben rangsorolnunk kell az előzmények alapján is az időpontok közötti hasonlóságot. Azért, hogy a teszt reprezentatív legyen az egész adatbázisra vonatkozóan, a programot az ALMOS adatbázisból 100 véletlenszerűen kiválasztott időpontra futtattam le.

A vizsgálat során azt az egyértelmű eredményt kaptuk, hogy nem hagyatkozhatunk csupán az elsődleges módszerre, mivel az első megközelítés szerinti leghasonlóbb időpontok a historikus hasonlóság szerint az eseteknek csak tizennégy százalékában (5.1. ábra) bizonyultak valóban a legjobb választásnak, szükséges tehát a másodlagos szűrés. A 100 véletlenszerűen kiválasztott időpont közül 20 időpont 100%-os relatív nedvesség értékkel jellemezhető. Ezeket az időpontokat külön ábrázolva az 5.1-es ábrán jól látható, hogy követik a véletlenszerűen kiválasztott esetek által felállított tendenciát.



5.1. ábra: 100 véletlenszerűen kiválasztott esetenél vizsgáltam az időpontok hasonlóságát, illetve a historikus (előzmények szerinti) hasonlóságát. Az ábra az időpont szerinti helyezéshez mutatja meg, hogy hány esetben lett előzmény szerinti hasonlóság szempontjából legközelebbi eset (Saját ábra)

Ezen a ponton egy olyan módszer áll rendelkezésünkre, ami úgy nevezett historikus hasonlóság alapján rangsorolta a kiválasztott időponthoz tíz leghasonlóbb múltbeli eseményt.

A módszer hatékonyságát igazolja, hogy a historikus hasonlóságok alapján a leghasonlóbbak – a 25 alatti historikus hasonlóság értékkel jellemezhető esetek olyan kicsi eltérést mutatnak a referenciaállapot meghatározott paramétereikhez képest, ami az ALMOS mérőrendszer mérési hibatarományán belül esik, így jó közelítéssel azonos eseménynek tekinthető - aránya a vizsgálat alatt 53%.

5.3 A KIVÁLASZTOTT IDŐPONTOT KÖVETŐ IDŐSZAK IDŐPONTJAINAK LEVÁLOGATÁSA ÉS ELEMZÉSE

A program lehetőséget nyújt az első lépcsőben leválogatott és sorba rendezett időpontokat követő időszakok egyszerű és gyors leválogatására. Tekintettel, hogy a program alapvetően nowcasting előrejelzésre alkalmas, a leválogatott időszak a kiválasztott időpontot követő 180 percet öleli fel tíz perces felbontásban.

Mint minden modell, ez is tovább finomítható. Azzal a feltételezéssel élünk, hogy ha azokat a paramétereket, amelyekről úgy véljük, hogy a legjobban befolyásolják a kód

viselkedését, súlyozottan vesszük figyelembe az alkalmazás futtatása során. A finomhangolás módszerének kidolgozása a bizonyos időjárási helyzetekre további kutatómunkát, és sok eset vizsgálatát kívánja meg, így jelen munkában azt mutatom be az esettanulmányokon keresztül, hogy milyen hatása van a metrika változtatása az előrejelzés pontosságára. A súlyok meghatározásakor a 4.2. fejezetben bemutatott Stepwise-regresszió eredményei voltak a segítségemre.

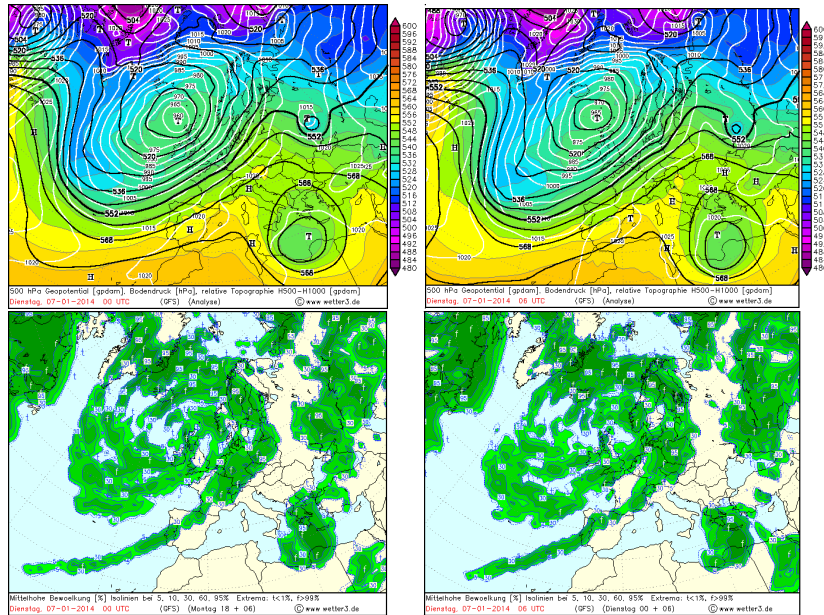
A program alkalmazhatóságát olyan eseteken teszteltem, amelyeknél a látástávolság romlása olyan mértékű volt, hogy korlátozta a repülőtér fogadóképességét. Az esetek keresésekor segítségemre volt, hogy Magyarország legnagyobb utas- és áruforgalmat bonyolító nemzetközi repülőterének bezárása viszonylag nagy sajtóvisszhanggal jár. Ezen esetek legyűjtött adataival futtattam a programot két metrikával. Az első M_1 metrika minden vizsgált változót, úgy mint dátum, idő, szélirány, szélesség, hőmérséklet, harmatpont, QFE nyomás egyszeres súllyal vesz figyelembe, míg az M_2 „finomhangolt” metrika egyszeres súllyal veszi a QFE nyomást, a dátumot és időt, kétszeres súllyal a szélirányt, négyszeres súllyal veszi figyelembe a szélességet, ötszörös súllyal a harmatpontot valamint hétszeres súllyal veszi figyelembe a hőmérsékletet.

5.3.1 ELSŐ ESETTANULMÁNY – 2014.01.07. KÖD A TELJES ELŐREJELZETT IDŐSZAKBAN

„Ma reggel az Austrian Airlines Bécs-Budapest járata tanácstalanul körözött egyet leszállás előtt, majd a pilóták és a személyzet úgy döntöttek: túl sűrű a köd, inkább nem kockáztatják a leszállást. Szerencsére ez nem okozott akkora nehézséget, egyszerűen visszamentek Bécsbe. (S emiatt a reggeli Budapest-Bécs járat is kimaradt, hisz ez lett volna a gép visszaútja.) [...]” (forrás: <http://budapestlight.hu/cikk.php?id=4716> letöltve:2014.08.21)

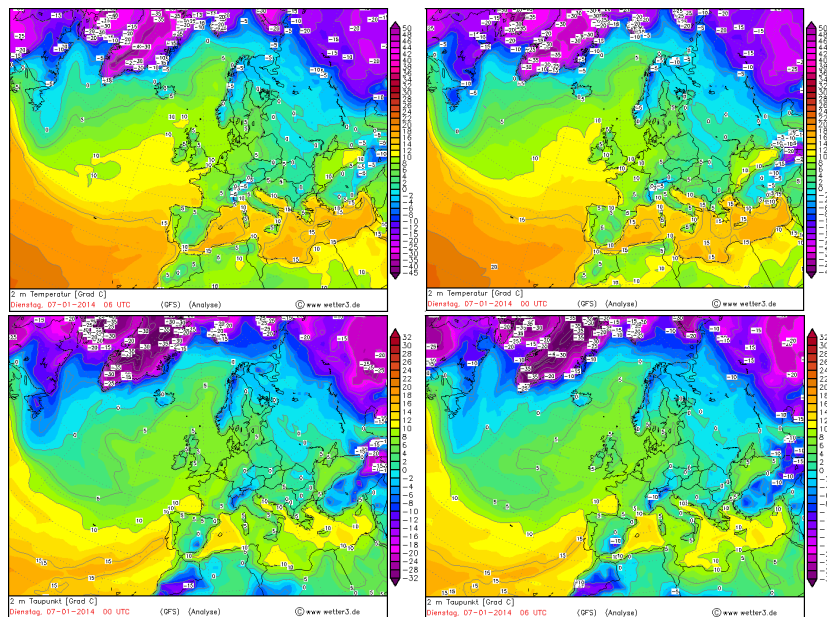
A kérdéses időpontra vonatkozó METAR táviratból kiderül, hogy Ferihegyen a látástávolság 2014. január 7-én reggel 7 órakor gyenge $\sim 1 \text{ ms}^{-1}$ -os szél, 1023 hPa tengerszintre átszámított légnyomás érték, valamint 0°C -os harmatpont-deficit mellett, 100 méteres látástávolságot okozó köd és gyenge szitálás volt észlelhető.

Hazánk időjárását 2014. január 7-én a 0:00 UTC-s, illetve a 06:00 UTC-s 500 hPa-os geopotenciál térképen jól látható magassági gerinc, a talajon pedig egyre erőteljesebben kiépülő, a nyomási térképeken szintén kirajzolódó magasnyomás alakítja. Magyarországtól nyugatra egy előregedő ciklon okoz borult égboltot, de hazánk felett tiszta az ég (5.3.1.1. ábra).



5.3.1.1. ábra: Nagyterésű folyamatok bemutatása 2014.01.07-én 0:00 UTC és 06:00 UTC-kor (forrás: wetter3.de /Archiv/)

A talajmenti nedvességi karakterisztikát a 2 méteres hőmérséklet és harmatpont térképek szemléltetik. A hajnali illetve reggeli órákban a harmatpont-deficit nagyon kicsi, és a térképen itt be nem mutatott szélsősebesség értéke is a köd kialakulásának kedvező tartományban volt (5.3.1.2. ábra).



5.3.1.2. ábra: ábra: A harmatpont-deficit bemutatása 2014.01.07-én 0:00 UTC és 06:00 UTC-kor (forrás: wetter3.de /Archiv/)

A nap további METAR táviratait tekintve elmondható, hogy a látástávolság-értékek a következő másfél órában nőni kezdtek. A programot a 2014. január 7. 07:00:00 kor mért adatokkal lefuttatva a következő eredményt hozta:

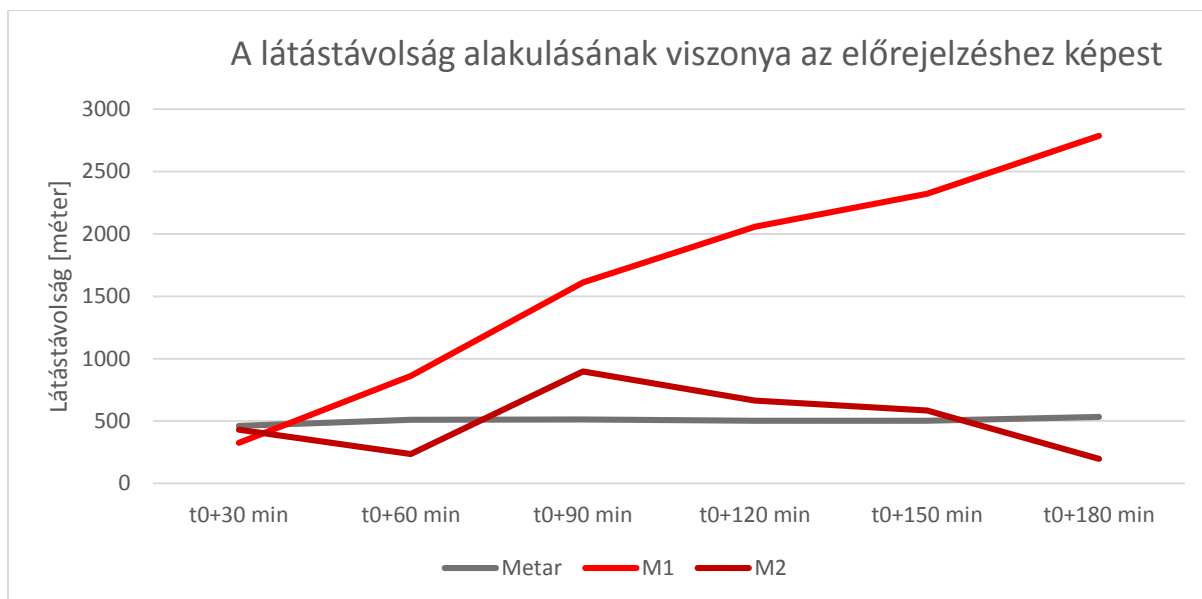
A leghasonlóbb értékek között a súlyozatlan metrikával számolva áprilisi, szeptemberi, októberi és novemberi időpontok szerepelnek. A historikus hasonlóság vizsgálata alapján az operatíván alkalmazandó időpont az eredetileg 7. helyezett 2012. november 20 23:00 időpont lett az alapbeállításokkal (M_1), ami 290° irányból fújó 1 ms^{-1} sebességű széllel, kerekítve 2 fokos harmatponttal, illetve hőmérséklettel valamint 1008 hPa QFE nyomási értékkel és 100%-os relatív nedvességgel jellemezhető. A kiválasztott eset historikus hasonlóság értéke az M_1 modell esetén 22,25.

5.3.1.1. táblázat: látástávolság alakulásának, és az analógiakereső program által készített előrejelzések, mértékegység: méter (Saját táblázat)

	$t_0+30 \text{ min}$	$t_0+60 \text{ min}$	$t_0+90 \text{ min}$	$t_0+120 \text{ min}$	$t_0+150 \text{ min}$	$t_0+180 \text{ min}$
RVRav10	462	510	514	503	502	533
M_1	326	862	1611	2056	2321	2786
M_2	431	235	898	664	585	198

A „finomhangolt” M_2 metrika a futási eredményei közül az eredetileg 10. helyen szereplő 2006. november 8 19:30 időpontot találta a historikus hasonlóság alapján a leghasonlóbbnak. Ez az időpont 0°C -os harmatpont deficit mellett 321° irányból fújó 2 ms^{-1} -os szél mellett 632 méteres horizontális látástávolsággal jellemezhető. Az 5.3.1.3. ábrát tekintve jól látható, hogy míg a finomítatlan modell rögtön az elején elszáll, a súlyozott modell előrejelzett értékei a mért értékek körül ingadoznak a teljes előrejelzett időszak alatt.

A 2012. november 20 23:00 időpontot követő három órás időszakban az M_1 modell eredményei 326 méter és 2786 méter közötti látástávolság-értékeket adnak (5.3.1.3. ábra és 5.3.1.1. táblázat). Az előrejelzés szerint csak a 180 perces időszak végére várható jelentős látástávolság javulás. Mivel a 2014. január 7. 10:00 kor elküldött távirat, illetve a mérési adatokat tartalmazó adatbázis tanúsága szerint a látástávolság értékei 500 méter körül stagnáltak a teljes időszak során, elmondható, hogy a 2014. január 7. reggeli ködös időszakra vonatkozóan, bár a kezdeti időponthoz hasonló időpontot talált, a következményeket nem tudta előrejelezni az M_1 modell.



5.3.1.3. ábra: A látástávolság alakulásának, és az analógiakereső program által készített előrejelzések viszonya (Saját ábra)

Az M2 „finomhangolt modell” által előrejelzett látástávolság-érték ezzel ellentétben az előrejelzési időszak teljes időtartama alatt a mért látástávolság-érték körül ingadozott, és az időszak végéig ködöt jelzett előre. Jól látszik ebből, hogy a modell paramétereinek súlyozásával jelentősen javítható a modell bevétele. Ezt igazolja a bevétele objektív vizsgálata is.

A modellek bevétele objektív vizsgálatához a négyzetes (RMSE) hiba alakulását figyeljük. Nevéhez méltó módon az RMSE a reziduumok négyzetének átlagából von gyököt. Ezáltal egy jellemző eltérést kapunk a mért és a modellek által előállított látástávolság-értékek között.

5.3.1.2. táblázat: Négyzetes hiba alakulása az M₁ és M₂ metrikák futtatásakor az első esettanulmányban (Saját táblázat)

	M ₁ hasonlósági metrika	M ₂ hasonlósági metrika
RMSE (méter)	1422,579	248,0178

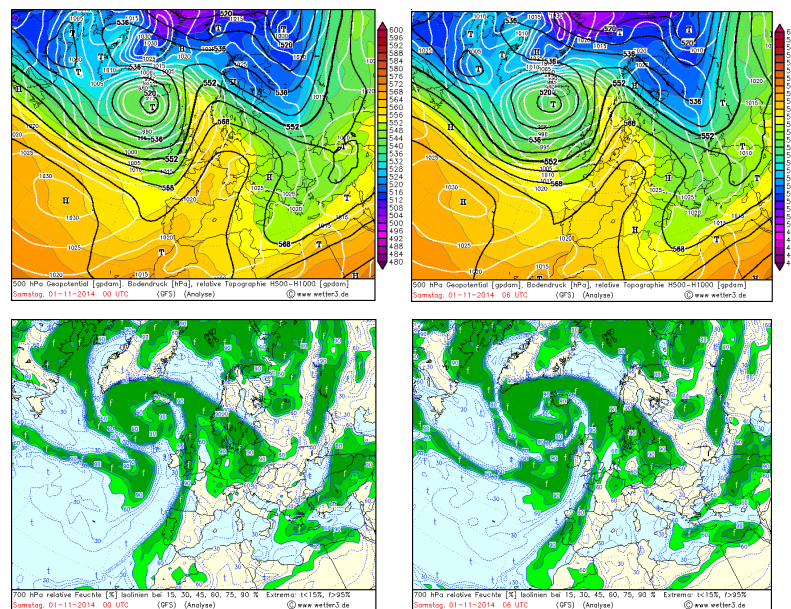
Az előrejelzések négyzetes hibájáról elmondható, hogy a finomhangolást követően a modell hibája az eredeti hiba körülbelül hatodára csökkent. A finomhangolt metrika hibájáról elmondható (5.3.1.2. táblázat), hogy olyan kicsi, hogy a bekövetkezése esetén látástávolság-eltérést a 80 ms⁻¹ sebességgel landoló utasszállító repülőgép pilótája három másodpercen belül észlelné.

5.3.2 MÁSODIK ESETTANULMÁNY – 2014.11.01. KÖD MEGSZŰNÉSE AZ ELŐREJELZETT IDŐSZAK VÉGÉRE

„Nem tudtak leszállni a repülőgépek a reggeli sűrű köd miatt a Liszt Ferenc repülőtéren. A leszállás előtti utolsó pillanatban döntöttek úgy a pilóták, hogy inkább Bécsbe illetve Prágába viszik az utasokat. Bécsből később visszaindult a gép és 3 óras késéssel érkezett Budapestre. De autóval is nehéz volt közlekedni többfelé is a sűrű, tejszerű ködben.” (forrás: http://tenyek.hu/tenyek/161576_hatalmas_kod_miatt_nem_szalltak_le.html ((videó) letöltve: 2016.05.03.)

A kérdéses időpontra vonatkozó METAR táviratból kiderül, hogy Ferihegyen a látástávolság 2014. november 1-én reggel 7 órakor gyenge, 1 ms^{-1} -os szél, 1027 hPa tengerszintre átszámított légnyomás érték, valamint 0°C -os harmatpont-deficit mellett, 150 méteres látástávolságot okozó köd volt észlelhető.

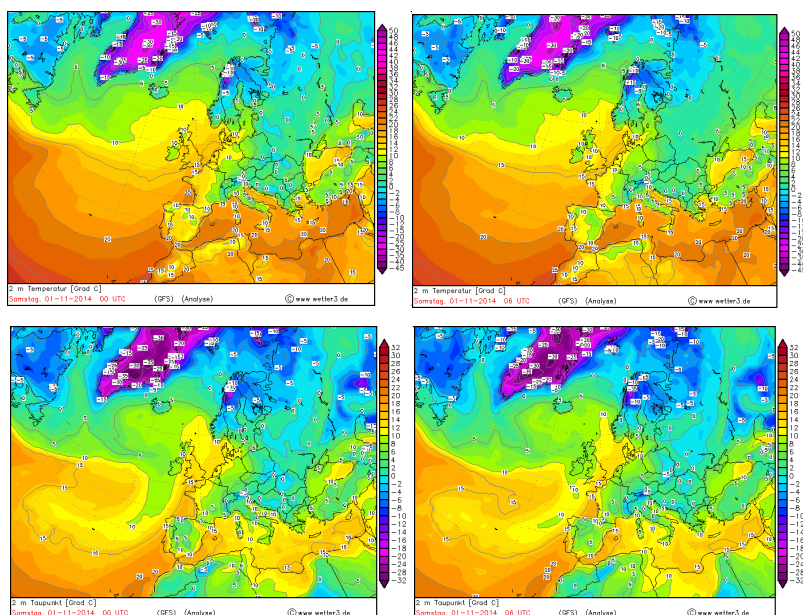
Magyarország időjárását 2014. november 1-én a 0:00 UTC-s, illetve a 06:00 UTC-s 500 hPa-os geopotenciál térképen kirajzolódó magassági gerinc, a talajon pedig egy kiépült, a talajszintre vonatkozó nyomási térképeken szintén látható magasnyomású képződmény alakítja. Magyarországtól északra egy izlandi központi rendelkező nagyméretű ciklon melegfrontja okoz borult csapadékos időt, de hazánk felett tiszta az égbolt (5.3.2.1. ábra).



5.3.2.1. ábra: Nagytérségű folyamatok bemutatása 2014.11.01-én 0:00 UTC és 06:00 UTC-kor (forrás: [wetter3.de /Archiv/](http://wetter3.de/Archiv/))

A talajmenti nedvességi karakterisztikát a 2 méteres hőmérséklet és harmatpont térképek szemléltetik. A hajnali illetve reggeli órákban a harmatpont-deficit nagyon kicsi, és a

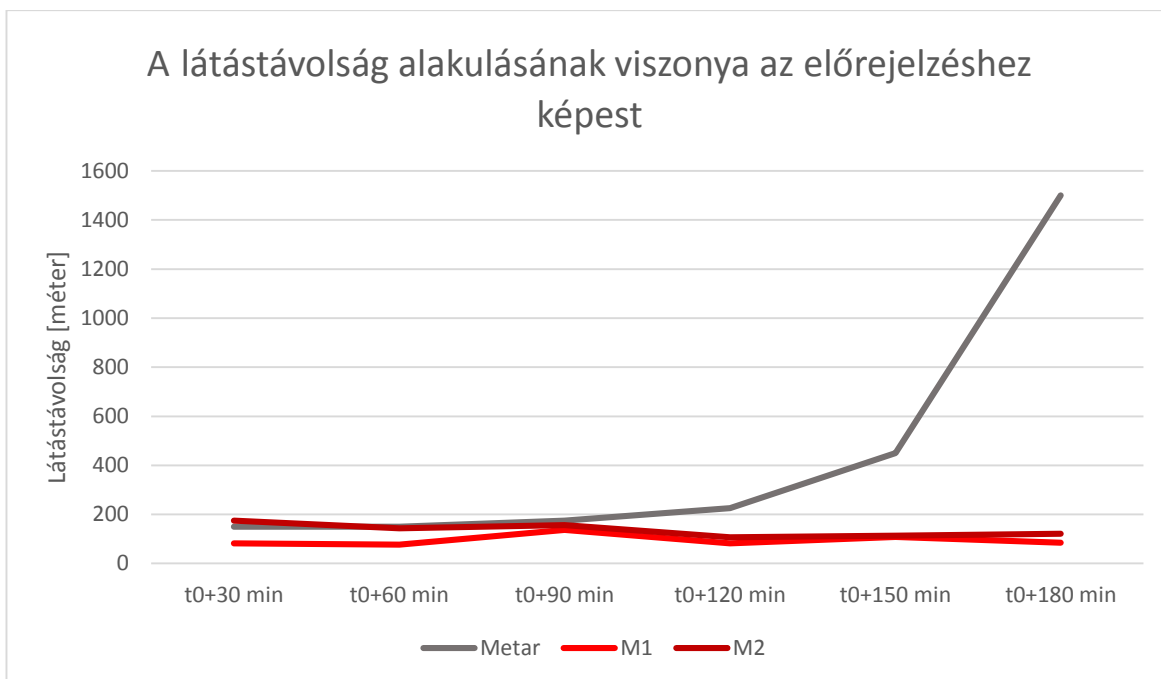
térképen itt be nem mutatott szélesség értéke is a köd kialakulásának kedvező $1-2 \text{ ms}^{-1}$ -os tartományban volt (5.3.2.2. ábra).



5.3.2.2. ábra: A harmatpont-deficit bemutatása 2014.11.01-én 0:00 UTC és 06:00 UTC-kor (forrás: [wetter3.de/Archiv/](http://www.wetter3.de/Archiv/))

A nap további METAR táviratait tekintve elmondható, hogy 2014. november elsején reggel olyan köd volt tapasztalható a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtéren, ami a 8:30-ig érkező repülőgépek közül legalább kettő esetében ellehetetlenítette a leszállást. Ez a köd késő reggel azonban gyorsan feloszlott, így a két repülőgép közül az egyik mégis képes volt – ugyan 3 óra késéssel - landolni (5.3.2.3. ábra). Az előrejelzett három órás időszak végére a köd fel is oszlott. A programot a 2014. november 1. 07:00-kor elküldött METAR táviratban elküldött adatokkal lefuttatva a következő eredményt hozta:

Az M_1 súlyozatlan metrikát lefuttatva a leghasonlóbb értékek között szeptemberi, októberi, novemberi, januári, februári és áprilisi időpontok szerepelnek. A historikus hasonlóság vizsgálata alapján az operatíván alkalmazandó időpont az eredetileg 7. helyezett 2008. január 18. 17:50 időpont, ami 198° irányból fújó 1 ms^{-1} sebességű széllel, kerekítve 3 fokos harmatponttal, illetve hőmérséklettel valamint 1026 hPa nyomási értékkel és 100%-os relatív nedvességgel jellemezhető. A kiválasztott eset historikus hasonlóság értéke 30,46, ami előljáróban mérsékelt bizakodásra ad okot.



5.3.2.3. ábra: A látástávolság alakulásának, és az analógiakereső program által készített előrejelzések viszonya (Saját ábra)

Az M₂ „finomhangolt metrika” leghasonlóbbnak a 2011. január 10 15:50 időpontot találta. Ez az időpont 10° irányból fújó 1 ms⁻¹ sebességű széllel, 3 fokos harmatponttal, illetve hőmérséklettel valamint 1025 hPa nyomási értékkel és 100%-os relatív nedvességgel jellemezhető. A kiválasztott eset historikus hasonlóság értéke 31,06, ami igen közeli az M₁ metrikáéhoz.

A kezdeti t₀ érték megtalálásában mindkét metrika által számított látástávolság érték közeli a METAR távirat vonatkozó látástávolság értékhez, amit számszerűen 5.3.2.1. táblázat közöl, szemléletesen pedig az 5.3.2.3. ábra mutat be. Míg az M₁ általános metrika a teljes időszakban alulbecsüli a látástávolságot, az M₂ „finomhangolt metrika” az első másfél órában jól tükrözi a valós adatokat, másfél órát követően romlik csak el.

5.3.2.1. táblázat: látástávolság alakulásának, és az analógiakereső program által készített előrejelzések, mértékegység: méter (Saját táblázat)

	t ₀ +30 min	t ₀ +60 min	t ₀ +90 min	t ₀ +120 min	t ₀ +150 min	t ₀ +180 min
METAR	150	150	175	225	450	1500
M ₁	82	77	137	82	108	85
M ₂	175	143	157	107	114	121

Az előrejelző módszer sajnos így nem volt használható sem az M_1 sem az M_2 metrikával a kérdéses időszakra vonatkozóan. A hiba oka feltételezhetően a bemenő adatok pontosságában rejlik, mivel a METAR táviratokban szereplő adatok kerekítettek, ezért a modell kezdeti feltételei nem elég pontosak. Hasonló jelenség megfigyelhető más valószínűségi előrejelzések esetében is. A szemmel látható különbségeket a modellek objektív vizsgálata számszerűen is megadja.

A modellek bevalásának objektív vizsgálatához ismét az RMSE (négyzetes hiba) alakulását figyeljük.

5.3.2.2. táblázat: Négyzetes hiba alakulása az M_1 és M_2 metrikák futtatásakor a második esettanulmányban (Saját táblázat)

RMSE [méter]	M_1 hasonlósági metrika	M_2 hasonlósági metrika
RMSE t_0 - t_{0+180} perc	598,7536	581,5868
RMSE t_0 - t_{0+90} perc	43,58325	12,89703
RMSE t_{90} perc- t_{0+180} perc	597,1652	581,4437

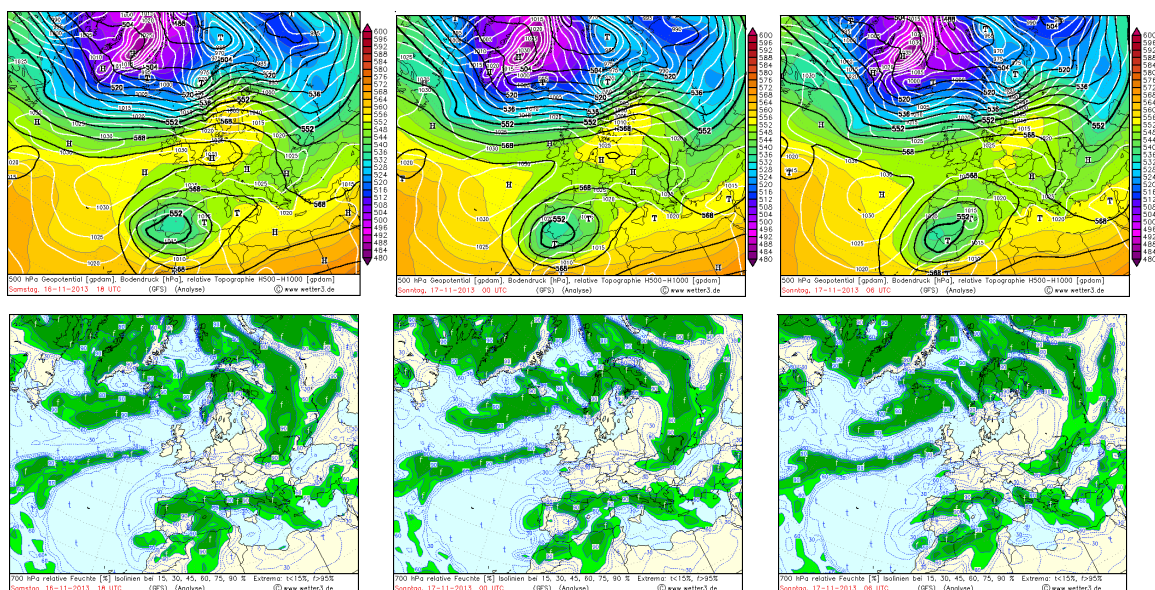
A vizsgálat során kapott négyzetes hibaértékek nagyok. Igaz, hogy az első másfél órát tekintve a bevalások nagyon jók, a „finomhangolt” metrika négyzetes hibája pedig szinte elhanyagolható (5.3.2.2. táblázat), az időszak második felében tapasztalható romlás erőteljesen elrontja a kedvező kezdetet.

5.3.3 HARMADIK ESETTANULMÁNY – 2013.11.16-17. IDŐSZAKOSAN MEGÉLÉNKÜLŐ SZÉL OKOZTA LÁTÁSTÁVOLSÁG-JAVULÁS

„Szombat éjjel és ma hajnalban a repülőgépek kiterő állomásokon szálltak le, főleg Bécsben, Pozsonyban és Linzben. Az Aeroflot járata Belgrádban landolt. Az utasok többségét buszokkal szállítják Budapestre. Várhatóan még délelőtt javul a helyzet, és felszáll a köd. A repülőtér két futópályája közül az egyikén már 500 méter körüli a látótávolság, de a másikon még mindig sűrű a köd. Tegnap késő éjjel a látótávolság 100-175 méter körül volt. A reggel érkező járatok közül az első már leszállt.” (2013.11.17 09:30 MTI)

A kérdéses időszakra vonatkozó METAR táviratokból kiderül, hogy Ferihegyen a látástávolság 2013. november 16-án 21 órától 2013. november 17-én hajnal 3:30-ig 170°-ról fújó gyenge, 0 majd 2 végül 0,5 ms⁻¹-os szél, 1026 hPa tengerszintre átszámított légnyomás érték, valamint 0°C-os harmatpont-deficit mellett, folyamatosan 300 méter alatti látástávolságot okozó köd volt észlelhető. A köd a reggeli órákban kezdett feloszlani, mindkét futópályára vonatkozóan a 7:30-as METAR táviratban szerepel először a nap folyamán 1000 méter feletti látástávolság-érték.

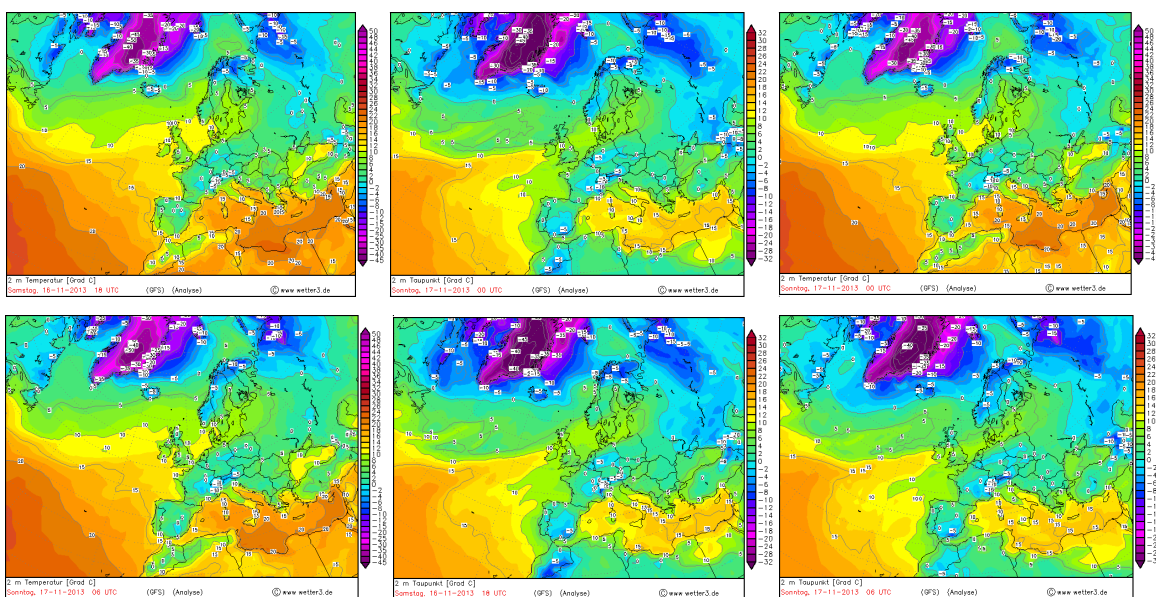
Magyarország időjárását 2013. november 16-án éjjel, és 2013. november 17-én hajnalban a 2013. november 16. 21:00 UTC-s, illetve a 2013. november 17. 0:00 UTC-s és 06:00 UTC-s 500 hPa-os geopotenciál térképen megjelenő magassági gerinc, a talajon pedig egy kiépült, a talajszintre vonatkozó nyomási térképeken szintén látható magasnyomású képződmény alakítja.



5.3.3.1. ábra: Nagytérségű folyamatok bemutatása 2013.11.16-án 18:00 UTC-kor, és 2013.11.17-én 0:00 UTC és 06:00 UTC-kor (forrás: wetter3.de /Archiv/)

Magyarországtól északkeletre egy nagyméretű előregerdő ciklon okoz borult időt, amelynek pereme érinti az északkeleti országrészt, de Budapest felett tiszta az égbolt (5.3.3.1. ábra).

A talajmenti nedvességi karakterisztikát a 2 méteres hőmérséklet és harmatpont térképek szemléltetik (5.3.3.2. ábra). A hajnali illetve reggeli órákban a harmatpont-deficit nagyon kicsi. A térképen itt be nem mutatott szélsébség értéke kezdetben a köd kialakulásának kedvező $0-1 \text{ ms}^{-1}$ -os – szinte szélcsend - tartományban volt, majd átmenetileg megerősödött, a 2 ms^{-1} -os sebességet is elérte, ekkor a köd is gyengült, majd később a szél ismét csendesedett, $0,5-1 \text{ ms}^{-1}$ -os sebességre, és a köd is tudott még erősödni.

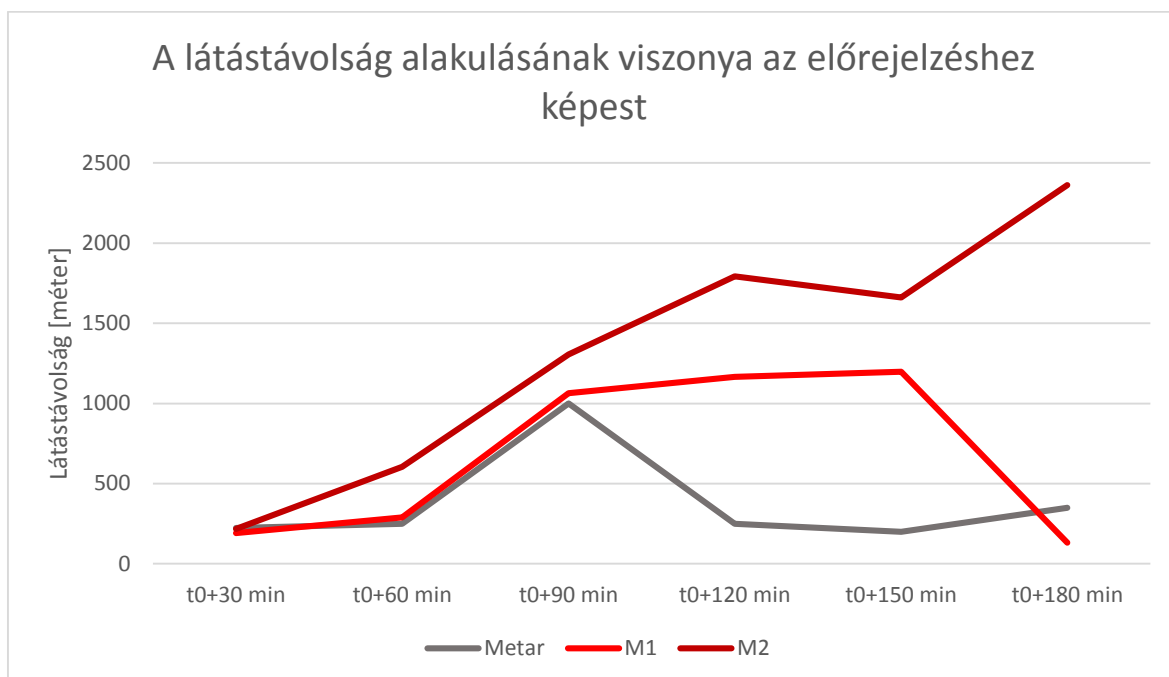


5.3.3.2. ábra: A harmatpont-deficit bemutatása 2013.11.16-án 18:00 UTC-kor, és 2013.11.17-én 0:00 UTC és 06:00 UTC-kor (forrás: wetter3.de/Archiv/)

Az időszak METAR távirataiból kiderül, hogy még 2013.11.17-én 3:00-kor 150 méter, 3:30-kor 300 méteres volt a látástávolság. Ekkor a repülést biztosító személyzetnek már számítania kellett több utasszállító és teherforgalmat lebonyolító járat érkezésére. Ezt követően 4:00-ra az egyik futópályán 1000 méterre emelkedett a látástávolság. Ebben az esettanulmányban arra keresem a választ, hogy a 2013. november 17 3:00-kor mért adatokkal lefuttatva a modell (M_1 és M_2 metrika) képes-e a szél időszakos megerősödése okozta időszakos látástávolság javulást lekövetni.

Az M_1 súlyozatlan metrikát lefuttatva a leghasonlóbb értékek között januári és márciusi időpontok szerepelnek. A historikus hasonlóság vizsgálata alapján az operatíván alkalmazandó időpont az eredetileg 10. helyezett 2008. január 10 12:10 időpont, ami szélcsend, 1028 hPa QFE nyomási érték és 100%-os relatív nedvesség mellett 240 méteres

látástávolság-értékkel jellemezhető. A kiválasztott eset historikus hasonlóság értéke 13,98, ami előljáróban bizakodásra ad okot.



5.3.3.3. ábra: A látástávolság alakulásának, és az analógiakereső program által készített előrejelzések viszonya (Saját ábra)

A „finomhangolt” M₂ metrika a futási eredményei közül az eredetileg 2. helyen szereplő szintén 2008. január 10-, de egy korábbi, 11:30-as időpontot találta a historikus hasonlóság alapján a leghasonlóbbnak. Ez az időpont szélcsend, 0°C-os harmatpont deficit és 1010 hPa QFE nyomási érték mellett és 262 méteres horizontális látástávolsággal jellemezhető. Az 5.3.3.3. ábrát tekintve jól látható, hogy mindkét metrika sikeresen előrejelezte a látástávolság időszakos javulását, ám a javulás időtartamát és mértékét mindkét metrika túlbecsülte. Mindez számszerűen az 5.3.3.1. táblázatban található.

5.3.3.1. táblázat: látástávolság alakulásának, és az analógiakereső program által készített előrejelzések, mértékegység: méter (Saját táblázat)

	t ₀ +30 min	t ₀ +60 min	t ₀ +90 min	t ₀ +120 min	t ₀ +150 min	t ₀ +180 min
METAR	300	1000	1500	400	600	1000
M ₁	385	495	382	577	647	1048
M ₂	314	255	239	228	216	263

Ez az esettanulmány jól mutatja be azt a jelenséget, amikor az előrejelzett időszak során az időszakosan megélénkülő szél hatására a látástávolság szintén időszakosan ugrásszerűen

javulni kezd, majd visszazomlik. Ez az időszak a repülőtér üzemeltetése szempontjából egy olyan lehetőség lehet, amikor a légtérben várakozó repülőgépeknek engedélyezhetik a leszállást, csökkentve a köd okozta addigi gazdasági hátrányt. Az ilyen jellegű ingadozások előrejelzésére az esettanulmány tanúsága szerint a módszer részben már alkalmas. Megjegyzendő, hogy a modell mindkét metrikával jól közelítette az időszak kezdeti látástávolság-értékét, és a látástávolság javulásának kezdetét. A szűk keresztmetszet valószínűleg ebben az esetben az élénkebb széllel jellemezhető időszak hosszának előrejelzésében keresendő. A modell bevalásának objektív vizsgálata ebben az esetben is tükrözi a szemmel látható tendenciákat.

A modellek bevalásának objektív vizsgálatához a négyzetes (RMSE) hiba alakulását figyeljük.

5.3.3.2. táblázat: Négyzetes hiba alakulása az M_1 és M_2 metrikák futtatásakor a harmadik esettanulmányban (Saját ábra)

	M_1 hasonlósági metrika	M_2 hasonlósági metrika
RMSE (méter)	560,5768	1209,851
RMSE t_0 - t_0+90 perc (méter)	40,9878	234,0331

A vizsgálat során kapott négyzetes hibaértékek még itt is nagyok, ám látszik, hogy az időszak elején még kifejezetten jól tükrözi – főleg az M_1 metrika – a szél megerősödése okozta látástávolság-javulást. Azt, hogy a program a szeles időszak hosszát gyengén jelzi előre, az 5.3.3.2. táblázat adataiból jól kivehető.

6. ÖSSZEFOGLALÁS, KONKLÚZIÓ

A diplomamunkám célja az volt, hogy a léginnavigációs szolgálatok számára készülő látástávolságra vonatkozó célprognózisok készítéséhez, pontosításához új, statisztikus szemléletű megközelítést, módszert adjak, amelynek felhasználásával új lehetőségek nyílnak a ködelőrejelzések készítése során ahhoz, hogy a légiforgalmi irányítás számára a lehető legpontosabb, és a számukra leghatékonyabban használható információk álljanak rendelkezésre. Munkám során először bemutattam a repülőtéren üzemelő ALMOS rendszer mérési eredményeit, amelynél a meteorológiai gyakorlatban ritkán előforduló adatsűrűség állt rendelkezésre, mind térben, mind időben. A mérési eredmények célzott statisztikus klimatológiai vizsgálatával megismerhettük Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtéren a köd viselkedését. A statisztikai vizsgálatok során a köd viselkedését, a keletkezését és feloszlását a többi kiválasztott meteorológiai paraméter változásának függvényében figyeltük. Ezekből a vizsgálatokból származó eredmények alapján meghatározhattuk a kidolgozandó új, analógiakereső módszerben felhasznált időjárási paramétereket.

A redundáns változók kiszűrését követően elkezdődhetett az analógiakereső alkalmazás fejlesztése, amelynek első lépése egy a helyi erőforráson tárolt tesztadatbázis felépítése volt. Tekintve hogy az adatbázis tíz évet ölel fel tíz perces időbeli felbontásban, a módszer használata a digitális adattárolás elterjedése előtti időkben nem lett volna lehetséges. Az elkészült, és folyamatosan fejlesztett analógiakereső ezen az adatbázison végez összetett lekérdezéseket, amelynek eredményeként nowcasting időtávú látástávolság előrejelzést kapunk eredményül. A futási eredmények elsődleges vizsgálata azt mutatta, hogy az előrejelzés pontosítása érdekében további szűrőkkel kell ellátnunk az alkalmazást. Bevezetve a historikus hasonlóság alapján történő másodlagos szűrést, az alkalmazás tesztelése során azt az eredményt kaptuk, hogy az alkalmazás képes optimális esetben - ha nincs adatvesztéses időszak, és ködös az idő - olyan pontossággal keresni az adatbázison, hogy a referencia adatokhoz képest az eredmények az ALMOS rendszer mérési hibatarományán belül essenek.

Az analógiakereső alkalmazást bemutató esettanulmányok készítésekor olyan esetekre koncentráltunk, amelyeknél a látástávolság köd miatt olyan alacsony volt, hogy lehetetlenné vált járatok fogadása Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtéren, így azoknak máshol kellett leszállniuk, gazdasági hátrányt okozva a repülőtérnek, a légitársaságnak és az utasoknak egyaránt. Az esettanulmányok jól mutatják, hogy az alkalmazás által adott

előrejelzés bizonyos helyzetekben képes jól tükrözni a köd viselkedését, optimális esetben pedig a konkrét látástávolság-értékeket is pontosan előrejelezheti. Mint minden módszer, ez az analógiakereső alkalmazás is tovább finomítható. Lehetőséget nyújt az alkalmazás a paramétereinek súlyozására, így az alkalmazás finomhangolására. Ennek kutatása, módszerének kidolgozása hosszú tesztelést követel, de a jövőben érdemes lehet foglalkozni vele.

A tapasztalatok összegzéseként elmondható, hogy sikerült egy olyan alkalmazást fejleszteni, ami új nowcasting módszerként támogathatja a Hungarocontrol Repülésmeteorológiai csoportjának ködelőrejelző munkáját, hozzájárulhat Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtér gazdaságos és biztonságos üzemeltetéséhez.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetemet szeretném kifejezni mindazoknak, akik valamilyen formában hozzájárultak diplomamunkám elkészüléséhez. Mindenekelőtt szeretném megköszönni témavezetőm, Kardos Péter munkáját, segítségét a kezdetektől egészen a teljes dolgozat elkészültéig. Köszönettel tartozom tanszéki konzulenseimnek, Dr. Matyasovszky Istvánnak, hogy mindig szakított rám időt és hasznos ötletekkel látott el, valamint Soósné dr. Dezső Zsuzsannának, aki vállalta a dolgozatom menedzselését Matyasovszky Tanár Úr halálát követően. Köszönöm Tuba Zoltánnak, hogy rendelkezésemre bocsátotta a témában eddig elért kutatásainak anyagát. Köszönöm a Hungarocontrol Repülésmeteorológiai csoportjának, hogy a nyári gyakorlat alatt segítették szakmai fejlődésemet. Továbbá köszönettel tartozom családomnak és barátaimnak, hogy támogattak és mellettem álltak az egyetemi éveim alatt, és a dolgozatom elkészítésében.

IRODALOMJEGYZÉK

- A. Dobek (2009): Auswertung von Nebel und Hochnebel, sowie Prognose mittels logistischer Regression für den Flughafen Wien – Schwechat, Wien
- Bjarne K. HANSEN (2000): Analog forecasting of ceiling and visibility using fuzzy sets, 2nd Conference on Artificial Intelligence, American Meteorological Society, 1-7.
- Bjarne K. HANSEN (2007): A Fuzzy Logic–Based Analog Forecasting System for Ceiling and Visibility. Weather Forecasting, Vol. 22, p.1319–1330.
- Cséki G. (2010): Inverziós helyzetek kialakulása a Kárpát-medencében
- Deák B. (2010): A látástávolság és a köd rövidtávú előrejelzésének lehetőségei
- F. Wantuch, Z. Bottyán, Z. Tuba and K. Hadobács (2013): Statistical methods and weather based decision making in meteorological support for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013 International Conference on, Atlanta p.203-207.
- G. F. Taylor (1941): Aeronautical Meteorology, Pitman Publishing Corporation, Chicago p.290-319.
- Götz G., Rákóczi F. (1981): A dinamikus meteorológia alapjai, Tankönyvkiadó, Budapest
- Háy Gy., (2006): Amit a repülésről tudni kell. Typotex Elektronikus Kiadó Kft., Budapest
- Makainé Császár Margit és Tóth Pál (1977): Szinoptikus meteorológia I-II. Tankönyvkiadó, Budapest
- Manfred Kurz (1977): Synoptische meteorologie, Deutscher Wetterdienst, Zentralamt, Offenbach am Main
- Nagy R. (2014): Új módszerek vizsgálata a légiforgalmi irányításban használatos, látástávolságra vonatkozó döntéstámogató célprognózisok készítésében a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtéren
- Péczy Gy. (1979): Éghajlat, Nemzeti tankönyvkiadó Rt., Szeged
- Repülőtéri rend M4-03 in Repülőtér Rendje (2012) Budapest
- Takács P. (2010): BP-Ferihegy Nemzetközi repülőtér szélviszonyainak vizsgálata, és szélelőrejelzési módszerek
- Tuba Z., Wantuch F., Bottyán Zs., Hadobács K., Jámor K. (2012): REPÜLÉSMETEOROLÓGIAI KLÍMA ADATOK FELHASZNÁLÁSÁNAK LEHETSÉGES ASPEKTUSAI PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐESZKÖZÖK (UAV-K) METEOROLÓGIAI TÁMOGATÁSÁBAN, Szolnoki Tudományos Közlemények XVI., Szolnok
- Wantuch F. és Sándor V. (2004): Repülésmeteorológia. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest
- Weidinger T. és Tasnádi P. (szerk.) (2007): Klasszikus dinamikus meteorológiai példatár, ELTE Eötvös kiadó, Budapest

ÁBRAJEGYZÉK

2.4. ábra Telítési gőznyomás - hőmérséklet görbe (vízfelszín felett) Saját szerkesztésű ábra. Forrás: Weidinger T. et al., 2007: Alapvető nedvességi karakterisztikák II.2.1. táblázat adatai alapján In: Klasszikus dinamikus meteorológiai példatár I. (szerk.: Weidinger T. és Tasnádi P.). ELTE Eötvös Kiadó, Budapest. 50. oldal

2.1. kép Köd a Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtéren. Forrás: <http://www.bevezetem.hu/cikk/megint-fennakadasokat-okoz-kod-liszt-ferenc-repuloteren> (letöltve: 2015.04.13 20:05)

2.5. kép A kisugrázsi köd keletkezése Forrás: https://www.ec.gc.ca/meteo-weather/279AC7ED-E09D-4E2A-A884-57321EA46B24/figure4b-2_en.jpg (letöltve: 2015.04.13 20:21)

2.3. kép Az áramlási köd kialakulása Forrás: http://www.hko.gov.hk/education/edu01met/wxphe/ele_water4seasons_e.htm (Letöltve: 2015.04.13 19:54)

2.1. táblázat A látva repülés és a műszerrepülés meteorológiai küszöbértékei Forrás: <http://vacchun.hu/es/vacchun-QRSv2.pdf> (letöltve: 2015.04.14. 23:50)

2.2. táblázat Nemzetközi műszeres repülés protokoll határértékei csökkent látástávolság esetén (Forrás: www.jeppesen.com)

2.3. táblázat Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtér LVP eljárásai (Forrás: Repülőtéri rend M4-03 melléklet)

3.1. táblázat Az ALMOS rendszer összetevői

3.3. ábra A mérőkertek és az RVR szenzorok elhelyezkedése, Forrás: Google Earth

4.1. ábra A csökkent látástávolság éves eloszlása (Saját ábra; adatforrás: ALMOS)

4.2. ábra A Köd előfordulásának napi eloszlása (Saját ábra; adatforrás: ALMOS)

4.3. ábra Kapcsolat a látástávolság, és a többi mért meteorológiai változó között. A vertikális tengelyen a hasonlóság mértékét jellemző korrelációs együttható szerepel. (Saját ábra; adatforrás: ALMOS)

4.4. ábra Tengerszintre átszámított légnyomás-értékek eloszlása csökkent látástávolság esetén (Saját ábra; adatforrás ALMOS)

4.5. ábra Hőmérséklet-kategóriák eloszlása csökkent látás esetén (Saját ábra; adatforrás: ALMOS)

4.6. ábra Szélsebesség-értékek eloszlása csökkent látástávolság esetén (Saját ábra; adatforrás: ALMOS)

4.7. ábra A szélirányok relatív gyakorisága csökkent látástávolság esetén (Saját ábra; adatforrás: ALMOS)

4.8. ábra A hőmérséklet változása a csökkent látástávolságú időszakot követő három órában (Saját ábra, adatforrás: ALMOS)

4.9. ábra Szélirányok relatív gyakorisága a csökkent látást követő órákban (Saját ábra, adatforrás: ALMOS)

5.1. ábra: A historikus hasonlóság alapján leghasonlóbbnak ítélt események az első megközelítésben létrejött rangsorban elfoglalt helyük szerinti eloszlása (Saját ábra)

5.3.1.1. ábra: Nagytérségű folyamatok bemutatása 2014.01.07-én 0:00 UTC és 06:00 UTC-kor (forrás: [wetter3.de /Archiv/](http://wetter3.de/Archiv/))

5.3.1.2. ábra: A harmatpont-deficit bemutatása 2014.01.07-én 0:00 UTC és 06:00 UTC-kor (forrás: [wetter3.de /Archiv/](http://wetter3.de/Archiv/))

5.3.1.1. táblázat: látástávolság alakulásának, és az analógiakereső program által készített előrejelzések, mértékegység: méter (Saját táblázat)

5.3.1.3. ábra: A látástávolság alakulásának, és az analógiakereső program által készített előrejelzés viszonya (Saját ábra)

5.3.1.4. táblázat: Négyzetes hiba alakulása az M1 és M2 metrikák futtatásakor az első esettanulmányban (Saját táblázat)

5.3.2.1. ábra: Nagytérségű folyamatok bemutatása 2014.11.01-én 0:00 UTC és 06:00 UTC-kor (forrás: wetter3.de /Archiv/)

5.3.2.2. ábra: A harmatpont-deficit bemutatása 2014.11.01-én 0:00 UTC és 06:00 UTC-kor (forrás: wetter3.de /Archiv/)

5.3.2.3. ábra: A látástávolság alakulásának, és az analógiakereső program által készített előrejelzés viszonya (Saját ábra)

5.3.2.1. táblázat: látástávolság alakulásának, és az analógiakereső program által készített előrejelzések, mértékegység: méter (Saját táblázat)

5.3.2.2. táblázat: Négyzetes hiba alakulása az M1 és M2 metrikák futtatásakor a második esettanulmányban (Saját táblázat)

5.3.3.1. ábra: Nagytérségű folyamatok bemutatása 2013.11.16-án 18:00 UTC-kor, és 2013.11.17-én 0:00 UTC és 06:00 UTC-kor (forrás: wetter3.de /Archiv/)

5.3.3.2. ábra: A harmatpont-deficit bemutatása 2013.11.16-án 18:00 UTC-kor, és 2013.11.17-én 0:00 UTC és 06:00 UTC-kor (forrás: wetter3.de /Archiv/)

5.3.3.3. ábra: A látástávolság alakulásának, és az analógiakereső program által készített előrejelzések viszonya (Saját ábra)

5.3.3.1. táblázat: látástávolság alakulásának, és az analógiakereső program által készített előrejelzések, mértékegység: méter (Saját táblázat)

5.3.3.2. táblázat: Négyzetes hiba alakulása az M1 és M2 metrikák futtatásakor a harmadik esettanulmányban (Saját ábra)

FÜGGELÉK

2.2. táblázat Nemzetközi műszeres repülés protokoll határértékei csökkent látástávolság esetén (Forrás: www.jeppesen.com)

Kategória	RVR/Felhőzet	Decision height	Elkülönítés (tengeri mérőföldben)
LVP I / CAT I	1200 m \geq RVR > 550 m VAGY Base \leq 300 ft	Legfeljebb 200 ft	3nm
LVP II / CAT II	550 m \geq RVR > 350 m VAGY Ceiling \leq 200 ft	200 ft alatt, de legfeljebb 100 ft	5nm
CAT IA	550 m \geq RVR > 350 m	100 alatt	7 nm
LVPIII / CAT IIB	550 m \geq RVR > 350 m	50 ft alatt	
CAT IIIC	Nincs korlátozás	Nincs korlátozás	

A FUZZY-LOGIKÁN ALAPULÓ M_1 LEGEGYSZERŰBB HASONLÓSÁGI METRIKA SQL LEKÉRDEZÉSBE FOGLALVA:

```
SELECT almos.id, almos.date, almos.13R_Mor, almos.13R_RVRav10,
almos.13R_Dav2,almos.13R_Sav2, almos.13R_Ta, almos.13R_Tdp, almos.13R_QFE,
almos.13R_RH, ref.date, ref.13R_Dav2, ref.13R_Sav2, ref.13R_Ta, ref.13R_Tdp,
ref.13R_QFE, ref.13R_RH,
```

```
1-abs(sin((dayofyear(almos.date)-dayofyear(ref.date))*2*pi()/365))+1-
abs(sin((time_to_sec(time(almos.date))-
time_to_sec(time(ref.date)))*2*pi()/86400))+abs(almos.13R_Ta-
ref.13R_Ta)+abs(almos.13R_Tdp-ref.13R_Tdp)+abs(almos.13R_QFE-
ref.13R_QFE)+abs(almos.13R_Sav2-ref.13R_Sav2)+1-
0.5*(1+cos(pi()*(almos.13R_Dav2-ref.13R_Dav2)/180))) as m1
```

FROM almos, ref

ORDER BY

1-abs(sin((dayofyear(almos.date)-dayofyear(ref.date))*2*pi()/365))+1-
abs(sin((time_to_sec(time(almos.date))-
time_to_sec(time(ref.date)))*2*pi()/86400))+abs(almos.13R_Ta-
ref.13R_Ta)+abs(almos.13R_Tdp-ref.13R_Tdp)+abs(almos.13R_QFE-
ref.13R_QFE)+abs(almos.13R_Sav2-ref.13R_Sav2)+0.5*(1+cos(pi)*(almos.13R_Dav2-
ref.13R_Dav2)/180)) limit 20

A fenti metrika húsz, a PC-n futó webszerver testdb adatbázisában levő ref elnevezésű referencia adatbázisban meghatározott paraméter értékekhez leghasonlóbb paraméter értékekkel jellemezhető időpontot keres az almos elnevezésű táblában. A vizsgált változók éven belüli dátum-, napon belüli időpont-, szélirány-, szélesség-, hőmérséklet-, harmatpont-, QFE nyomás- és relatív nedvesség szerinti hasonlóságot vesz figyelembe, és az eredmények listázása esetén az parciális hasonlóság értékek összegének nagysága alapján helyezi növekvő sorrendbe (a legkisebb a leghasonlóbb).

AZ ELSŐ ESETTANULMÁNYHOZ TARTOZÓ TELJES CIKK:

Ma reggel az Austrian Airlines Bécs-Budapest járata tanácstalanul körözött egyet leszállás előtt, majd a pilóták és a személyzet úgy döntöttek: túl sűrű a köd, inkább nem kockáztatják a leszállást. Szerencsére ez nem okozott akkora nehézséget, egyszerűen visszamentek Bécsbe. (S emiatt a reggeli Budapest-Bécs járat is kimaradt, hisz ez lett volna a gép visszaútja.)

Ám az, hogy az Austrian Airlines feleslegesen járatta meg egyik gépét, s a több száz ember bosszankodott elmaradt megbeszélések és felborult tervek miatt, csak egy kézzelfogható módja annak, miként okoz gazdasági károkat az országot lassan hetek óta időről időre betakaró köd, mindannyiunk közös láthatatlanná tévő varázsköpenye.

Ködesetek

Meglehetősen nehéz lenne forintra pontosan kiszámolni, hogy az elmúlt hetei mekkora károkat okoztak- Lehet tudni, hogy ilyenkor több a közúti baleset, de a Magyar Biztosítók Szövetsége, a Központi Statisztikai Hivatal és a rendőrség sem vezet erről külön statisztikát.

„Egyértelműen több ilyenkor a baleset, a veszély megsokszorozódik” – fogalmaz Pausz Ferenc közlekedésrendészeti szakértő. Kimondottan a köd miatt alakult ki például a nyolcvanas években egy tömegszerencsétlenség az M1/M7 közös szakaszán. Több mint 200 autó ment egymásnak a reggeli csúcsforgalomban, mert valaki rosszul igazította a látási viszonyokhoz a követési távolságát. Szerencsére senki sem ment annyira gyorsan, hogy halálos áldozat lett volna.

Köd, alkony

Bár a ködös baleseteket homály fedi, azzal kapcsolatban vannak adatok, hogy korlátozott látási viszonyok (alkonyat, éjszaka) között mi jellemzi a baleseteket. Az adatok zöme a teherforgalomból származik, mivel a kamionok a menetidejük legalább ötödét éjszaka, üres utakon teszik meg.

Ignác Ferenc gépészmérnök a teherfuvarozók rossz látási viszonyok között bekövetkezett baleseteit vizsgálva azt találta 4363 európai baleset adatai alapján, hogy azok 15 százaléka következett be akkor, amikor nem lehetett jól látni.

Ködveszély

A rossz időjárásban vezetés a legnagyobb veszélyt az állatokra jelenti: a normálisnál húszonötször nagyobb az esélye annak, hogy a kamion elcsap egy őzet, kutyát, macskát, rókát. A gyalogosoknak is érdemes vigyázniuk, mert 14-szer olyan valószínű, hogy elütik őket. Ötször olyan valószínű, hogy a kamion sofőrje elveszíti a járműje feletti uralmat, vagy kicsúszik az útról, s háromszor olyan valószínű, hogy felborul, mint egyébként. A kerékpárosok sincsenek biztonságban: másfélszer akkora a kockázata, hogy elütik őket – és ehhez képest nem sokkal maradnak le a frontális karambolok.

Ködszezon

Az elemzésből az is kiderül: kamionos karambolok egyik legjelemezőbb – és könnyen orvosolható oka – hogy nincsenek eléggé kivilágítva. Az öreg reflektorok például kevésbé világítanak, de ezt lehet azzal kompenzálni, ha a konténer élei is fénylenek. Így kevésbé valószínű, hogy oldalról vagy hátulról beleszalad egy személygépkocsi a lassú kamionba.

A rossz láthatóság miatt bekövetkező baleset 56 százaléka a négy téli hónapban következik be – ez nem is csoda, ha figyelembe vesszük, hogy januárban például átlagosan a nap fele számít ilyennek.

Ködbér

Ám ha nem történik semmilyen baleset, akkor is a fuvaroscégek járnak a legrosszabbul a köddel. Ugyanis, mint Bende Zoltán, a Magyar Közúti Fuvarozók Egyesületének a tanácstitkára lapunknak elmondta, kiszámíthatatlanná válik a ködfoltok miatt, hogy amelyik kamion mikorra ér hova.

„Ma már nagyon szűkek a rakodási ablakok – és ha nem ér oda időben a sofőr, akkor fizetheti a cég a kötbért ügyfelének” – jegyzi meg. Ezen kívül az is probléma, hogy a lassú haladástól függetlenül meg kell állni a sofőröknek az uniós szabályzás rendje szerint – tehát alapvetően 4,5 óránként pihenniük kell, s 9 óránál többet nem vezethetnek egy nap. S ha nagy a köd, akkor az értékes vezetési idő alatt kevés utat lehet megtenni. Ehhez adódnak hozzá a járulékos problémák, mint hogy a gyakoribb balesetek miatt dugók alakulnak ki, kerülőket kell tenni.

Miért van mostanában mindig köd?

Minden télen szokott köd lenni egyszer-egyszer, ám akit a munkában érint az időjárás, jól tudja: mostanában azért a szokásosnál mintha jóval sűrűbben és sűrűbb lenne a köd. A san-franciscói Golden Gate híd esetében megszokott, hogy egyik végéről nem látni el a másikig, de a Lánchíd nem épp erről híres.

Pátkai Zsolt, az Országos Meteorológiai Szolgálat sajtóügyelete szerint a mostani köd nem feltétlenül különleges, benne van az időjárási paklinkban.

Az elmúlt két hétben rajtunk ülő vattaszőnyeg egyébként egy összeurópai időjárási jelenség része: erős viharciklonok voltak az Atlanti-óceán felett, s ez szállított sok nedves – és viszonylag meleg – levegőt Európa fölé.

Ez a meleg és nedves levegő aztán megül a Kárpát-medencében, ha nem hajtja ki innen a szél. Erre azonban leghamarabb a hétvégén van esély, amikor egy erős hidegfront érkezik majd.

Köddé váló környezetszennyezés

Összességében az elmúlt évtizedekben ritkább lett a köd egész Európában. Ugyanis a levegőben koncentrálódó szennyező anyagok elősegítik a köd kialakulását, az utóbbi évtizedekben viszont az egész kontinensen szigorítottak a környezetvédelmi előírásokon,

például szűrővel szerelték fel a legnagyobb kén-dioxid-kibocsátónak számító széntüzelésű erőművek kéményeit.

A légszennyezettség csökkenésével párhuzamosan három évtized alatt az évenkénti átlag húszról tízre csökkent az olyan napok száma, amelyeken két kilométernél kisebb a látótávolság. A ködmentes és tisztább levegő a kutatók szerint 10-20 százalékban járulhatott hozzá a kontinens klímájának melegedéséhez. Kelet-Európában ez az arány elérhette az 50 százalékot.

A kutatók szerint Európa levegője a jövőben nem fog olyan ütemben tisztulni, mint a hetvenes évek óta eltelt időszakban. A mérési adatok is erre utalnak, azt mutatják, hogy az ezredforduló óta lelassult a ködös napok ritkulásának folyamata. "Arra számítunk, hogy a levegő minősége és a látási körülmények kisebb mértékben javulnak majd, mint eddig, ez viszont valószínűleg a felmelegedés folyamatát is fékezni fogja" - mondta Robert Vautard kutatásvezető, a Francia Atomenergia Bizottság (AEC) munkatársa.

(forrás: <http://budapestlight.hu/cikk.php?id=4716> **letöltve:2014.08.21**)