

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet,
Meteorológiai Tanszék

A globálsugárzás előrejelezhetőségének vizsgálata műholdas adatok alapján

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Kordás Nóra

Meteorológus MSc, Előrejelző szakirány

Témavezetők:

Nagy Zoltán és Gróbné Szenyán Ildikó

Országos Meteorológiai Szolgálat

Konzulens:

Dr. habil Weidinger Tamás

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2017

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	3
1.1	Célok és elvárások.....	4
2	Sugárzás és felhőzet	6
2.1	Sugárzási komponensek, egyenlegek, a relatív globálsugárzás	6
2.2	Felhőfajok és sugárzás módosító hatásuk	10
3	Felhőzet és globálsugárzás előrejelzés	15
3.1	Külföldi kutatások.....	15
3.2	Hazai kutatások	23
4	Felhasznált műholdas adatok	26
4.1	Felhőtípus kép	27
4.2	Nagyfelbontású szélmező.....	29
5	A kidolgozott eljárás	31
5.1	A felhő kép áthelyezése.....	31
5.2	Áthelyezés verifikálása: verifikációs indexek, alkalmazásuk, értékeik	33
6	Eredmények bemutatása	43
6.1	Eredmények szemléltetése	44
6.2	Nyári félév futtatásinak eredményei	46
6.3	A nyári félév futtatásainak eredményei a szélsébség függvényében	49
6.4	Esettanulmányok	53
7	Összegzés	58
8	Köszönetnyilvánítás	59
9	Irodalomjegyzék	60

1 Bevezetés

A napsugárzás a Föld-légkör rendszer külső határán – csillagászati okokból – jellegzetes évi és napi menettel rendelkezik. A Föld adott pontján, adott időpontban mért besugárzást emellett jelentősen befolyásolja a légkör állapota (pl.: aeroszol tartalom, felhőzet) vagyis az aktuális időjárás is. Például egy nyári napon, délben is erősen csökkenhet a globálsugárzás, ha a nagytérségű, mezo- vagy lokális hatások következtében megjelenik, megnövekszik a felhőzet, intenzív csapadékhullás illetve zivatar-tevékenység formálódik.

A korszerű műszerek (pl.: felhőalap mérők, látástávolság mérők, égboltkamerák) ma már lehetővé teszi a pontos és részletes földfelszíni felhőzeti megfigyeléseket. A felszíni mérések csak a mérési hely környezetét reprezentálják, így pusztán e mérések alapján nehéz felismerni és meghatározni a – az akár több száz kilométeres kiterjedésű, összetett (mezoskálájú) – felhőzeti rendszereket. Így a meteorológiai folyamatok analízisében szükségessé válik a – főként geostacionárius – műholdadatok felhasználása. A geostacionárius műholdak gyakori mérései részletes információt szolgáltatnak a légkör aktuális állapotáról, a felhözetről, valamint a Föld felszínéről (*Cano et al., 1986; Hammer et al., 2002*) (pl.: a Meteosat-10 15 percnként készít műholdképet az alacsony és a közepes földrajzi szélességeken 1–3 km-es maximális felbontással [1 – EUMETSAT honlap]). A műholdas információt a meteorológia számos területén felhasználják, mind operatív (pl.: előrejelzés, veszélyjelzés) mind kutatási céllal (pl.: agrometeorológiai, városklíma és sugárzás előrejelzési vizsgálatokban).

Diplomamunkámban az európai meteorológiai műholdas méréseket koordináló EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites – Meteorológiai Műholdak Hasznosításának Európai Szervezete) egyik második generációs műholdjának (Meteosat-10) adatai alapján előállított felhőtípus képeket (cloud type – ct kép) és nagyfelbontású szélmezőket (high resolution wind, hrw szélmező) használok fel. E műholdas adatokból kiindulva, „egyfajta kísérleti modellezést” végezve, vizsgálom a globálsugárzás ultrarövidtávú (3 órás) előrejelezhetőségét. Már e bevezetésben kiemelem, hogy dolgozatomban előrejelezhetőséget vizsgálok, és nem előrejelzéseket készítek, illetve nem egy meglévő eljárás megbízhatóságát, pontosságát ellenőrzöm. Arra a kérdésre keresem a választ, hogy egyszerű feltételezésekből kiindulva, előrejelezhető-e a globálsugárzást erősen befolyásoló felhőzet.

Dolgozatomban előbb a felhőzet és a sugárzás témakörök fő fogalmait, majd az őket vizsgáló módszertant mutatom be. Ezt követi a felhasznált műholdas adatok és az alkalmazott módszerek ismertetése, végül az eredmények elemzése.

1.1 Célok és elvárások

Napjainkban egyre jobban növekszik mind a lakó- és középületeken lévő napelemek, mind a naperőművek (azaz a fotovoltikus erőművek) jelentősége. A fotovoltikus erőművek a globálsugárzás előrejelzések egyik első számú felhasználói; ez alapján készítik az energiatermelési előrejelzéseiket (szakkifejezéssel menetrendjeiket) (*Mátrai Erőmű ZRt. munkatársainak szóbeli közlése*). A naperőművek (mint energiatermelők és értékesítők) számára az 1/2016 (I. 27.) NFM (Nemzeti Fejlesztési Minisztérium) rendelet írja elő a menetrend leadás időbeosztását. A rendelet szerint az erőműveknek (többek között) negyed órás időbeli felbontásban, egy adott napon délelőtt 10 óráig kell, a következő napi termelési előrejelzést leadni a Befogadó (az energia elosztás adott szereplője) részére [2. – MAVIR termelési terv]. A leadott menetrenden, a nap folyamán bármikor lehet változtatni, minimum 3 órával a változtatás által érintett időszak megkezdése előtt (*Kincses, 2017*). A 389/2007. (XII. 23.) kormányrendelet kimondja, hogy „Ha a szélerőmű, naperőmű vagy 5 MW-nál kisebb névleges teljesítőképességű vízerőmű esetében az engedélyes KÁT (Kötelező Átviteli Tarifa) termelő által az adott napon ténylegesen értékesített villamos energia mennyisége +/-50%-nál nagyobb mértékben tér el az utolsó érvényes menetrend alapján az adott napra összesített villamosenergia-mennyiségtől, akkor a KÁT termelő az 50%-os korlát feletti eltérés minden kWh-jára 5 Ft szabályozási pótdíjat köteles fizetni az adott hónapra a Befogadónak.” [3 – MAVIR dokumentum1]. Fontos kiemelni, hogy az iménti kormányrendeletet módosították, így 2018. 07. 01.-től a napi menetrendtől negyed órás időegységekben vett termelés eltéréseken alapul és változik a pótdíjak mértéke (pl.: ha az aktuális menetrendjénél kevesebb energiát termel az erőmű, akkor a hiányzó energia – gazdasági és műszaki mutatók alapján számolt – árát kell majd kifizetnie) [4 – MAVIR dokumentum2].

Jelenleg az Országos Meteorológiai Szolgálat (továbbiakban OMSZ) az AROME előrejelzési modellt (*Szintai et al., 2014*) eredményeinek utófeldolgozásával előállított globálsugárzás előrejelzéseket szolgáltatja a Mátrai Erőmű ZRt. számára (*Szűcs Mihály, OMSZ, szóbeli közlése*). E szolgáltatás keretében a 2,5 x 2,5 km térbeli felbontású modell, 00 UTC futtatásainak, 15 perces időbeli felbontású, 48 órás globálsugárzás előrejelzéseikhez jut hozzá a Mátrai Erőmű ZRt. (*Szűcs Mihály, OMSZ, szóbeli közlése*). A 15 perces globálsugárzás

összegekből tevődik össze a napi globálsugárzás (MW/nap) összege. Ahogyan láthattuk a jelenlegi napi termelési összegek helyett a következő év júliusától a 15 perces termelési összegeket veszi figyelembe a szabályozás. Így szükséges a globálsugárzás előrejelzések fejlesztése, a modellek mellett például műholdas adatokból kiinduló nowcasting (ultrarövidtávú, tehát néhány órás előrejelzési) technikák lehetőségeinek megismerése. E technikák – az időjárás előrejelző modellekhez képest – jóval kisebb számítási kapacitást és számítási időt igényelnek (*Guillot et al., 2011*).

Diplomamunkám készítése során, témavezetőim segítségével, egy műholdas adatokon alapuló, egyszerű nowcasting technika algoritmusát dolgoztam ki. Ezen algoritmussal a felhőzet megmaradási hajlamát vizsgáltam, a felhőzet áthelyeződése során. Főként a felhőzet határozza meg a felszínre érkező globálsugárzás mennyiségét. Így a felhőzet áthelyeződése közbeni megmaradási hajlama esetén érdemes, analóg módon a sugárzási mező áthelyeződését vizsgálni.

Munkám célja tehát egy műholdas adatokból kiinduló nowcasting technikával a felhőzet áthelyeződésének vizsgálata. Áthelyeződés közbeni megmaradási hajlam számszerűsítése elősegítheti a tervezési szakaszban lévő, előrejelzési célú globálsugárzás mérő hálózat optimális kialakítását a Mátrai Erőmű térségében. A távlati célok között szerepel ultrarövidtávú globálsugárzás előrejelzések készítése mért sugárzási adatok, illetve további műholdas mérések és nowcasting technikák alkalmazásával.

2 Sugárzás és felhőzet

E fejezetben ismertetem a légköri sugárzástan fő elemeit: a rövid- és hosszuhullámú sugárzási mérleg komponenseket (pl.: a direkt, a diffúz és a globálsugárzást); valamint a relatív globálsugárzás meghatározását. Külön alfejezetben foglalkozom a sugárzást jelentősen befolyásoló felhőfajokkal (pl.: a cumulonimbus, a nimbostratus és a stratocumulus felhőfajokkal) és megemlítem a felhőkhöz kapcsolódó, műholdak által is használt paramétereket (pl.: fényességi hőmérséklet, optikai mélység).

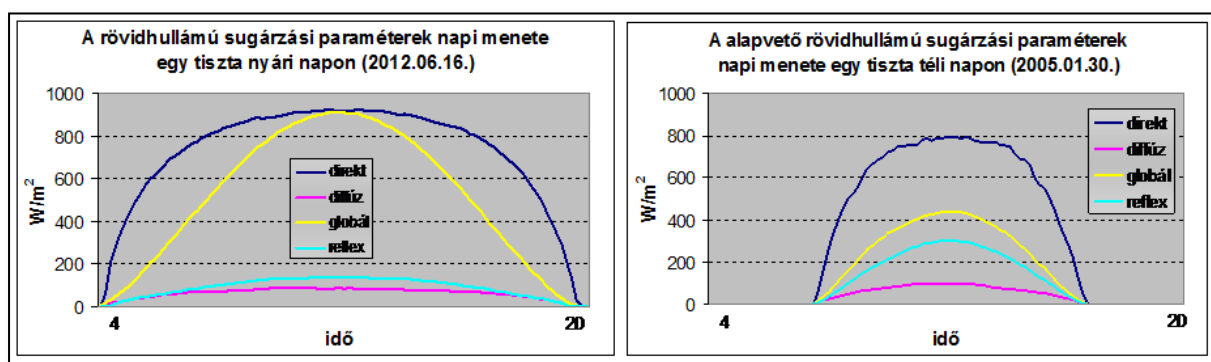
2.1 Sugárzási komponensek, egyenlegek, a relatív globálsugárzás

A Napból a Földre érkező elektromágneses sugárzás (99%-ának) hullámhossza $4\ \mu\text{m}$ alatti, azaz megállapodás szerint a napsugárzást rövidhullámú sugárzásnak tekintjük. A Föld légkörében a gázok, aeroszol részecskék és a felhőzet hatására a napsugárzás egy része elnyelődik, egy része visszaverődik a világűr felé, egy másik része pedig szóródik. Ezért célszerű elkülöníteni a napsugárzás egyes komponenseit, azaz a reflex (visszavert), a direkt, a diffúz (szórt) és az utóbbi kettő alapján megadható globálsugárzást. A földfelszín $4\ \mu\text{m}$ -t meghaladó, hosszuhullámú (infravörös, IR) sugárzást bocsát ki (Stefan-Boltzmann-törvény, lásd még a Planck-függvényt és a Wien-törvényt is a sugárzástani alapismeretek közül). A hosszuhullámú sugárzási mérleg két komponense a felszíni kisugárzás és a légköri visszasugárzás [5 – Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek jegyzet].

Direkt vagy közvetlen sugárzás definíció szerint „a Nap korongjának térszögéből a Nap irányára merőlegesen álló felületre belépő rövidhullámú sugárzás”. A direkt sugárzással szemben a diffúz vagy szórt sugárzás alatt a vízszintes felszínre, a felső féltérből, nem a napkorong irányából érkező, rövidhullámú sugarak összességét értjük [5 – Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek jegyzet]. Megkülönböztetjük a Rayleigh- és a Mie-szórást: ha a szóró részecske átmérője jóval kisebb, mint a sugárzás hullámhossza (pl.: a légköri gázmolekulák esetén), akkor Rayleigh-szórásról beszélünk (a szórás erőssége fordítottan arányos a hullámhossz negyedik hatványával); ha a szóró részecske átmérője jelentősen meghaladja a sugárzás hullámhosszát (pl.: felhőelemek esetében) akkor Mie szórás következik be. Itt a szórás erőssége fordítottan arányos a hullámhossz 1,3-ik hatványával. [6 – Légköri sugárzástan jegyzet]. A globálsugárzás a direkt (a sík felszínre jutó rész) és a diffúz sugárzás összegét jelenti, más megfogalmazásban a globálsugárzás a „vízszintes síkra a felső féltérből érkező összes rövidhullámú sugárzás” [5 – Meteorológiai műszerek és

mérőrendszerek jegyzet]. Derült égből és tiszta, száraz levegő esetén, a direkt sugárzás adja a globálsugárzás nagy részét ($\approx 90\%$ -át). Ha megnövekszik a légköri szennyező anyagok koncentrációja, a vízgőz mennyisége illetve a felhőzet, akkor a direkt sugárzás csökken, a szórt sugárzás nő. Zárt felhőzet (és szennyezett légkör) esetén, a diffúz sugárzás határozza meg a globálsugárzást (Nagy, 2014).

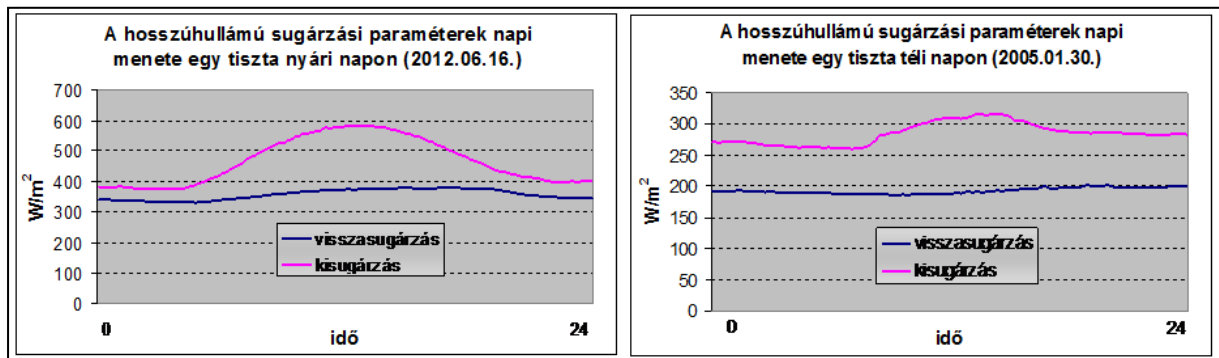
A reflex (visszavert) sugárzás definíció szerint „a vízszintes síkra az alsó féltérből érkező rövidhullámú sugárzás” [5 – Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek jegyzet]. Az 1. ábra, az imént ismertetett komponensek, jellegzetes nyári és téli napi menetét mutatja be derült, felhőmentes égből esetén. Az 1. ábra és az ábrát tartalmazó könyv (Juhász et al., 2009) szerint, nyáron (a nap járásához igazított, szoláris időt tekintve) hajnal 4 és este 8 óra között, 0-tól különböző a sugárzási komponensek értéke, a direkt és a globálsugárzás maximumát 900 W/m^2 , a diffúz és a reflex sugárzás maximumát 100 W/m^2 körülire teszi. A jobb oldali ábra alapján, télen közelítőleg reggel 7 és este 5 óra között nagyobbak 0-nál a rövidhullámú sugárzási komponensek értékei. A direkt sugárzás értéke $\approx 800 \text{ W/m}^2$ -re (meglepően nagy érték), a globálsugárzás értéke $\approx 400 \text{ W/m}^2$ -re csökken. Megjegyezzük, hogy a direkt sugárzás a Napra merőleges síkra eső sugárzás és télen alacsonyan delel a Nap. A reflex komponens értéke $\approx 300 \text{ W/m}^2$ -re nőhet (nagy az albedó, ami havas felszínre utal). Az iménti sugárzási időintervallumokat igyekeztem figyelembe venni a későbbiekben bemutatott számításaim időpontjainak kiválasztásánál is.



1. ábra: Rövidhullámú sugárzási komponensek (paraméterek) napi menete nyáron és télen (Juhász et al., 2009)

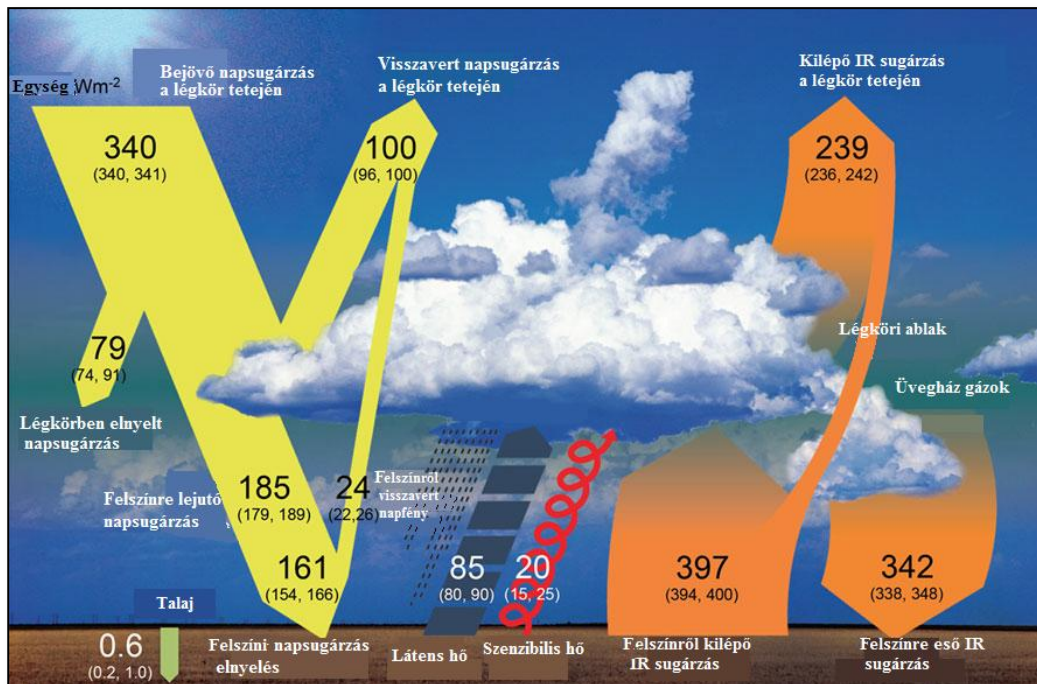
Megállapodás szerint kisugárzásnak az alsó féltérből (gyakorlatilag a földfelszínről) érkező hosszuhullámú sugárzás összességét nevezzük. A földfelszínről kilépő hosszuhullámú sugárzást a légkör (gyakran a felhők) visszaverik. Légköri visszasugárzás definíció szerint „a felső féltérből érkező összes hosszuhullámú sugárzás” [5 – Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek jegyzet]. A 2. ábra az előbbi két hosszuhullámú komponens napi menetét

szemléleti egy derült, tiszta nyári és téli nap során. Az ábra szerint a kisugárzás nyári maximuma $\approx 600 \text{ W/m}^2$. A visszasugárzás $\approx 400 \text{ W/m}^2$ -es maximuma szintén nyáron mérhető.



2. ábra: Hosszúhullámú sugárzási mérleg komponensek napi menete nyáron és télen (Juhász et al., 2009)

A rövidhullámú sugárzási egyenleget „a globálsugárzás és a reflex sugárzás különbsége” -ként, a hosszúhullámú sugárzási egyenleget „a légköri visszasugárzás és a kisugárzás különbsége” -ként, míg a nettó sugárzási egyenleget a „rövid-és hosszúhullámú sugárzási egyenlegek összege” -ként értelmezzük [5 – Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek jegyzet]. A következőkben (Wild et al., 2012) cikke, ábrája alapján mutatom be Föld energiaháztartását, benne a sugárzási mérleg komponensek mellett a latens és a szenzibilis hőárammal, illetve a felszínre/vízbe jutó hőárammal együtt évi skálán.



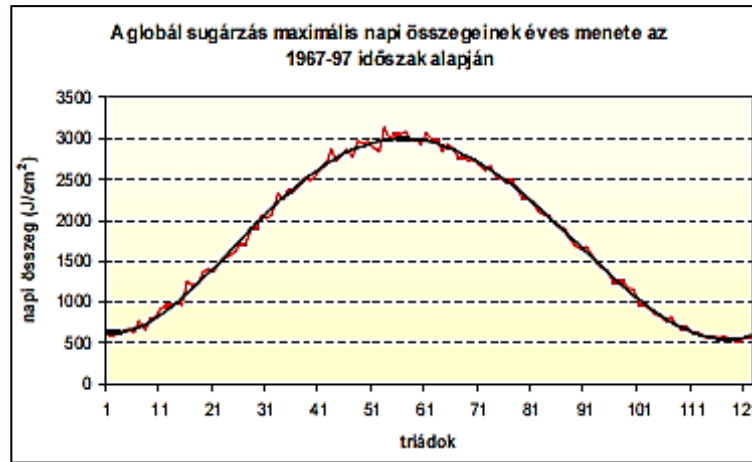
3. ábra: A Föld energiamérlege (Wild et al. 2012)

A 3. ábrán szereplő számok az egyes energiamérleg összetevők W/m^2 -ben kifejezett energia értékei, a zárójelben lévő számok a bizonytalansági tartományt adják meg (Wild et al., 2012). A következőkben előbb a légkör tetejére, a légkörre, majd a földfelszínre vonatkozó értékeket ismertetem (Wild et al., 2012) alapján. A légkör tetején $340 W/m^2$ a Napból érkező (direkt) sugárzás. A „másik irányban” $100 W/m^2$ a légkör (főként a felhőzet) által visszavert rövidhullámú (reflex) sugárzás és $239 W/m^2$ földi kisugárzásból származó hosszuhullámú (IR) sugárzás. (Ne feledjük, hogy itt az energiamérleg komponenseket a Föld felszínének $1 m^2$ -ére vetítjük.) (Wild et al., 2012) cikke szerint a légkör $79 W/m^2$ rövidhullámú sugárzási energiát nyel el, valamint a földfelszínről a légkörbe érkezik $20 W/m^2$ nagyságú szenzibilis (érzékkelhető) és a $85 W/m^2$ - látens hő (talaj, növény és vízfelszínről származó nedvességszállításhoz (evapotranspiráció) szükséges fázisátalakulási hő). A földfelszínre $161 W/m^2$ napsugárzás (globálsugárzás), $342 W/m^2$ (felhőzet, aeroszol részecskék és legfőképpen az üvegházhatású gázok okozta) hosszuhullámú légköri visszasugárzás érkezik ábrájuk szerint.

A globálsugárzás jellegzetes éves menettel rendelkezik, így ha dátumtól függetlenül szeretnék vizsgálni a napi összeget, akkor egy normált értéket kell bevezetnünk. Az (1) összefüggés a (Nagy et al., 2015) által definiált relatív globálsugárzás normált értéket adja meg:

$$\text{Normált érték} = \text{aktuális napi összeg} / \text{lehetséges napi összeg} \quad (1)$$

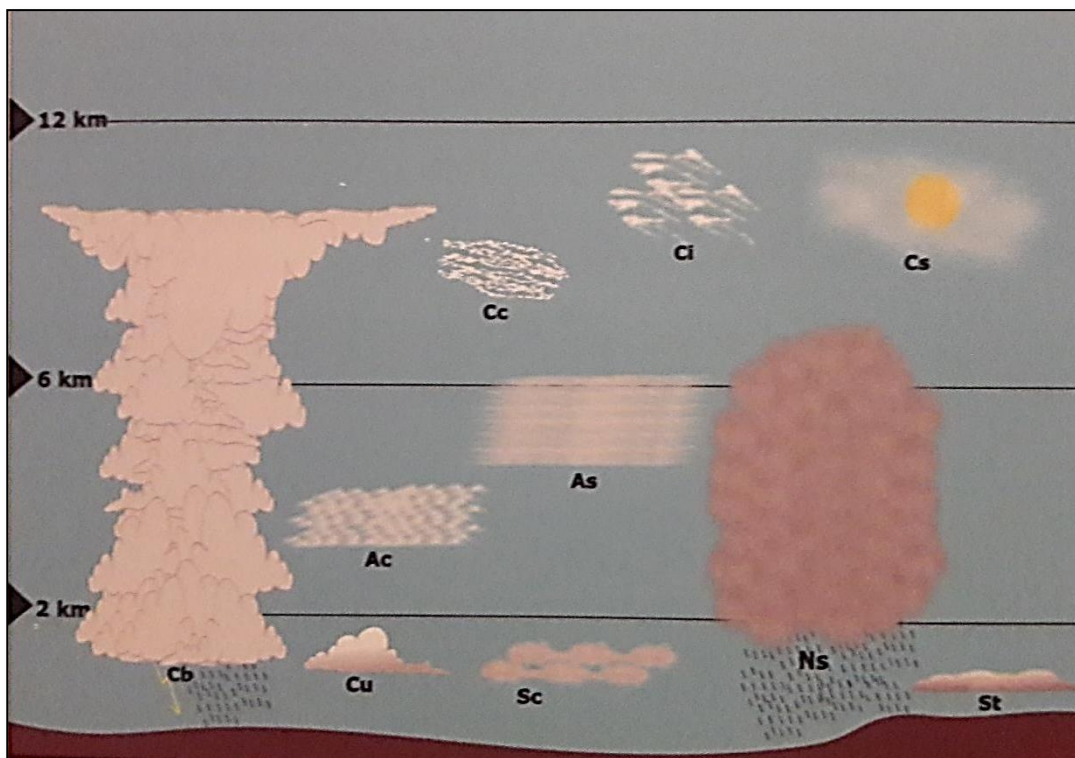
Az *aktuális napi összeg*, a felszíni globálsugárzás 10 percenként mért átlagos értékeinek napi (24 órás) összegével egyenlő. A *lehetséges napi összeg* megállapításához (Nagy, 2014) egy 30 éves időszak budapesti globálsugárzás adatsorát használta fel. Ezen időszakra órás globálsugárzás összegek voltak elérhetőek. Egy évet 3 napos periódusokra (triádokra) bontva vizsgált, minden óras összeg esetén 3 x 30 értékből kiválasztotta a legmagasabbat (azaz 90 db óras összeg maximumát). Ezen óras összegek maximumértékéből interpolálással 10 perces összegeket képzett. Ezáltal szoláris időben reggel 4 és este 8 óra közötti időszakra 96 db 10 perces összeget kapott, melyek az adott triád egy napjára vonatkoztak. E 10 perces értékekből napi összegeket számolt. Így előállította az év 122 triádjára vonatkozó lehetséges napi összeg értékeket, melyeket a 4. ábrán mutatok be:



4. ábra: A Globálsugárzás lehetséges napi összegeinek évi menete (Nagy *et al.*, 2015)

2.2 Felhőfajok és sugárzás módosító hatásuk

Általánosan a felhőalap magasság, illetve szerkezet alapján soroljuk felhőfajokba a különböző felhőket. Felhőalap magasság szerint megkülönböztetünk alacsonyszintű (azaz két km-nél kisebb felhőalapú), középszintű (azaz kettő és hat km közötti felhőalapú) és magas szintű (azaz hat km-nél magasabban lévő felhőalapú) felhőket. A két km-nél alacsonyabb felhőalappal és hat km-nél magasabb felhőtetővel rendelkező felhőket nevezzük nagy függőleges kiterjedésű felhőknek. Szerkezetük szerint elkülöníthetjük a réteges (stratus) és a gomolyos (cumulus) felhőket. Az iméntiknek és az 5. ábrának megfelelően, tíz felhőfajba rendezhetjük a felhőket (Kolláth *et al.*, 2017).



5. ábra: A tíz felhőfaj sematikus képe (Kolláth et al., 2017)

A magasszintű felhők közé tartozik a cirrus (Ci, pelyhelyfelhő); a cirrocumulus (Cc, bárányfelhő) és a cirrostratus (Cs, fátyolfelhő). Mindhárom felhőfaj jellemzően vékony (csekély vertikális kiterjedésű) és főként csak részben borítja be az égboltot. Gyakran alakul ki légköroptikai jelenség (például halo) a környezetükben (Kolláth et al., 2017).

Az altocumulust (Ac, párnafelhő) és altostratust (As, lepelfelhő) soroljuk a középszintű felhők közé. Az eddig bemutatott felhőfajokhoz képest az altocumulus felhők (a fehéres helyett) sötétebb, szürkés színűek, jelentősen vastagabbak. Légköroptikai jelenségek helyett csapadékhullás jellemzi őket (Kolláth et al., 2017).

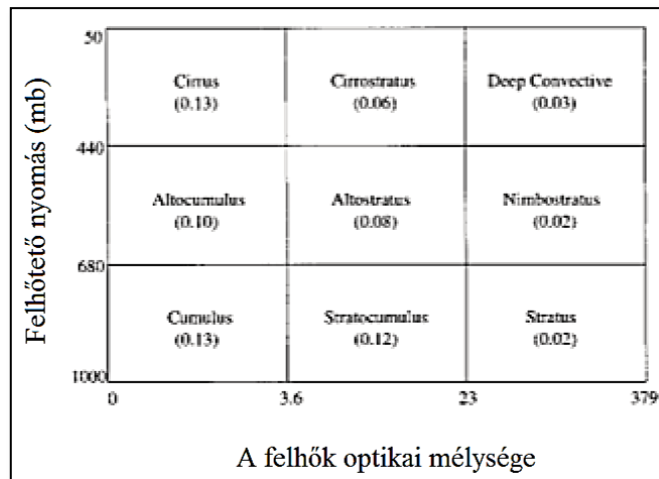
A stratocumulus (Sc, réteges gomolyfelhő), a stratus (St, rétegfelhő) és a cumulus (Cu, gomolyfelhő) az alacsonyszintű felhőfajok. A stratus felhőzet jellegzetessége, hogy ködképződéshez kapcsolódik a kialakulása. A cumulus felhőzet főleg nyáron különálló „gomolyok” formájában jelenik meg, így kevésbé befolyásolja a földfelszínre érkező napsugárzást (Kolláth et al., 2017).

A nimbostratus (Ns, esőrétegfelhő) és a cumulonimbus (Cb, zivatarfelhő) a nagy vertikális kiterjedésű felhők. A nimbostratus egyenletes vastag szürke felhő, melyre csapadékhullás és napsugárzás elnyelés jellemző. A cumulonimbus felhők megjelenése fejlődésük során jelentősen változik: kezdetben fehéres színű és a hasonlít a cumulusra; fejlett

fázisban horizontálisan és vertikálisan is jelentős kiterjedésű szürkés, feketés felhő (Kolláth *et al.*, 2017).

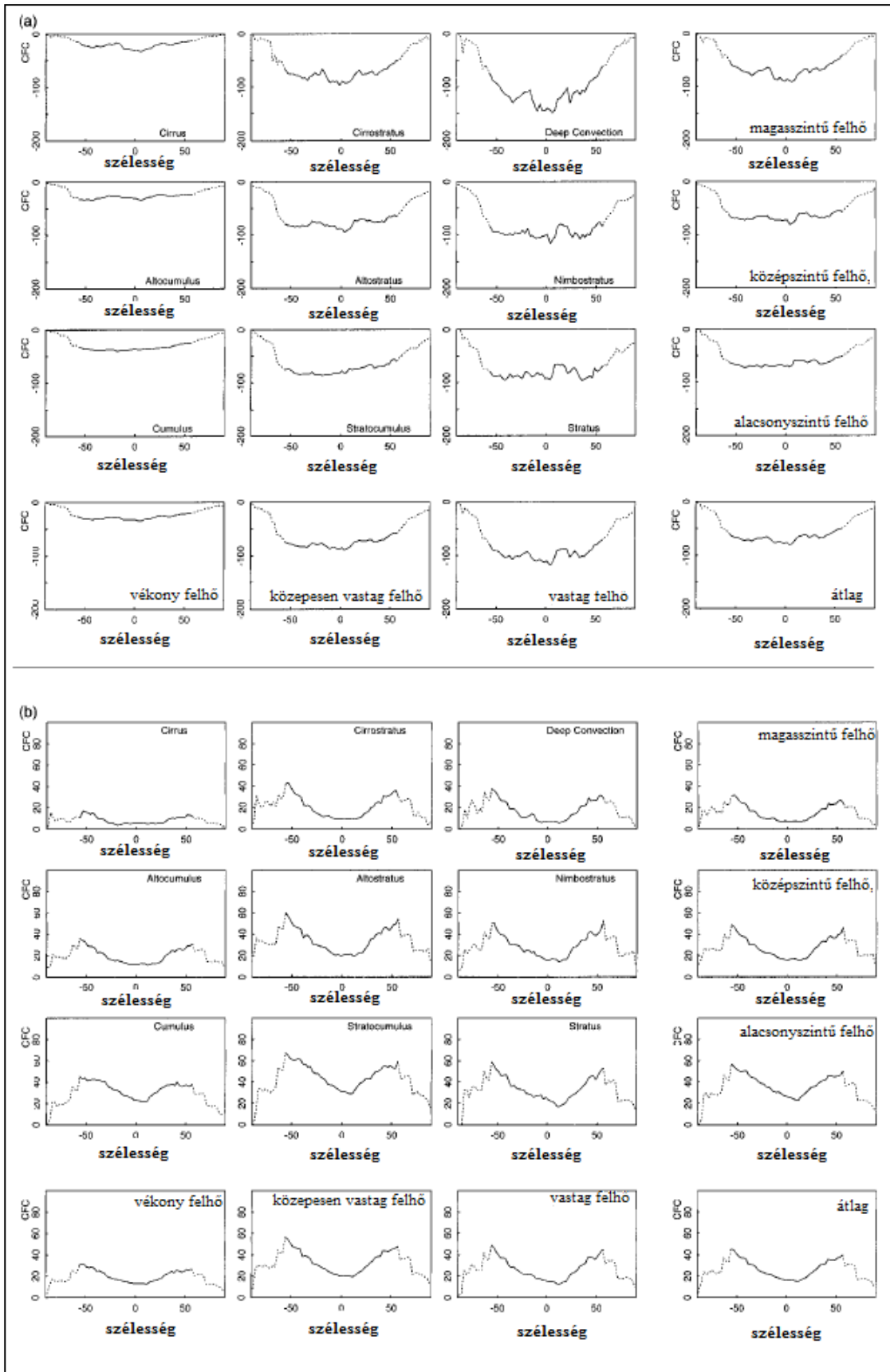
A magasszintű vagy magas szinten keletkező felhők jégkristályokból, jégtűkből állnak. Itt a léghőmérséklet $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál alacsonyabb (Megjegyezzük, hogy $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál alacsonyabb hőmérsékleten már nem lehet túlhűlt víz). A magasság csökkenésével a hőmérséklet nő (feltéve, hogy nincs inverzió a légkörben), így a közép- és az alacsonyszintű felhőket döntően túlhűlt vízcseppek, felhőcseppek alkotják (Kolláth *et al.*, 2017). A cirrocumulus felhőzet visszaveri, a cirrus és a cirrostratus nagyobb részt átereszt a rá eső rövidhullámú sugárzást, (mivel egyik magasszintű felhő sem sugárzáselnyelő) így a magasszintű felhők fényességi hőmérséklete alacsony. Az alacsonyszintű felhők és a derült (hó és jégmentes) felszínnek, a beérkező napsugárzás jelentős hányadát elnyelik, így magas a fényességi hőmérsékletük és kicsi a reflektanciájuk. A fényességi hőmérséklet és a reflektancia mellett az optikai mélység (más néven optikai vastagság) alapján különítik el a műholdak a földfelszín és a felhőzetet [7 – EUMETSAT felhő produktum leírás]. Az optikai mélység általánosan az adott közegen áthaladó sugárzás gyengülésének mértékét írja le. A közeg alapján megkülönböztetjük a gázok és az aeroszolok optikai mélységét, sugárzást gyengítő folyamat alapján abszorpciós (azaz elnyelési) és szórás optikai mélységről beszélhetünk (Tóth, 2009).

A következőkben (Chen *et al.*, 1999) munkája alapján ismertetem a különböző felhőfajok sugárzás módosító hatását. Az ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project tükörfordításban Nemzetközi Műholdas Felhő Klimatológiai Projekt) műholdas mérési eredményeiből indultak ki, s a 6. ábrán is látható módon a felhőzet nyomás és optikai mélység adatai alapján 9 felhőfajt különböztettek meg. A NASA/GISS (National Aeronautics and Space Administration/Goddard Institute for Space Studies, Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal/Goddard Űrtudományi Intézet) sugárzásátviteli modelljével számították ki, a rövidhullámú, és a hosszuhullámú sugárzási komponensek aktuális értékeit a légkör tetejére, a légkörre és a földfelszínre vonatkoztatva. A tiszta (azaz a felhőmentes) égbolt, az aktuális (azaz több felhőfajból álló) felhőzet, valamint az egyes felhőfajok esetén, külön-külön megvizsgálták a modellszámítások eredményeit. A felhők sugárzásmódosító hatásának jellemzésére a CFC („cloud-induced radiative flux change” tükörfordításban „felhőzet keltette sugárzásáram változás”) értéket használták. A W/m^2 -ben kifejezett CFC negatív értékei hűtő, pozitív értékei fűtő hatást jeleznek cikkükben.



6. ábra: Felhőfajok (*Chen et al., 1999*) tanulmányában
 (A felhőfajok nevei alatti számok egy öt éves időszak alatt mért, globális mennyiségüket jellemzik.) A Deep Convective (azaz a mély konvekciós) felhők a cumulonimbus azaz a zivatarfelhőket jelenti [8 – NASA Earth Observatory honlap]

Feltételezve, hogy az egyes esetekben a kilenc felhőfaj (*Chen et al., 1999* osztályozása szerint – ami nem azonos az 5. ábrán bemutatottal) egyike borítja be teljesen az égboltot, a rövid- és a hosszuhullámú sugárzási komponensek esetén, felhőfajonként és a földrajzi szélesség függvényében, a földfelszínre vonatkoztatva, mutatja be a CFC eredményeiket a 7. ábra. A Napból érkező rövidhullámú sugárzást az egyes felhőfajok eltérő mértékben visszaverik vagy elnyelik így kevesebb sugárzás éri el a földfelszínt, ezáltal a felhők „hűtik” a földfelszínt. A 7. ábra fenti részén lévő kis képeken minél „alacsonyabban fut” egy felhőfaj CFC görbéje, annál nagyobb negatív CFC értékek jellemzik, tehát annál inkább „hűti” a földfelszínt. A legnagyobb negatív CFC értéket a cumulonimbus (azaz a mély konvekciós) helyzetek okozzák ($-118,6 \text{ W/m}^2$ globális évi átlagérték), őt a nimbostratus ($-98,2 \text{ W/m}^2$), majd stratus ($-88,1 \text{ W/m}^2$) értékei követték. A Föld által kibocsátott hosszuhullámú sugárzás egy részét, a felhők a földfelszín irányába verik vissza, ezáltal „melegítik” a földfelszínt. Az ábra lenti részén láthatók a hosszuhullámú sugárzási komponensekre vonatkozó CFC értékek, legnagyobb pozitív (azaz „fűtő” hatásra utaló) CFC értéket ($46,8 \text{ W/m}^2$ globális évi átlagérték), a stratocumulus felhőzet esetén tapasztaltak.



7. ábra: Négy napos átlag alapján számolt évi CFC értékek W/m^2 -ben a földfelszínre vonatkoztatva (Chen et al., 1999)

Az előzőket összefoglalva a felhők szórják, visszaverik vagy elnyelik a rájuk érkező napsugárzást és hosszúhullámú sugárzást. (*Chen et al., 1999*) cikke szerint a cumulonimbus, a nimbostratus, és a stratus felhők módosítják a leginkább felszínre érkező rövidhullámú sugárzás mennyiségét. A felhők hosszúhullámú sugárzás módosító hatását tekintve a (*Chen et al., 1999*) cikke alapján megállapítható, hogy a cikkben szereplő 9 felhőfaj közül a stratocumulus okozza a legnagyobb légköri visszasugárzást.

3 Felhőzet és globálsugárzás előrejelzés

E fejezetben a diplomamunkám szempontjából kiemeltem fontos külföldi kutatásokat, azaz Eric M. Guillot felhőzet előrejelzési tárgyú PhD dolgozatát és hozzá kapcsolódó cikkét (*Guillot, 2010; Guillot et al., 2011*); továbbá az oldenburgi egyetem (Carl von Ossietzky Universität Oldenburg) globálsugárzás előrejelzési kutatásait (*Hammer et al., 1999; Heinemann et al., 2004; Lorenz et al., 2004*) mutatom be. Ezt követően néhány hazai tanulmányt, például (*Nagy et al., 2015; Tóth et al., 2017*) ismertetek.

3.1 Külföldi kutatások

A következőkben (*Guillot et al., 2011*) katonai meteorológiai célú, felhőzet előrejelzésekkel foglalkozó tanulmányát mutatom be. A felhőzet állandóságát és elmozdulását vizsgálták, Utah és Wyoming államok hegységekkal és sivatagokkal borított, 400 x 500 km-es (cikkükben „domén”-nek nevezett) területe felett. A 2008-2009-es időszakban, a Terra és az Aqua (kvázipoláris) műholdak, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, Közepes Felbontású Képkalkító Spektroszkópia) érzékelőjének felhőzet adataiból és a Salt Lake City meteorológiai állomás rádiószondás szél adataiból indultak ki. Mindkét MODIS érzékelő 5 km-es felbontású felhő borítottság (felhő maszk) adatait használták fel. A Terra műhold adatai, ultrarövidtávú felhőzet előrejelzéseik kiindulópontját jelentették. A kvázipoláris műholdak pályáinak felszálló és leszálló ágai és a Föld forgása következtében, a vizsgált terület („domén”) felett a Terra műhold után 1,5 és 4,5 órával haladt át az Aqua műhold, így az Aqua méréseivel verifikálták előrejelzéseiket. Az előrejelzések időtartamát is az átvonulásokhoz igazították (azaz 1,5 és 4,5 órás felhőzet előrejelzéseket készítettek) (*Guillot et al., 2011*).

A szélvektorok számítása alapján 5 eltérő módszerrel és egy felhőzet klimatológián alapuló eljárással (cloud climatology method, CCC) készítettek felhőzet előrejelzéseket. Mivel

egy módszerük (terrain wind displace method TTM, tükörfordításban területi szél elmozdulási módszer) főként (a diplomamunkámhoz kevésbé kapcsolódó) sivatagok és a hegységek felhőzet módosító hatásaira fókuszál, így csak a másik 4, azaz a PM, az SWDM, a VWDM és az LWDM eljárásaikat mutatom be. A PM (persistence method, perzisztencia) módszer alkalmazásakor a felhőzet állandóságát feltételezték 1,5 illetve 4,5 órás előrejelzésük alatt. Az SWDM (700-mb wind displacement method, 700 hPa-os szél elmozdítás) módszer során, a szonda felszállások 750 és 650 hPa közötti szélesség és szélirány értékeit átlagolták, majd a kapott átlag szélvektorral „mozdították el”, a különböző magassági szinteken lévő felhőzetet. A VWDM (various wind displacement method, változó szélvektorral történő elmozdítás) módszer esetén, 950 hPa és 250 hPa között, 100 hPa-onként számoltak átlagos szélvektort, majd a felhőzet szintjének megfelelő átlagos szélvektorral „tölték azt el” (pl.: a 950 és 850 hPa közötti felhőzetet a 950 és a 850 hPa közötti átlagos szélvektorral „mozgatták”). Az LWDM (layer wind displace method, rétegenkénti szélességgel számolt elmozdítás módszer) alkalmazásakor a 750 hPa és a felhőzet szintje közötti magasságban elhelyezkedő szélvektorok átlagos értékével „mozgatták” a felhőzetet (Guillot et al., 2011).

A szélvektor (ok) meghatározását követően, a (2) és a (3) képleteket minden egyes felhő pontra (műholdképen a felhőzetet alkotó elemi területetre) kiszámítva „mozdították el” a felhőzetet:

$$\theta^* = \left(\frac{t*y}{111000} \right) + \theta \quad (2)$$

$$\lambda^* = \left[\frac{t*x}{111000*\cos(\theta)} \right] + \lambda \quad (3)$$

ahol θ a felhő pont kezdeti földrajzi szélessége, θ^* a felhő pont „elmozdításakor felvett” földrajzi szélessége, λ a kezdeti hosszúsága, λ^* az „elmozdításakor felvett” hosszúsága, t az adott terület felett a Terra és az Aqua műholdak áthaladása között eltelt idő, y a felhő pont észak-déli, x a kelet-nyugati irányú elmozdulása, 111 000 méter jelöli a földrajzi szélesség 1 fokos változását (Guillot et al., 2011).

		Megfigyelt				Megfigyelt	
		Igen	Nem			Igen	Nem
Előrejelzés	Igen	Találat	Téves Riasztás	Előrejelzés	Igen	Helyes Negatív	Hiány
	Nem	Hiány	Helyes Negatív		Nem	Téves Riasztás	Találat

8. ábra: A felhőzetet (bal oldalt) és a derült pontokat (jobb oldalt) elemző kontingencia táblázatok (Guillot et al., 2011) tanulmányában

A Terra műholdkép alapján készített (adott időpontra vonatkozó) elmozdított műholdképet, az adott időpontra vonatkozó valós Aqua műholdképpel vetették össze. Eredményeik kiértékeléséhez a 8. ábrán bemutatott kontingencia táblázatokat használták.

A bal oldali kontingencia táblázatban szereplő *Találat* (*T*) jelentése: adott pontban az Aqua és az elmozdított képen is van felhő, *Téves Riasztás* (*TR*) jelentése: csak az elmozdított képen van felhő az adott pontban, *Hiány* (*H*) jelentése: csak az Aqua képen van felhő az adott pontban, *Helyes Negatív* (*HN*) jelentése: egyik képen sincs felhő az adott pontban. Ezen kontingencia táblázattal a felhős pontok elmozdítását (azaz „előrejelzését”) értékelik. A jobb oldali kontingencia táblázat a bal oldali középpontosan tükrözött változata, mellyel derült pontok „előrejelzését” vizsgálják (az egyes elnevezéseknek azonos a jelentése a két kontingencia táblázat esetén). Ezen kontingencia táblázatokban szereplő egyes kategóriák (pl.: *Találat*) darabszámai alapján a következő kontingencia indexeket számolták ki, (alábbi képletek esetén *f index* jelöli a felhő, *d index* jelenti a derült területek vizsgálatát):

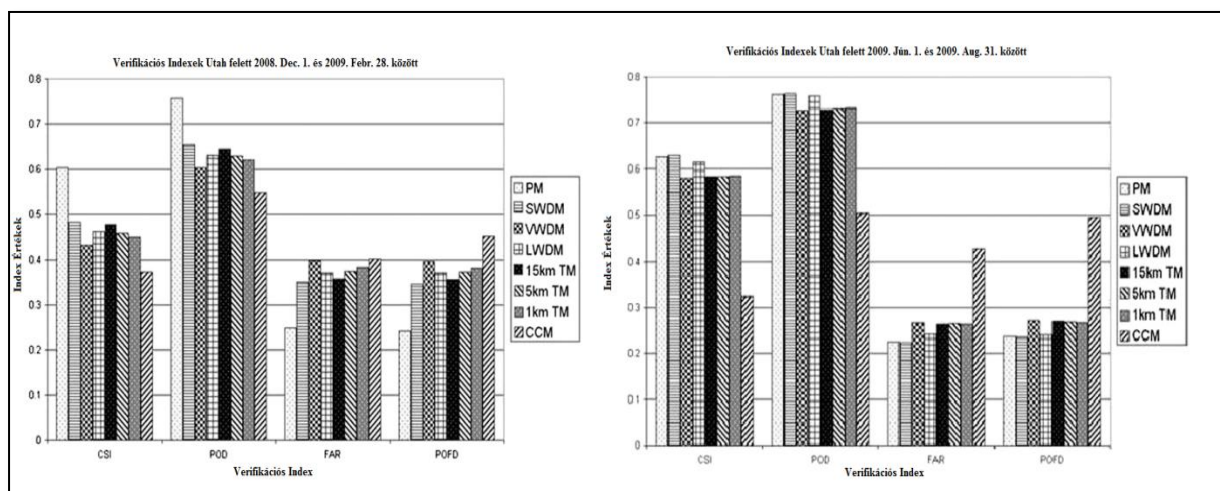
$$POD_f = \frac{T}{T+H} \quad , \quad POD_d = \frac{HN}{HN+TR} \quad (4a) , (4b)$$

$$PODF_f = \frac{TR}{TR+HN} \quad , \quad PODF_d = \frac{H}{H+TR} \quad (5a) , (5b)$$

$$FAR_f = \frac{TR}{H+TR} \quad , \quad FAR_d = \frac{H}{HN+H} \quad (6a) , (6b)$$

$$CSI_f = \frac{T}{T+H+TR} \quad , \quad CSI_d = \frac{TR}{HN+TR+H} \quad (7a) , (7b)$$

A *POD* (probability of detection) az észlelés valószínűsége index, a *POFD* (probability of false detection) a téves észlelés valószínűsége, a *FAR* (false alarm ratio) téves riasztások aránya index, a *CSI* (critical success index) kritikus sikertényező index (Ezen indexekről későbbi fejezetben még részletesebben írok, mert számításaim során alkalmaztam őket.) A kiszámított 4 x 2 index értéket átlagolva a *POD* és a *CSI* 0,5 feletti a *FAR* és a *POFD* 0,5 alatti értékei esetén tekintették „jó”-nak az előrejelzéseiket. (A teljességet szem előtt tartva megemlítendő, hogy a percentage of forecast correct, *PFC*, azaz helyes előrejelzések százaléka, és a true skill statistic, *TSS* azaz valós készség verifikációs indexeket is számították.) A 9. ábra a különböző szélvektor számítások (pl.: *PM*, *SWDM*) esetén kapott *CSI*, *POD*, *FAR*, *FODF* értékeiket mutatja be a téli (baloldal) és a nyári (jobboldal) időszakokra. Jól látható többek közt, hogy a *PM* és az *SWDM* módszer mindkét időszakban a kívánt (magas) értékeket adja, a *POD* és a *CSI* esetén.

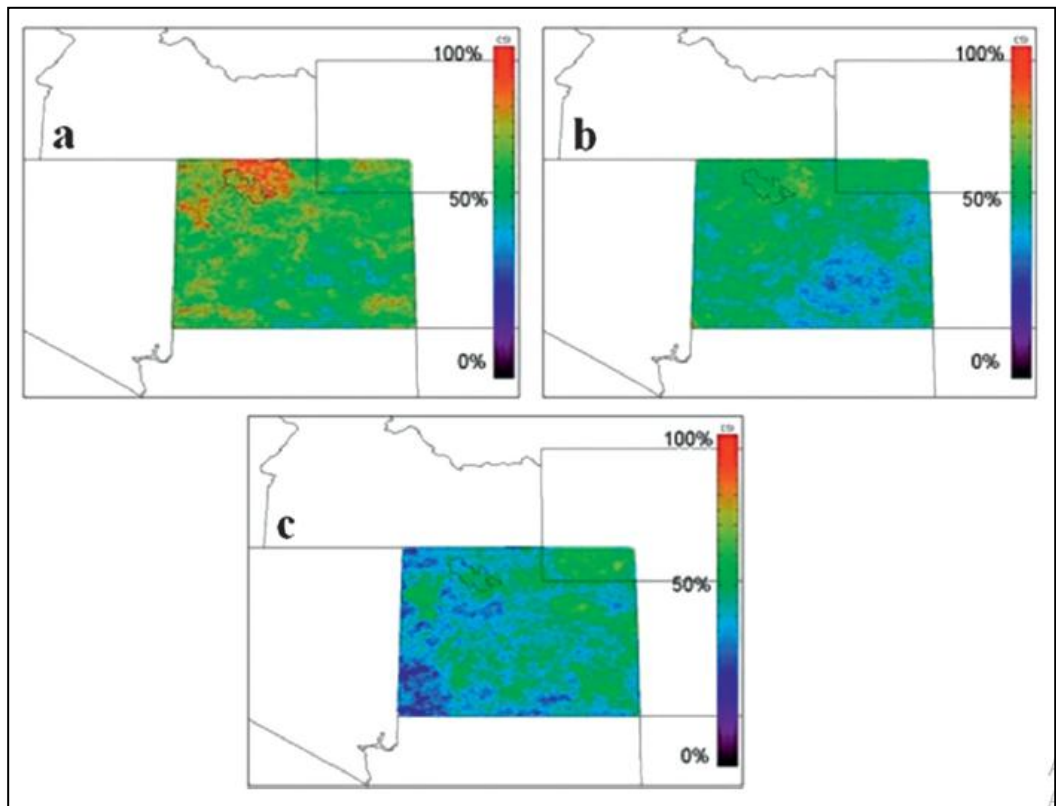


9. ábra: A téli (balra) és a nyári (jobbra) időszakok *CSI*, *POD*, *FAR* és *PODF* értékei (Guillot et al., 2011) tanulmányában

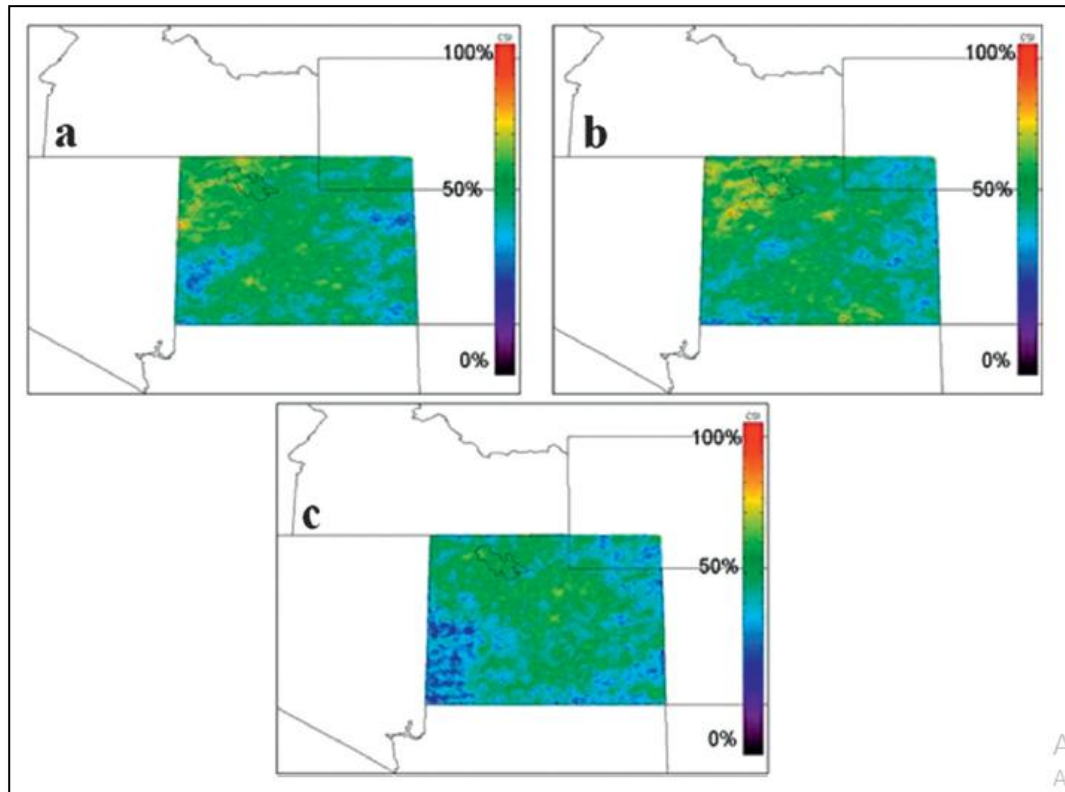
Előrejelzéseik jóságát regionálisan is vizsgálták: a „domént” kisebb területegységekre, „parcellákra” osztották, majd parcellánként kiszámolták a *CSI* értékét. Az így kapott eredményeket térképesen ábrázolták. Az alábbiakban e képek közül látható néhány (10. és 11. ábra).

A 0 és 1 közötti *CSI* értékeket 100-zal megszorozva százalékos *CSI* értékeket ábrázoltak. A fent lévő 10. ábra alapján, télen a felhőzet előrejelzését „jó”-nak találták (0,5 → 50% feletti *CSI* értékek), nyáron a felhőzet előrejelzését „gyengének” ítélték (0,5 → 50% alatti *CSI* értékek). Cikkükben hozzátették, hogy télen a felhős esetek

gyakoribbak, így a ritkább derült esetekben gyengébb eredményeket kaptak; míg nyáron a gyakoribb derült esetekre születtek jobb eredmények.

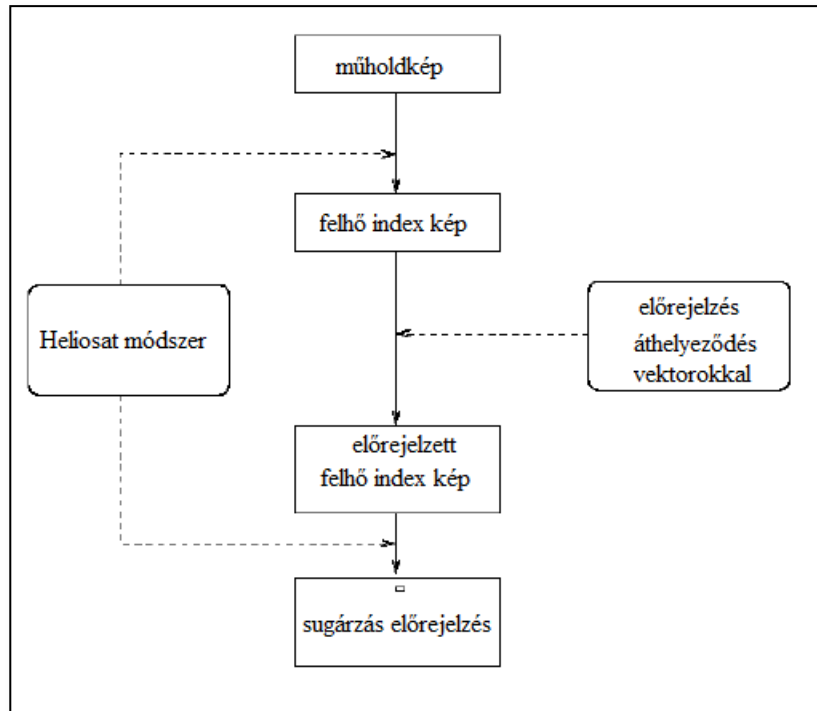


10. ábra: 2008. december – 2009. februári időszak felhős esetekre vonatkozó CSI értékek (Guillot *et al.*, 2011) tanulmányában



11. ábra: 2009. június – 2009. augusztus felhős eseteire vonatkozó CSI értékek
(Guillot et al., 2011) tanulmányában

A következőkben (Hammer et al., 1999; Heinemann et al., 2004; Lorenz et al., 2004) alapján ismertetem a műholdas adatokból kiinduló eljárást. Munkájuk során 30 perces időbeli, közelítőleg 2,5 x 3,5 km-es térbeli felbontású, látható tartományú, METEOSAT műholdképekből indultak ki. A Heliosat módszert (Hammer et al., 1999, lásd később részletesen), azaz a műholdas adatokból, felszínre érkező napsugárzást számító eljárást alkalmazva kiszámították a felhő indexet (mérőszám, amely jellemzi a felhők, felszínre érkező napsugárzás módosítását) értékeiket. Két időben egymást követő felhő index kép alapján meghatározták a légköri elmozdulás vektorokat. Az aktuális felhő indexek és mozgásvektorok ismeretében előrejelzett felhő index képet készítettek. Ezen előrejelzett felhő index kép alapján (szintén a Heliosat módszer segítségével) számították ki az előrejelzett globálsugárzás értékét. A globálsugárzás előrejelzés menetét a 12. ábra foglalja össze (Hammer et al., 1999; Heinemann et al., 2004; Lorenz et al., 2004).



12. ábra: A globálsugárzás előrejelzések folyamatábrája (Lorenz et al., 2004)

Az alábbiakban a Heliosat módszer főbb összefüggéseit (Hammer et al. 1999) cikke alapján ismertetem. Ezen eljárás során a műhold „nyers” adatait a nap zenit szögével normálják ezáltal előállítják a relatív reflektancia (azaz ρ) értékét. Szintén közvetlen műholdas adatokból számítják a felhők reflektanciáját (azaz a rövidhullámú sugárzás visszaverő képességét, ρ_{cl}) és a földfelszín albedóját (azaz rövidhullámú sugárzás visszaverő képességét, ρ_{gr}). A ρ , ρ_{cl} és ρ_{gr} értékekből a (8) és (9) képlettel határozzák meg a (felhők sugárzás módosító hatását leíró, n -nel jelölt) felhő indexet (Hammer et al., 1999).

$$\rho = n\rho_{cl} + (1 - n) \rho_{gr} \quad (8)$$

$$n = (\rho - \rho_{gr}) / (\rho_{cl} - \rho_{gr}) \quad (9)$$

A Heliosat módszer további kiemelkedő összefüggései közé tartozik a (10) egyenlet (Hammer et al., 1999).

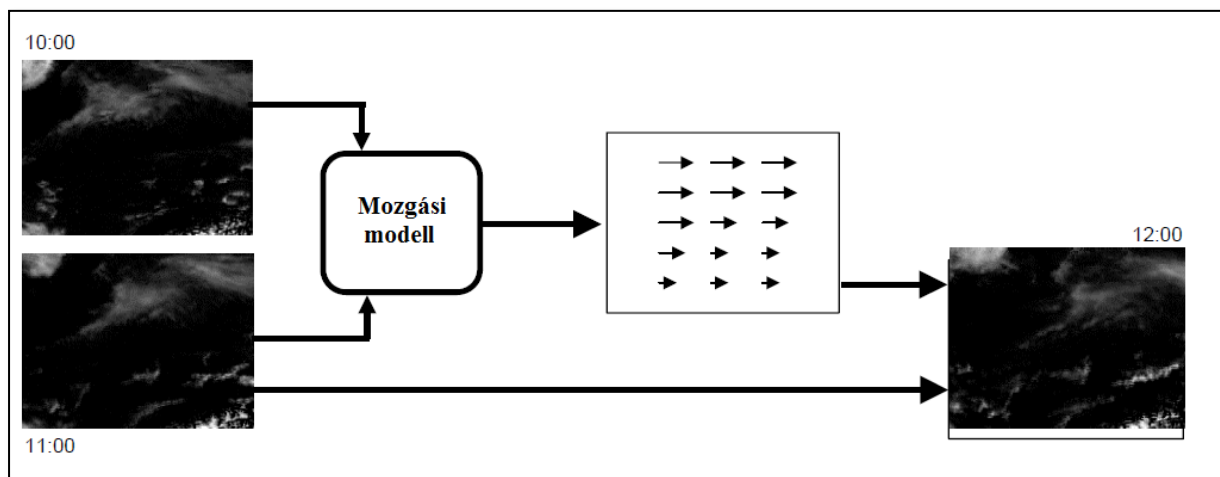
$$k^* = \frac{G}{G_{clear}} = 1 - n \quad (10)$$

ahol k^* a légköri átbocsátási együttható (melyet a szakirodalomban gyakran clear sky azaz tiszta égbolt indexnek neveznek), G a földfelszínre eső globálsugárzás, G_{clear} a derült égbolt esetén mérhető globálsugárzás. A fenti egyenlet (melyet gyakran a clear sky irradiance modell, azaz a tiszta égbolt sugárzási modell egyik fő összefüggéseként említenek) lineáris kapcsolatot feltételez a légköri átbocsátási együttható, a felhő index és a felszínre eső illetve a tiszta égbolt esetén mérhető globálsugárzás aránya között (Hammer et al., 1999).

Az említett globálsugárzás előrejelzési folyamatban a felhő index meghatározását az elmozdulás vektorok megállapítása követi. Az elmozdulás vektorokat a mozgási modell (angolul modell of motion) számítja ki. A mozgási modell két fő alapelve a következő:

- „A képpont intenzitása állandó marad a mozgás során.” (Hammer et al., 1999; Heinemann et al., 2004; Lorenz et al., 2004)
- „A mozgásvektor mező sima, tehát a szomszédos vektorok nagysága és iránya nem tér el jelentősen.” (Hammer et al., 1999; Heinemann et al., 2004; Lorenz et al., 2004).

A mozgásvektorok megállapítását és a velük készített felhő index kép áthelyezéseket (előrejelzéseket) a 13. ábra szemlélteti.



13. ábra: Mozgásvektorok meghatározása és a felhő index kép áthelyezése
(Heinemann et al., 2004)

Az áthelyezett felhő index képet binomiális és négyszögletes szűrőkkel simították, így küszöbölték ki a kisméretű, véletlenszerűen megjelenő felhők által keltett zajt (Lorenz et al., 2004).

Az alábbiakban (Heinemann et al., 2004) cikkben közölt eredményeiről írok néhány sort. Globálsugárzás előrejelzéseik eredményeit 8 felszíni mérőállomás, 31 x 45 km-es területre

interpolált értékeivel vetették össze. A relatív átlagos négyzetes hibát (angol rövidítéssel rel. rmse) tekintve értékelték a 6 órás globálsugárzás előrejelzések eredményét: 6 óra elteltével a perzisztencia (azaz állandóság feltételezése) alkalmazása esetén 0,5 feletti rel. rmse értéket kaptak, melyet az elmozdulás vektorok és a simítás alkalmazása 0,4-re csökkentett. A felhő index területi változékonyságának függvényében is vizsgálták eredményeiket: 0,025 alatti változékonyság esetén 6 óra elteltével $\approx 0,2$ relatív standard hiba értéket; míg 0,05 feletti változékonyság esetén $\approx 0,45$ relatív standard hiba értéket tapasztaltak. Továbbá megállapították, hogy nagyobb napmagasság esetén pontosabbak a globálsugárzás előrejelzéseik.

Azért tartom fontosnak az említett kutatások bemutatását, mert mindkettő (diplomamunkámhoz hasonlóan) műholdas adatokon alapul, továbbá Guillot kutatása módszertani szempontból is tartalmaz munkámhoz hasonló megoldásokat.

Guillot és az oldenburgi egyetem cikkei mellett még számos kiváló tanulmány született a felhőzet és a globálsugárzás előrejelzés témakörében, mint

- (*Chow et al., 2011*) és (*Chow 2015*) égboltkamerák adatain alapuló felhőzet előrejelzési munkája;
- statisztikai módszereken alapuló sugárzás előrejelzésekkel foglalkozó tanulmányok, köztük (*Tymvios et al., 2005; Chen et al., 2011; Huang et al., 2013; Voyant et al., 2013*);
- numerikus időjárás előrejelző modellekkel készített sugárzás előrejelzéseket vizsgáló cikkek (*Morcrette, 1991; Mathiesen és Kleissl, 2011; Perez et al., 2013*).

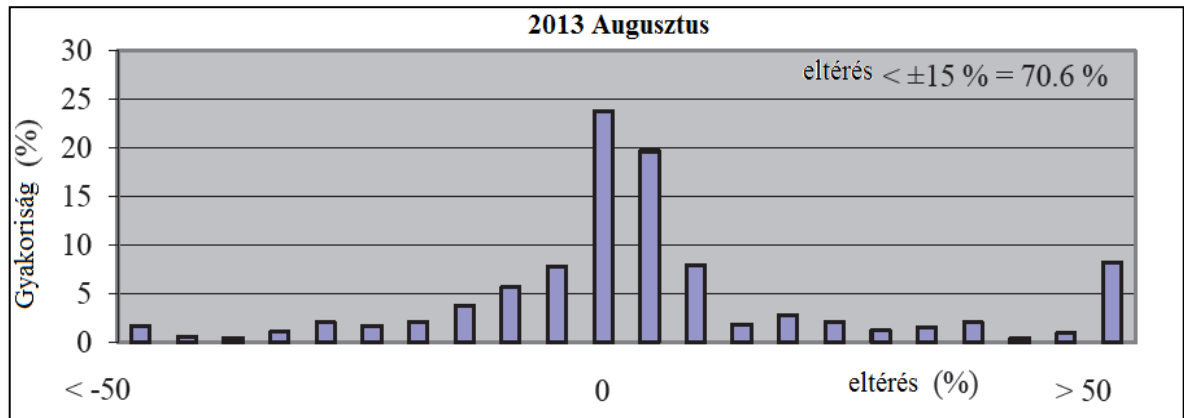
3.2 Hazai kutatások

Dolgozatom bevezető fejezetében már említettem, hogy az OMSZ az AROME modell globálsugárzás előrejelzéseit szolgáltatja a Mátrai Erőmű ZRt. számára. Felvetődhet a kérdés, hogy mennyire pontosak ezen előrejelzések. A következőkben e kérdésre válaszolva ismertetem (*Tóth et al., 2017*) tanulmányának egyes eredményeit. Munkájuk során az AROME modell eredményeit 19 OMSZ mérőállomás értékeivel vetették össze. Ezen összehasonlításokhoz a relatív hiba, RE (11) képletét használták fel:

$$RE = \frac{G_{FOR} - G_M}{G_M} 100 \quad (11)$$

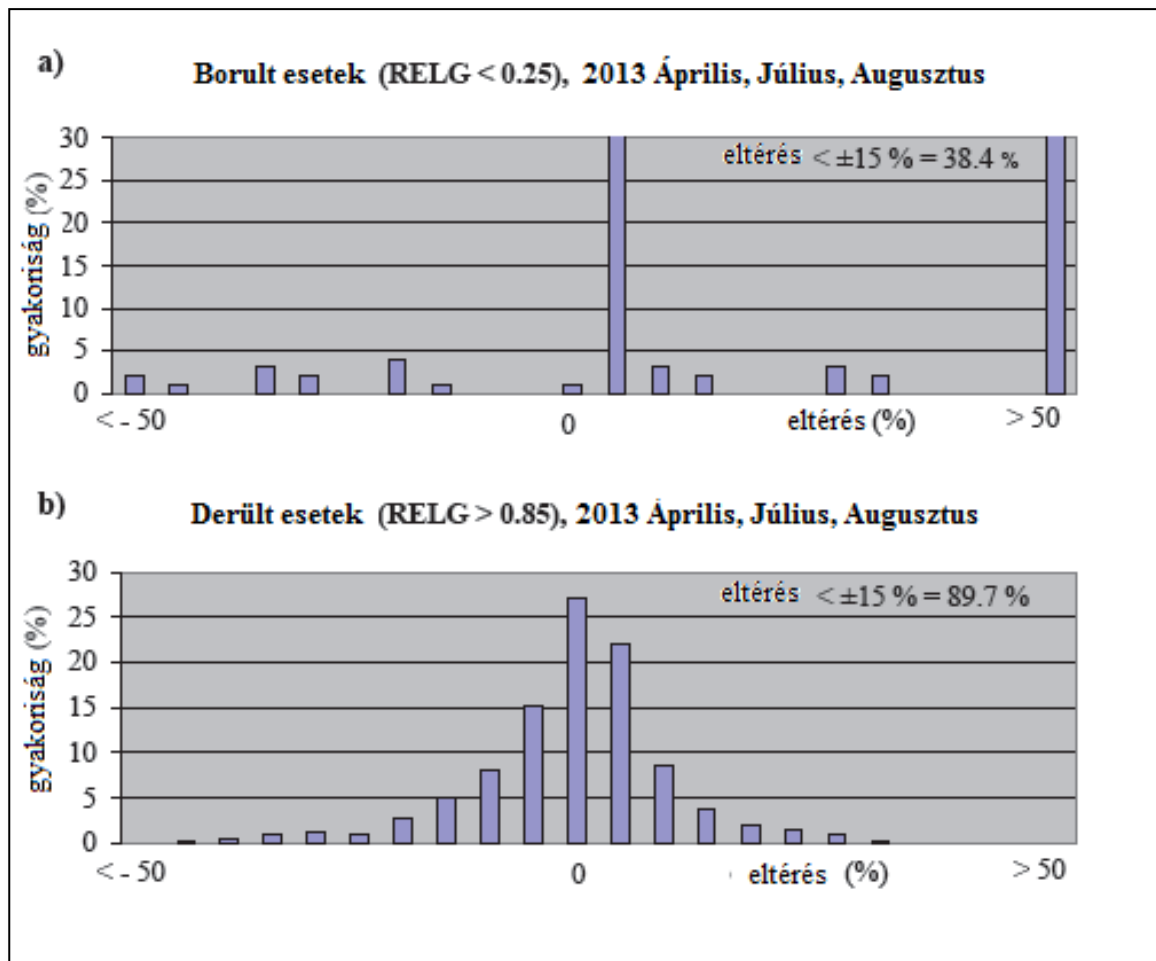
ahol G_{FOR} az előrejelzett G_M a mért globálsugárzás.

2013. április, június és augusztus hónapjára elemezték a napi és a fél napos globálsugárzás összegeket. Az alábbiakban a 2013. augusztusi napi sugárzási összegre kapott eredményeiket mutatjuk be. A 14. ábra alapján elmondható hogy a pontos előrejelzések (azaz $\pm 2,5\%$ -os eltérések) relatív gyakorisága a legmagasabb.



14. ábra: Az AROME modell és a mérések százalékos eltéréseinek gyakorisága (Tóth et al., 2017)

A Szerzők jelen dolgozat szempontjából is fontos elemzéseik közé tartozik (szintén napi összegek tekintetében) a derült és a borult égbolt melletti eltérések vizsgálata melyet a 15. ábra mutat be.



15. ábra: Borult (fent) és derült esetekben vett eltérések relatív gyakorisága (Tóth et al., 2017)

A 15. ábra szerint derült égbolt (azaz 0,85-nél nagyobb relatív globálsugárzás érték, RELG) mellett a pontos előrejelzés a leggyakoribb és az egyre nagyobb eltérések egyre ritkábban következnek be, míg borult égbolt (0,25-nél kisebb relatív globálsugárzás) esetén az 50%-ot meghaladó eltérések relatív gyakorisága már 25% feletti és nem tapasztalható szabályszerűség az eltérések gyakoriságában.

Megemlítenő továbbá (Nagy et al. 2015) munkája is, ahol a már említett relatív globálsugárzás időbeli változásait vizsgálva egyebek mellett az alábbi következtetésekre jutottak:

- „félórás átlagok tekintetében a következő fél órára vett megmaradási hajlam aránylag erős;” (Nagy et al., 2015)
- „az adott pont környezetére számított előző félórás átlag az adott pontban várható következő félórás átlag becslésében egyértelműen segít” (Nagy et al., 2015).

A fenti két idézet a perzisztencia alapján készített félórás globálsugárzás előrejelzések alkalmazhatóságát igazolta.

Megemlítendő továbbá az ELTE Meteorológiai Tanszékén született két dolgozat. (*Bán 2015*) szakdolgozatában energetikai célú globálsugárzás modellezéssel foglalkozott; (*Molnár 2015*) diplomamunkája komplex felszínek felett a rövidhullámú sugárzást modellezte.

4 Felhasznált műholdas adatok

A következőkben a diplomamunkám során felhasznált műholdas produktumokat ismertetem. Szó lesz a műholdakat fenntartó szervezetről, a műholdak egyik fő szenzorjáról a SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager, azaz Látható és Infravörös Leképező Berendezés) érzékelőről és a műhold produktumokat előállító algoritmusokról. Kiemelem, hogy a műholdas adatokat az OMSZ bocsátotta rendelkezésemre, amiért ezúton is köszönettel tartozom.

Európában az EUMETSAT üzemeltet geostacionárius és kvázipoláris meteorológiai műholdakat. Jelenleg az MSG műholdcsalád (Meteosat Second Generation – Második Generációs Geostacionárius Meteorológiai Műholdak), Meteosat-8, -9, -10 műholdjai szolgáltatnak információt. MÉR a MetOp kvázipoláris műholdcsalád A és B műholdja, valamint az óceánkutató Jason és Sentinel műhold [1 – EUMETSAT honlap]. A műholdak mellett az EUMETSAT jelentős földi bázissal (Ground Segment) rendelkezik, ami alatt a központi munkacsoportot és az egyes tudomány területeket koordináló munkacsoportokat (SAF, Satellite Application Facility) értjük. A munkacsoportok feladata a műholdas produktumok és szoftverek fejlesztése, amelyekkel a földfelszín, vagy az éghajlat megfigyelését, a nowcastingot illetve a numerikus időjárás előrejelzést támogatják [9 – OMSZ EUMETSAT ismertető].

Hazánk 2009 óta teljes jogú EUMETSAT tag, így hozzáfér a műholdak adataihoz valamint a munkacsoportok által kifejlesztett produktumokhoz és szoftverekhez. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál közvetlenül, antennák segítségével veszik, többek között a Meteosat-10 adatait. E műhold kiemelkedő műszerei közé tartozik a SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager, azaz Látható és Infravörös Leképező Berendezés), mely 15 perces mérési sorozatokkal állítja elő a fél Földgömbre vonatkozó adatokat. Nappal 11 darab, 3 km-es maximális felbontású és egy 1 km-es maximális felbontású csatornája érzékeli a Föld által visszavert rövidhullámú, illetve a kibocsátott hosszuhullámú sugárzást. Éjszaka 9 darab, szintén 3 km-es infravörös csatornájában méri a sugárzást. Az Országos

Meteorológiai Szolgálatnál a Meteosat-10 műhold mért értékeiből a Nowcasting munkacsoport az SAFNWC/MSG szoftver futtatásával készíti többek között a légtömeg, a zivatar, valamint a diplomamunkám során használt felhő típus és a nagy felbontású szélmező produktumokat [9 – OMSZ EUMETSAT ismertető].

4.1 Felhőtípus kép

A SAFNWC/MSG programcsomag GEO-CMA és GEO-CT algoritmusai készítik el a műholdképek felhőosztályozását. A műholdak által több csatornában (pl.: 3,8; 8,7; 10,8 μm -es hullámhosszúságú csatornában) mért fényességi hőmérséklet és visszavert napsugárzás (reflektancia) alapján a GEO-CMA algoritmus elkülöníti a derült és a felhős területeket. Ezt követően, a felhős területek esetén, a GEO-CT algoritmus határozza meg, hogy mely pontban milyen típusú felhőzet van [7 – EUMETSAT felhő produktum leírás].

A derült, hó és jégmentes szárazföldek, vízfelszínek elnyelik a beérkező rövidhullámú napsugárzás nagy részét, így reflektanciájuk alacsonyabb, (hőmérsékletük és ezáltal) fényességi hőmérsékletük magasabb, a felhőkhöz viszonyítva. A hóval, jéggel borított területek reflektanciája felül-, fényességi hőmérséklete alulmúlja, a hó és jégmentes területek értékeit. Nehéz elkülöníteni például az alacsony szintű (vízcseppekből álló „melegebb”) felhőzetet a hó és jégmentes felszíntől, valamint a magas szintű (jégtűkből álló) felhőket a jég és hó felszínektől. Így különböző hullámhosszúságú, műholdas csatornában mért fényességi hőmérséklet és reflektancia értékekre összehasonlító elemzések sorozatát végzi el a GEO-CMA algoritmus. Az alkalmazott csatornák, tesztek napszaktól (nappal, átmeneti időszak, éjszaka) és helyszíntől (szárazföld, vízfelszín) függenek. Az 1. táblázat, a szárazföldek esetén alkalmazott csatornákat, összehasonlításokat összegzi [7 – EUMETSAT felhő produktum leírás].

1. táblázat: A GEO-CMA algoritmus szárazföld/felhőzet elkülönítő eljárásai,
forrás: [7 - EUMETSAT felhő produktum leírás]

Nappal	Átmeneti időszak	Éjszaka
Hó azonosítás	Hó azonosítás	T10,8 μ m -T3,8 μ m
R0,6 μ m	R0,6 μ m	T10,8 μ m
T10,8 μ m	T10,8 μ m	T10,8 μ m -T12,0 μ m
T10,8 μ m-T12,0 μ m	T10,8 μ m-T12,0 μ m	T8,7 μ m-T10,8 μ m
T8,7 μ m-T10,8 μ m	T10,8 μ m-T3,8 μ m	T3,8 μ m-T10,8 μ m
T10,8 μ m-T3,8 μ m	T8,7 μ m-T10,8 μ m	Helyi térbeli szerkezet
T3,8 μ m-T10,8 μ m	T3,8 μ m-T10,8 μ m	T8,7 μ m-T3,8 μ m
Helyi térbeli szerkezet	Helyi térbeli szerkezet	
	T8,7 μ m-T3,8 μ m	

Például ha egy adott pixel esetén, a 10,8 μ m-es hullámhosszúságú csatornában mért fényességi hőmérséklet érték (T10,8 μ m) alacsonyabb, mint a (szárazföld vagy a tengerfelszín fényességi hőmérséklete alapján megállapított) határérték, akkor az adott pixelt felhőzet borítja. Természetesen emellett, ennél jóval összetettebb elemzéseket is végez a szoftver, azonban jelen dolgozat keretei között nincs lehetőség minden módszer részletes ismertetésére [7 – EUMETSAT felhő produktum leírás].

A felhőalap magasság, a struktúra és az összetétel (vízcseppekből vagy jégtükből áll) határozza meg az egyes felhőfajok fényességi hőmérsékletét és reflektanciáját. A GEO-CT algoritmus szintén műholdas csatornában mért értékekre felállított összefüggések, tesztek alapján dönti el, egy adott (a GEO-CMA által felhősnek ítélt) pixelről, hogy milyen típusú felhőzet borítja. A napszakonként változó összehasonlító elemzések egyik közös vonása a T10,8 μ m – T12,0 μ m és a T7,8 μ m – T10,8 μ m teszt: mindkét különbség nagyobb például vékony cirrus felhőzet esetén, mint vastag alacsony szintű felhőzetnél. A programban alkalmazott kritikus értékek segítségével dönthetjük el, hogy milyen objektumról lehet szó [7 – EUMETSAT felhő produktum leírás].

A programcsomag által előállított felhőtípus produktum minden egyes műholdkép pixelre megadja a felhőtípus kategóriát. Összesen 14 kategória van, külön osztályai vannak az áttetsző és vastag felhőknek, az előzőeket áttetszőség alapján csoportosítják, a vastag felhőket pedig a felhő tetejének magassága szerint sorolják be. Elkülönítik a részben felhős pixeleket is.

A derült felszíneket is több kategóriába sorolja: szárazföld, tenger, hó borította szárazföld, illetve jéggel borított tenger. Fontos kiemelni, hogy az imént ismertetett felhőtípusok nem fedik át, nem feleltethetők meg a klasszikus felhőosztályozás során definiált felhőfajokkal. (*Természetesen más osztályozási rendet alkalmazunk, ha a felhőzetet alulról, vagy felülről látjuk.*) Az EUMETSAT fejlesztések távlati céljai közé tartozik például a réteges és gomolyos felhők elkülönítése [7 – EUMETSAT felhő produktum leírás].

A diplomamunkában nem használjuk fel a különböző felhőtípus kategóriákat, két csoportot veszünk figyelembe, a borult és a derült kategóriába sorolunk be minden pixelt. Így a borult kategóriába tartozik az összes műholdas felhő osztály, míg a derült kategóriába kerül a derült szárazföld, a derült, hó borította szárazföld, a derült tenger és a derült jéggel borított tenger. A 14 kategóriát tartalmazó képeket továbbra is felhőtípus képnek nevezzük, a két kategóriát tartalmazó képeket pedig felhő képeknek hívjuk. A módszer tovább fejlesztése során tervezek bevonni további kategóriákat is, például a részben felhős területeket, vagy a vékony áttetsző felhőket, amelyek jelentősen befolyásolják a globálsugárzást. Erre lehetőséget adnak a műholdas produktumok.

4.2 Nagyfelbontású szélmező

A SAFNWC/MSG programcsomag GEO-HRW algoritmus számítja ki az időben egymást követő műholdképekből a felhőzeti mező elmozdulásán alapuló szélmezőt. Az algoritmus első lépése, az *Előfeldolgozás* (preprocessing): összegyűjti, beolvassa, előkészíti (pl.: normálja) a szükséges input adatokat. Input adatok közé tartozik például a fényességi hőmérséklet és reflektancia; a felhőtípus és a felhőfázis kódok; a földrajzi szélesség, hosszúság és a zenit szög; valamely előrejelzési modell (jelen esetben az ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecast, Középtávú Időjárás Előrejelzés Európai Központja) hőmérséklet, geopotenciál, szél komponens profiljai [10 – EUMETSAT szél produktum leírás].

Ezt követi maga a *Feldolgozás* (processing), mely során az algoritmus kiszámítja az egyes szélvektorokból álló szélmezőt. A szélvektor számítás igen összetett, jelentős matematikai háttérű feladat: az Euklideszi távolság (Euclidean distance), a keresztkorreláció (Cross correlation), a „Fényességi hőmérséklet interpolálás eljárás” („Brightness temperature interpolation method”), a „Keresztkorrelációs hozzájárulási eljárás” („Cross Correlation Contribution method”), tartozik az alkalmazott matematikai módszerek közé [10 – EUMETSAT szél produktum leírás]. E bonyolult módszertan átfogó ismertetése helyett, a [10 –] EUMETSAT szél produktum leírás alapján, szemléletes példával mutatom be a szélvektor számítás feladatkörét.

Tegyük fel, hogy a felhőtípus kép Budapest belvárosa feletti geometriai középpontú, összefüggő vastag cirrus felhőzetet jelez, UTC 06:10 időpontban. 15 perc alatt e felhőzet átalakulhat, a tér bármely irányába elmozdulhat. Így a következő (UTC 06:25 időpontú) felhőtípus képen nehéz beazonosítani, a korábbi cirrus felhőzetet, ezért előnyös, ha a felhőzetről és a környezetéről is sok információ áll rendelkezésre. Egyszerű esetben például a cirrus felhő állandó maradt, középpontja Gyál fölé helyeződött át, így északnyugati szélirányt, 20 m/s szélességet (Budapest-Gyál távolság ≈ 18000 m, 15 perc egyenlő 900 másodperc) állapíthatunk meg.

A GEO-HRW algoritmus befejező része az *Utófeldolgozás* (postprocessing). Az előbbi példát követve, ha az UTC 06:25 időpontú felhőtípus képen több külváros felett megjelenik cirrus felhőzet középpont, akkor a Feldolgozás során több szélvektort is kiszámít az algoritmus. A szélvektorok közül az *Utófeldolgozáskor* választja ki a program a legmarkánsabb („Best AMV”) vektort [10 – EUMETSAT szél produktum leírás].

Az algoritmus 24 x 24 HRV pixel (nagyfelbontású látható csatorna pixele) nagyságú területhez rendel legfeljebb egy szélvektort. A szélvektor megadott legfőbb jellemzői: a helye, iránya, sebessége, nyomási szintje [10 – EUMETSAT szél produktum leírás].

5 A kidolgozott eljárás

Jelen fejezetben a diplomamunkám készítése során kidolgozott eljárást fejtem ki: előbb a felhő képek, szélmezők alapján történő áthelyezését ismertetem; majd az áthelyezett felhő képek, valós felhő képekkel végzett verifikálását tárgyalom.

5.1 A felhő kép áthelyezése

A következőkben a 16. (összefoglaló) ábra segítségével ismertetem a felhő kép áthelyezésének lépéseit. Az ábrán zöld színnel jelenik meg maga a szélmező és a rajta elvégzett műveletek, számítások (melyeket egy-egy általam írt FORTRAN nyelvű program hajtott végre). A szélvektorok helyét a földrajzi szélesség és hosszúság, míg a felhő kép egyes elemeinek helyét saját Descartes-féle koordináta-rendszerének x , y koordinátái jellemzik. Így szükséges e két-két különböző koordináta (az ábrán lila színnel kiemelt) azonosítása, átszámítása, melyhez a SAFNWC programcsomag egy c-nyelvű programját futtattam. A 16. ábra kék színnel jelöli a felhő képet és a hozzá kapcsolódó (szintén saját FORTRAN programokkal készített) számításokat, műveleteket.



16. ábra: Felhő kép áthelyezésének lépései

A nagyfelbontású szélmezőt tartalmazó, txt formátumú, teljes Európát lefedő szél-fájlból indultam ki. E fájlból a 46° és 48° földrajzi szélességi, 16° és 19° hosszúsági fokokkal határolt területre magyarországi szél kivágot fájl készítem. (Mivel a nagyfelbontású szélmezőt a felhőzet elmozdulásai alapján állítják elő, így derült napokra nem végeztem futtatásokat és téli részben derült helyzetekben is előfordult, hogy egyetlen szélvektort sem tartalmazott a szél kivágot fájl.) Ezt követően a magyarországi kivágoton szereplő szélirányokat és szélességeket átlagoltam (további műveletek során ezen átlagos szélirányt és szélességet használtam fel), valamint kiszámítottam szórásaikat is. A szélirányt tekintve, 90° foknál nagyobb szórás utalhat szélfordulásra, konvergens vagy divergens szélmezőre. Ezen esetekben az átlag szélvektor alkalmazása jelentős hibákat okozhat, így őket kiemeltem a számítási folyamatból.

A számítások egyszerűsítésének érdekében az átlagos szélvektor helyének minden esetben a 47° földrajzi szélességű, 19° földrajzi hosszúságú pontot tekintetem. (Azaz a magyarországi szél kivágot esetén, a korábbiakban kiszámított átlagos szélesség (aws) és szélirány (awd) földrajzi koordinátáink a 47° földrajzi szélességet és a 19° földrajzi hosszúságot „adtam meg”). Az átlagos szélvektorból következő „eltolás” (más szóval áthelyezés) számítása során előbb a szélesség és az áthelyezési idő (+15 perc és +180 perc között, 15 perces bontásban) segítségével kiszámoltam az eltolás távolságát. Majd a szélirány alapján meghatároztam az „eltolás” irányát: 0° és 180° fok közötti szélirány esetén, a szélirányt 180° fokkal megnövelve; 180° és 360° fok közötti szélirány esetén a szélirányt 180° fokkal csökkentve határozható meg az „eltolás” iránya. A „kiindulási” koordináták (47°, 19°), a távolság és az „eltolás” irányának ismeretében, az első geodéziai főfeladat (12), (13), (14) sorszámmal jelölt képleteivel számítottam ki az (adott előrejelzési idővel, pl.: 15 perccel) az „eltolás” utáni „érkezési” helyet:

$$\varphi_B = \arcsin(\cos v_{AB} \sin \varphi_A + \sin v_{AB} \cos \varphi_A \cos \alpha_{AB}) \quad (12)$$

$$\Delta\lambda = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha_{AB} \sin v_{AB}}{\cos \varphi_B}\right) \quad (13)$$

$$\lambda_B = \lambda_A + \Delta\lambda \quad (14)$$

ahol φ_B az „eltolás” utáni „érkezési” pont földrajzi szélessége, v_{AB} a távolsághoz tartozó

középponti szög ($v_{AB} = \frac{S_{AB}}{R} \frac{180^\circ}{\pi}$, S_{AB} a távolság, R a Föld sugara), φ_A a szélvektor „kiindulási” szélessége, α_{AB} az „eltolás szöge”, $\Delta\lambda$ a földrajzi hosszúság különbsége, λ_A a földrajzi hosszúság a „kiindulási” pontban, λ_B pedig az „eltolás” utáni „érkezési” pont földrajzi hosszúsága (12–14 képlet [11 – Gömbháromszögtani számítások segédlet] képletei átrendezés után).

Az átlag szélvektorhoz tartozó „kiindulási” és „érkezési” pont földrajzi koordinátáit, az említett c-nyelvű, SAFNWC programcsomagbeli program megfelelteti egy-egy (a felhő kép esetén használt) x, y koordinátának. A felhőtípus képből elkészítem a felhő képet: minden pixel, amely felhős vagy részben felhős kategóriába tartozik, az borult pixel lesz, a többi pixel derült kódot kap. Ezt a képet a felhőzet eltolás FORTRAN program, az „eltolt” és a „kiindulási” x, y koordináták különbségével „helyezi át”. Végül az áthelyezett felhő képből, külön program segítségével készítek magyarországi kivágat felhő képet.

A programok futtatása során a magyarországi kivágra érvényes átlag szélvektor alapján, Magyarországnál nagyobb területet lefedő felhő képet helyezek át. Bár e módszerrel hibát viszek a számításokba (hiszen a magyarországi átlag szélvektor például a szomszédos országok szélviszonyait nem jellemzi); azonban kivágat felhő kép áthelyezése esetén csak a futtatás kezdetén, a kivágaton megjelenő felhőket „mozgatnám el”. (Így egyes területeken a valótlan felhőzet csökkenés miatt véthetően nagyobb hibák lépnének fel.)

5.2 Áthelyezés verifikálása: verifikációs indexek, alkalmazásuk, értékeik

Az áthelyezett felhő képeket a megfelelő valós felhőtípus képekből készített felhő képekkel vettem össze. (Előbbi mondatban a megfelelő szó alatt, az azonos időpontra vonatkozó áthelyezett és valódi felhő képek összehasonlítását értem, pl.: az UTC 06:10 felhő kép 15 perces áthelyezésével előálló UTC 06:10 + 15 áthelyezett felhő képet, az UTC 06:25 felhő képpel hasonlítottam össze.) E verifikációs számításokhoz kontingencia táblázatokat és a (Nurmi, 2003) cikkben szereplő egyes verifikációs (más néven kontingencia) indexeket, valamint azok feladatombhoz igazított változatait használtam fel.

(Nurmi, 2003) cikkében közölt kontingencia indexek közül hármat választottam ki, majd e három kontingencia indexszel és a belőlük származtatott 13 kontingencia indexszel verifikáltam a felhő képek áthelyezését. A következőkben előbb a kiválasztott majd a származtatott kontingencia indexeket ismertetem.

A 2. táblázat (Nurmi, 2003) kontingencia táblázata, amelyben az esemény jelentheti például, a köd, felhőzet, 0 és 4 okta közötti felhőzet jelenlétét, esőzést vagy havazást. Az „a”

érték azon esetek száma, amelyekben megfigyeltük és előre is jeleztük az eseményt (pl.: a csapadékhullást); a „*b*” érték azon esetek száma, amelyekben nem figyeltük meg, az általunk előrejelzett eseményt; „*c*” érték azon esetek száma, amelyekben megfigyeltük, de nem jeleztük előre az eseményt; „*d*” érték pedig azon esetek száma, amelyekben megfigyelés és előrejelzés sem adta az eseményt; „*n*” az összes eset száma (Nurmi, 2003).

2. táblázat: Kontingencia táblázat (Nurmi, 2003)

Előrejelzett esemény	Megfigyelt esemény		Sorösszeg
	Igen	Nem	
Igen	a	b	a + b
Nem	c	d	c + d
Oszlopösszeg	a + c	b + d	a + b + c + d = n

Az „*a*, *b*, *c*, *d*” értékekből, a (15), (16), (17) képletekkel számítható ki a *POD*, a *FAR* és a *CSI* kontingencia index (Nurmi, 2003):

$$POD = a/(a + c) \quad (15)$$

A *POD* (Probability of Detection, az észlelés valószínűsége) általánosan fogalmazva megmutatja, hogy az észlelt események mekkora részét jeleztük előre. Ideális értéke 1. Ahogyan a (15) összefüggésből is látható, a *POD* értéke az „*a*” értékétől függ elsősorban, azaz minél több esetben van előrejelzett és megfigyelt esemény, annál nagyobb a *POD* értéke (Nurmi, 2003).

$$FAR = b/(a + b) \quad (16)$$

A *FAR* (False Alarm Ratio, téves riasztások aránya) verifikációs indexet, a nem megfigyelt, de előrejelzett események száma határozza meg. Kívánt értéke 0 (Nurmi, 2003).

$$CSI = a/(a + b + c) \quad (17)$$

A *CSI* (Critical Success Index, kritikus siker tényező) egyaránt figyelembe veszi azon eseteket, amikor nem bekövetkezett eseményt jelzett előre a módszer („*b*” értékét); illetve, amikor egy bekövetkezett eseményt nem jelzett előre a módszer („*c*” értékét). Kívánt értéke 1. (Nurmi, 2003).

(Nurmi, 2003) cikke hangsúlyozza, hogy az eltérő indexek értékeit, az eltérő esetszám is befolyásolja, így fontos több index kiszámítása. Továbbá a gyakori eseményeket jobban leírják az indexek (ideálshoz közeli index értékek), a ritka eseményekhez képest (ideálistól távoli index értékek).

Fontos kiemelni, hogy rögzített időpontokban és különböző területelemeken megfigyelt és előrejelzett eseményeket vizsgálunk. Az gyakoriság szó alatt, így azt értjük, hogy a területet alkotó területelemek közül, hány terütelelem felett fordul elő az esemény.

A kontingencia táblázat és a kontingencia indexek általános leírását követően az alábbiakban az alkalmazásukat mutatom be. Az előző bekezdésben nem véletlenül területelemeket említettem. Munkám során két területelemet: a pontot (pixelt) és az 5 x 5 pontot tartalmazó négyzetet alkalmaztam. Fontos megjegyezni, hogy a pontok a műholdképek csatornafelbontásának megfelelő, változó nagyságú, néhány négyzetkilométeres területeket jelentik a valóságban. (A pont elnevezést mindössze a könnyebb leírás kedvéért alkalmazom, továbbá a szakirodalomban is találkoztam ezen elnevezéssel.)

3. táblázat: Számításaim során a pontokra alkalmazott kontingencia táblázat

Borult képpont	Valódi felhő kép (_v)	
Áthelyezett felhő kép (_á)	\sum borult_v, borult_á	\sum derült_v, borult_á
	\sum borult_v, derült_á	\sum derült_v, derült_á

A 3. Táblázat a munkám során a műholdas képpontokra alkalmazott kontingencia táblázat szerkezetét mutatja, ahol a borultság jelenti az eseményt, a valódi felhő kép a megfigyelést, az áthelyezett felhő kép az előrejelzést. A \sum borult_v, borult_á a valódi és az áthelyezett képen is borult pontok száma („a” érték) ; a \sum derült_v, borult_á a valódi képen derült, az áthelyezett képen borult pontok száma („b” érték); \sum borult_v, derült_á a valódi képen borult, az áthelyezett képen derült pontok száma („c”) érték; \sum derült_v, derült_á a valódi és az áthelyezett képen is derült pontok száma („d”) érték. E négy értéket helyettesítettem a (15), (16), (17) képletbe, azaz a (18), (19), (20), (21) képletekkel számítottam ki a POD_p (a pontokra számított POD index), FAR_p (a pontokra számított FAR index), $CSIB_p$ (a borult pontokra számított CSI index) és $CSID_p$ (a derült pontokra számított CSI index) értékeit:

$$PODp = \sum borult_v, borult_á / (\sum borult_v, borult_á + \sum borult_v, derült_á) \quad (18)$$

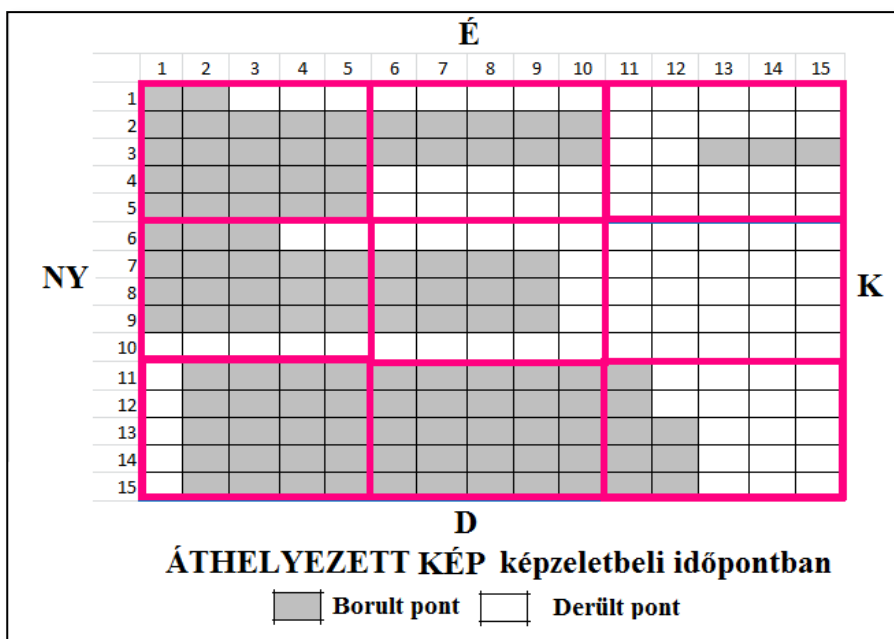
$$FARp = \sum derült_v, borult_á / (\sum borult_v, borult_á + \sum derült_v, borult_á) \quad (19)$$

$$CSIBp = \sum borult_v, borult_á / (\sum borult_v, borult_á + \sum derült_v, borult_á + \sum borult_v, borult_á) \quad (20)$$

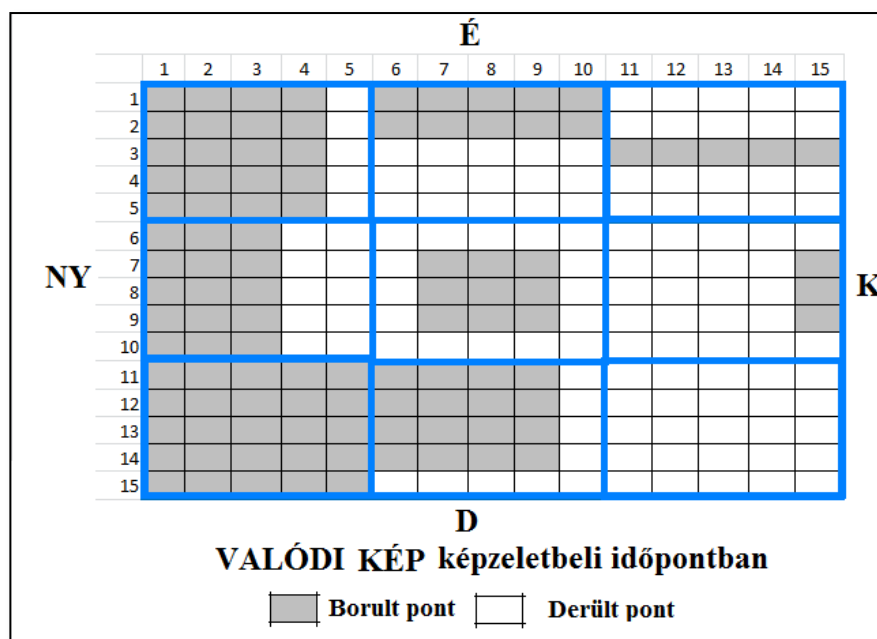
$$CSIDp = \sum derült_v, derült_á / (\sum derült_v, derült_á + \sum derült_v, borult_á + \sum borult_v, borult_á) \quad (21)$$

A *CSI* indexnek a *CSIBp* azaz a borult pontokat vizsgáló kritikus sikertényező felel meg. A derült pontokat vizsgáló kritikus sikertényező *CSIDp* képletében a ($\sum borult_v, borult_á$ érték helyett) a $\sum derült_v, derült_á$ érték szerepel, ezen értéket a derült esetek számszerűsítésének érdekében vezettem be. Megjegyzés: a magyarországi kivágot 150 x 100 pontot tartalmaz, így a 17. ábrán szereplő kontingencia táblázatban szereplő értékek összege 15 000.

Az eddigiekben bemutatott verifikációs indexek azt vizsgálják, hogy a 150 x 100 pontot tartalmazó áthelyezett magyarországi felhő kép kivágot, milyen mértékben jelzi előre a borult (és derült) pontokat. A pontbeli értékek mellett 5 x 5 pontot tartalmazó négyzetekre bontva is összevettem az áthelyezett felhő képet a valódi felhő képpel. Az 5 x 5 pontot tartalmazó négyzetekben meghatároztam a borult / teljes arányt, azaz megszámláltam, hogy a 25 pont közül hány pont felett van borultság. A 75%-nál nagyobb borult / teljes arányú négyzeteket borult, a 25 és 75% közötti borult / teljes arányú négyzeteket közepesen felhős, a 25%-nál kisebb (azaz 0 és 25% közötti) borult / teljes arányú négyzeteket derült négyzeteknek tekintettem. Nevezük a borult, közepesen felhős, derült jelöléseket égbep kategóriáknak! A négyzetekre bontást és összehasonlítást mutatja a 18-19. sematikus ábra. Hangsúlyozom, ezek a jelen magyarázathoz grafikai programmal rajzolt ábrák és nem műholdas produktumok.



17. ábra: Négyzetekre bontott, sematikus, áthelyezett kép



18. ábra: Négyzetekre bontott, sematikus valódi kép

A 17. ábra (azaz az áthelyezett kép) rózsaszínnel határolt, bal felső (ÉNY) négyzetének borult / teljes arányát (ami 88%) hasonlítottam össze, a 18. ábra (azaz a valódi kép) kék színnel határolt, bal felső (ÉNY) négyzetének borult / teljes arányával (ami 80%). Az áthelyezett négyzet és a megfelelő valódi négyzet borult / teljes aránya nem egyenlő, azonban, mivel mindkét négyzet borult / teljes aránya 75% feletti, így mindkét négyzetet borult négyzetnek tekinthetjük. E módszert folytatva a 9 áthelyezett négyzetet összevettem a 9 valódi négyzettel.

Így megállapítottam, hogy 7 négyzet égkép kategóriája azonos, 2 négyzet égkép kategóriája eltérő.

Megjegyzés: Az előző bekezdésben a négyzetekre vonatkozó összehasonlítást ismertettem. Pontok esetén az áthelyezett kép 1, 1 „koordinátájú” pontját hasonlítom a valódi kép 1, 1 „koordinátájú” pontjához, és ezen összevetést folytattam egészen a 15, 15 „koordinátájú” pontokkal bezárólag. Így megállapítottam, hogy összesen 170 azonos (borult, borult és derült, derült) és 55 eltérő (borult, derült és derült, borult) pont van.

A 4. táblázat az említett 5 x 5 pontot tartalmazó négyzetek esetén alkalmazott 3 kontingencia táblázatot foglalja magába.

4. Táblázat: A négyzetek borult / teljes arányaira 3 kontingencia táblázat

borult / teljes > 75%	Valódi felhő kép (_v)	
Áthelyezett felhő kép (_á)	$\sum \text{borult_v} / \text{teljes} > 75\%$ és $\text{borult_á} / \text{teljes} > 75\%$	$\sum \text{borult_v} / \text{teljes} < 75\%$ és $\text{borult_á} / \text{teljes} > 75\%$
	$\sum \text{borult_v} / \text{teljes} > 75\%$ és $\sum \text{borult_á} / \text{teljes} < 75\%$	$\sum \text{borult_v} / \text{teljes} < 75\%$ és $\sum \text{borult_á} / \text{teljes} < 75\%$
75% > borult / teljes > 25%	Valódi felhő kép (_v)	
Áthelyezett felhő kép (_á)	$75\% > \sum \text{borult_v} / \text{teljes} > 25\%$ és $75\% > \sum \text{borult_á} / \text{teljes} > 25\%$	$75\% < \sum \text{borult_v} / \text{teljes} < 25\%$ és $75\% > \sum \text{borult_á} / \text{teljes} > 25\%$
	$75\% > \sum \text{borult_v} / \text{teljes} > 25\%$ és $75\% < \sum \text{borult_á} / \text{teljes} < 25\%$	$75\% < \sum \text{borult_v} / \text{teljes} < 25\%$ és $75\% < \sum \text{borult_á} / \text{teljes} < 25\%$
borult / teljes < 25%	Valódi felhő kép (_v)	
Áthelyezett felhő kép (_á)	$\sum \text{borult_v} / \text{teljes} < 25\%$ és $\sum \text{borult_á} / \text{teljes} < 25\%$	$\sum \text{borult_v} / \text{teljes} > 25\%$ és $\sum \text{borult_á} / \text{teljes} < 25\%$
	$\sum \text{borult_v} / \text{teljes} < 25\%$ és $\text{borult_á} / \text{teljes} > 25\%$	$\sum \text{borult_v} / \text{teljes} > 25\%$ és $\text{borult_á} / \text{teljes} > 25\%$

A borult négyzetekre ($75\% < \text{borult} / \text{teljes}$ arány) felírt kontingencia táblázat értékeit a (18, ..., 21) képletekbe helyettesítve számítottam ki a *POD75*, *FAR75*, *CSIB75* és a *CSID75* kontingencia index értékeit. A közepesen felhős négyzetekre ($25\% < \text{borult} / \text{teljes}$ arány $< 75\%$) felírt kontingencia táblázat értékeit a (18, ..., 21) képletekbe helyettesítve számítottam ki a *POD25*, *FAR25*, *CSIB25* és a *CSID25* kontingencia index értékeit. A derült négyzetekre ($25\% > \text{borult} / \text{teljes}$ arány) felírt kontingencia táblázat értékeit a (18, ..., 21) képletekbe helyettesítve számítottam ki a *POD0*, *FAR0*, *CSIB0* és a *CSID0* kontingencia index értékeit. (A kontingencia indexek elnevezéseiben is 0-k szerepelnek, e kategória valójában a 0%-nál nagyobb, de 25%-nál kisebb borult / teljes arányra vonatkozik, azonban e jelölés esetén 0%-nál kisebb borult / teljes eseteket is szerepeltetni kellett volna a táblázatban, amelyek nem léteznek.)

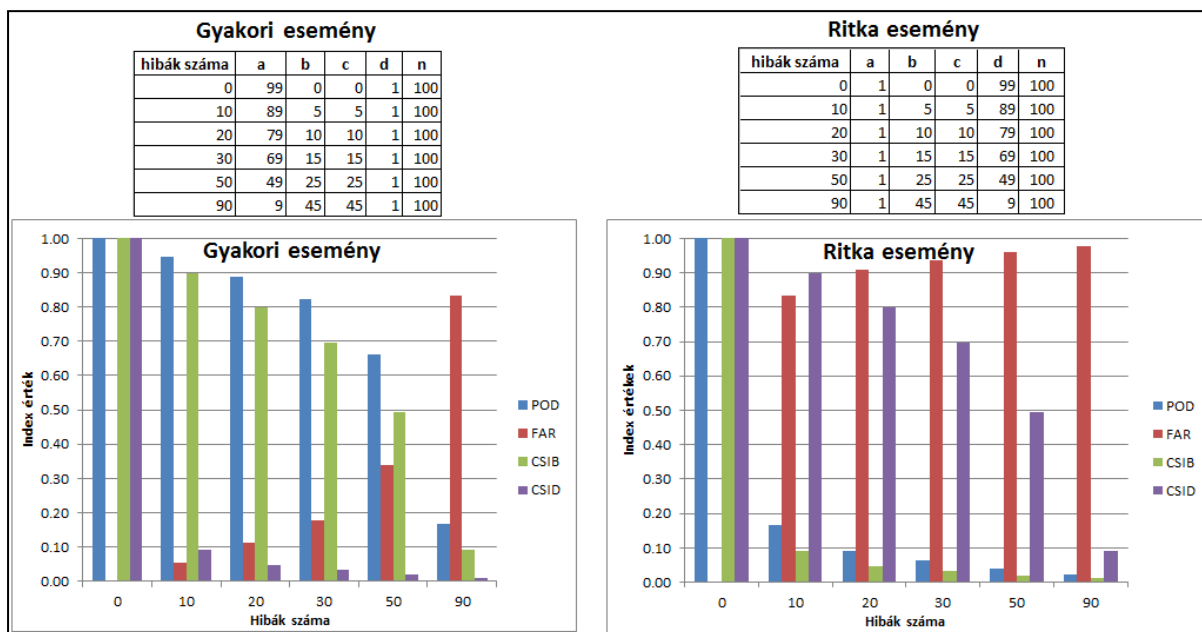
Megjegyzések:

- *POD* indexek alatt a *POD_p*, *POD₇₅*, *POD₂₅* és a *POD₀* elnevezést értem. Ehhez hasonlóan a *FAR*, *CSIB* és a *CSID* indexek alatt a *p*, *75*, *25*, *0* változataik összességét értem.
- Ha 0,3-nél kisebb eltérés van egy index aktuális és ideális értéke között, akkor az aktuális index értéket ideális közelinek tekintem; ha 0,5 vagy ennél nagyobb az eltérés, akkor távolinak tekintem.
- Aktuális index érték alatt pl.: egy áthelyezett és egy valós felhő kép összevetésekor kiszámolt *POD_p* értéket, ideális érték alatt pedig a *POD_p* 1-el egyenlő ideális értékét értem.

Az eredmények bemutatását megelőzően érdemes tisztázni, hogy mi befolyásolja a verifikációs indexek alakulását, s különböző helyzetekben várhatóan milyen értékeket vesz fel. (Nurmi, 2003) cikke kiemeli, hogy a verifikációs indexeket az előrejelzések hibái (azaz a kontingencia táblázatok „*b*” és „*c*” értékei), valamint az események gyakorisága (ami a kontingencia táblázatok „*a*” és „*d*” értékében jelentkezik) befolyásolja. Az iménti információk értelmezéséhez tekintsünk példákat: „*n*” legyen minden példánkban 100, a hibák száma („*b*” + „*c*”) először 0, majd 10, 20, 30, 50 és 90.

$$n - (b + c) = a + d \quad (22)$$

Azaz a „fennmaradó” először 100, majd 90, 80, 70, 50 és 10 esetet „*a*” és „*d*” esetek között „osztjuk” el kétféleképpen: különböző „*a*” értékek mellett, legyen „*d*” konstans módon 1; (ahogyan a 19. ábra bal oldali táblázata mutatja) majd különböző „*d*” értékek mellett, legyen „*a*” konstans módon 1; (ahogyan a 19. ábra jobb oldali táblázata mutatja). Így a bal oldali táblázatban növekvő hibaszám mellett gyakori események vannak („*a*” nagy, „*d*” kicsi). Mialatt a jobb oldali táblázatban növekvő hibaszám mellett ritka események vannak („*a*” kicsi, „*d*” nagy).

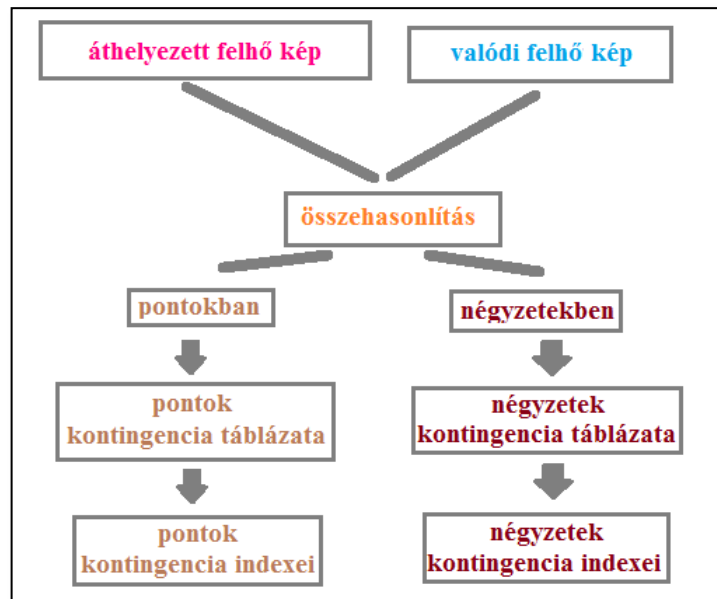


19. ábra: Verifikációs indexek lehetséges értékei

A 19. ábra bemutatja: a hibátlan előrejelzések ideális értékeit (0 hiba \rightarrow *POD*, *CSIB*, *CSID*, *FAR*0); a hibák számának növekedésével a *POD*, a *CSIB* és a *CSID* csökkenését, a *FAR* növekedését. Érzékelteti, hogy a gyakori események *POD*, *FAR*, *CSIB* értékei magasabbak, a ritka események ugyanezen értékeinél, továbbá a ritka események *CSID* értékei jelentősen meghaladják a gyakori események *CSID* értékeit (utóbbi pontosan tükrözi azt, hogy a *CSID* indexet pont a ritka események számszerűsítéséért vezettük be).

A *POD*, a *FAR*, és a *CSIB* mellett még számos verifikációs index (pl.: hiba, hiba gyakoriság, hibás észlelés valószínűsége) szerepel (Nurmi, 2003) tanulmányában. Megítélésem szerint azonos eseményeket nagyszámú verifikációs indexszel vizsgálva kevesebb lényeges információhoz jutottam volna, mint az említett három index és a feladatnak megfelelően módosított változatainak az alkalmazásával.

Az előző oldalakon az áthelyezés verifikációjának matematikai hátterét mutattam be. A 20. ábra (melyet a 16. ábra „folytatásának” tekinthetünk) a verifikáció egyes lépéseit foglalja össze.



20. ábra: Az áthelyezés verifikációjának lépései

A *pontok kontingencia táblázata* nevű FORTRAN program beolvassa a bináris formátumban tárolt áthelyezett és a valódi felhő képeket, majd kiszámítja a pontok kontingencia táblázatának értékeit. Ezen értékekből a *pontok kontingencia indexei* nevű FORTRAN program számítja ki a pontbeli kontingencia indexek értékeit (pl.: *PODp-t*). A borult / teljes arány program a beolvasott áthelyezett és valódi felhő képet 5 x 5-ös négyzetekre bontja, majd meghatározza a négyzetek borult / teljes arányait. Ezen arányokból a *négyzetek kontingencia táblázata* nevű program kiszámítja a négyzetek kontingencia táblázatainak értékeit. A táblázatok értékeiből a *négyzetek kontingencia indexei* nevű program számítja ki a négyzetek kontingencia indexeinek értékeit (pl.: *POD75-t*).

6 Eredmények bemutatása

Továbbiakban a számítási eredményeimet mutatom be. Összesen 47 db (40 db a nyári félében és 7 db a téli félében) 3 órás áthelyezést (azaz futtatást) készítettem, 15 perces időbeli felbontásban.

5. Táblázat: Nyári félében végzett futtatások pontos időpontjai UTC-ben

Futtatás száma	Kezdő időpont	Záró időpont
1	20170606_0655	20170606_0955
2	20170606_1055	20170606_1355
3	20170606_1355	20170606_1655
4	20170618_0655	20170618_0955
5	20170618_1055	20170618_1355
6	20170618_1355	20170618_1655
7	20170622_1225	20170622_1525
8	20170626_0655	20170626_0955
9	20170626_1055	20170626_1355
10	20170626_1355	20170626_1655
11	20170627_0655	20170627_0955
12	20170627_1055	20170627_1355
13	20170627_1410	20170627_1710
14	20170628_0610	20170628_0910
15	20170628_1055	20170628_1355
16	20170628_1355	20170628_1655
17	20170705_0725	20170705_1025
18	20170705_1025	20170705_1325
19	20170705_1355	20170705_1655
20	20170709_0825	20170709_1125
21	20170709_1155	20170709_1455
22	20170710_0755	20170710_1055
23	20170710_1055	20170710_1355
24	20170710_1355	20170710_1655
25	20170712_0655	20170712_0955
26	20170712_1025	20170712_1325
27	20170712_1325	20170712_1625
28	20170713_0825	20170713_1125
29	20170713_1155	20170713_1455
30	20170714_0755	20170714_1055
31	20170714_1055	20170714_1355
32	20170716_1355	20170716_1655
33	20170825_0755	20170825_1055
34	20170825_1055	20170825_1355
35	20170825_1355	20170825_1655
36	20170930_0725	20170930_1025
37	20170930_1025	20170930_1325
38	20170930_1325	20170930_1625
39	20171003_0910	20171003_1210
40	20171003_1210	20171003_1510

A futtatások UTC-ben kifejezett, pontos időpontjait az 5. és a 6. táblázat tartalmazza. Nyári félévben végzett futtatások alatt a júniusi, júliusi, augusztusi, szeptemberi októberi futtatásokat értem, míg a téli félévben végzett futtatásokhoz a januári és a februári futtatások tartoznak. Érdekeség képen egy kis statisztika róluk: $47 \times 12 \times 15000 \rightarrow$ több mint 8 és millió valós, áthelyezett pont összehasonlítását végeztem el (ahol 47 a futtatások, 12 az időlépcsők száma és a magyarországi kivágot 15 000 pontot tartalmaz).





6. Táblázat: Téli félévben végzett futtatások pontos időpontjai UTC-ben

Futtatásszám	kezdő időpont	záró időpont
1	20170119_0855	20170119_1155
2	20170119_1155	20170119_1455
3	20170120_1025	20170120_1325
4	20170121_0955	20170121_1255
5	20170212_0655	20170212_0955
6	20170212_1155	20170212_1455
7	20170213_1155	20170213_1455

6.1 Eredmények szemléltetése

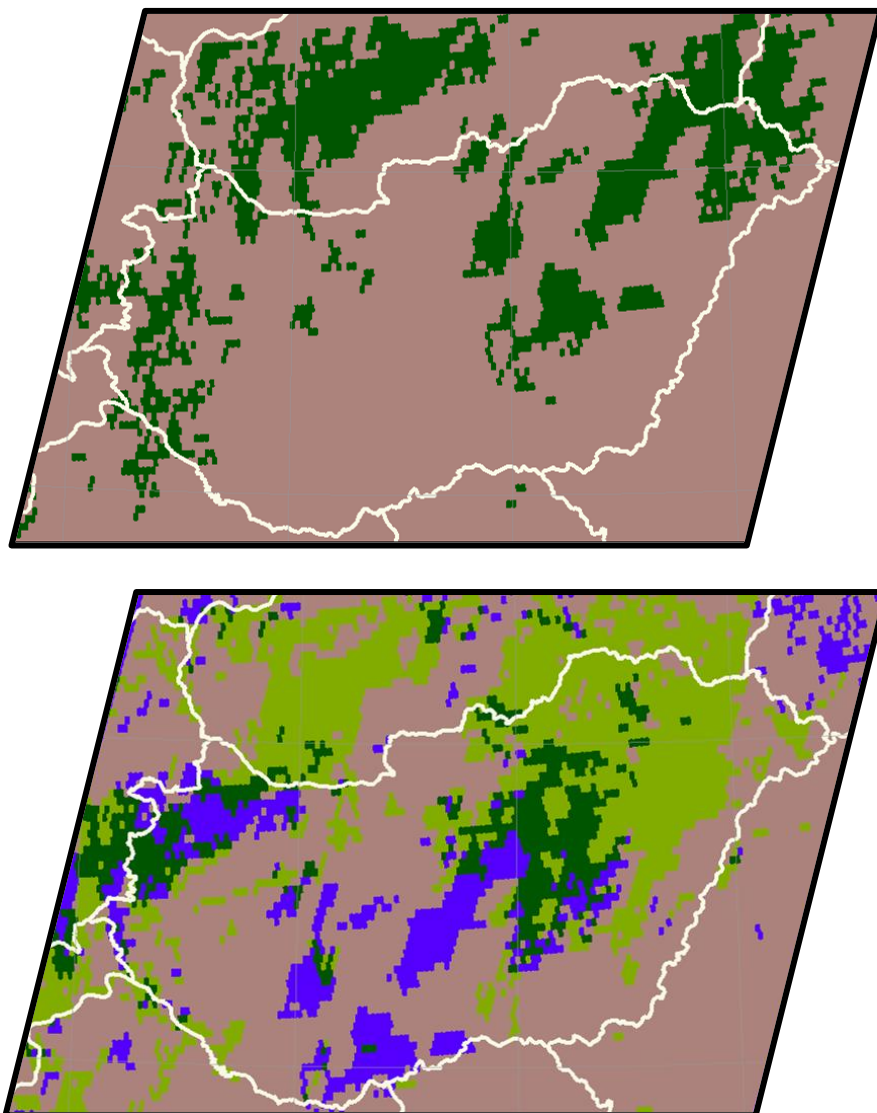
A következő alfejezetekben a különböző futtatások verifikációs indexeinek értékeit elemzem, valamint egyes futtatásokat HAWK ábrákon is bemutatok. Az eredmények részletes elemzése előtt, elsőként a verifikációs index értékek HAWK ábrákon történő megjelenítését szemléltetem.

A 21. ábra a valós és az áthelyezett felhő képek együttes megjelenítése (azonos időpontra vonatkozó valós és az áthelyezett kép egy-egy „grafikai réteget alkotva” egyszerre jelenik meg) során alkalmazott egyedi színskálát mutatja be. A kontingencia táblázatnak megfelelően négy színnel dolgozunk.

	Valós felhő kép borult, áthelyezett felhő kép borult
	Valós felhő kép derült, áthelyezett felhő kép borult
	Valós felhő kép borult, áthelyezett felhő kép derült
	Valós felhő kép derült, áthelyezett felhő kép derült

21. ábra: Az alkalmazott színsála

A HAWK képeken tehát a valós és az áthelyezett felhő képen is borult területek fakó rózsaszínnel jelennek meg: szemléletesen e területek összessége jelenti a kontingencia táblázat „a” értékét. A HAWK képeken élénkzöld színű területek esetén a valós felhő kép derült, az áthelyezett azonban borult, így az „élénkzöld területek összessége” a kontingencia táblázat „b” értéke. Előbbi „fordítottjai” a kék színnel megjelenített területek, melyek a valós felhő képen borultak, míg az áthelyezett felhő képen derültek. Tehát a kék színű területek összessége a kontingencia táblázat „c” értéke. Végül, ha egy adott terület sötétzöld színű, akkor a valós és az áthelyezett kép szerint is derült, e területek összessége a kontingencia táblázat „d” értéke. Lássunk egy példát!



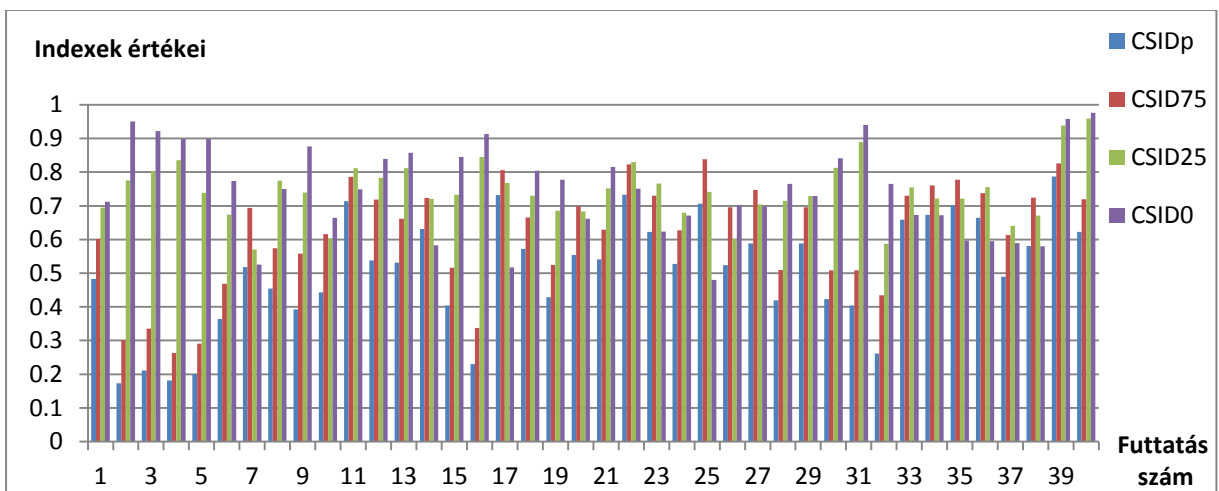
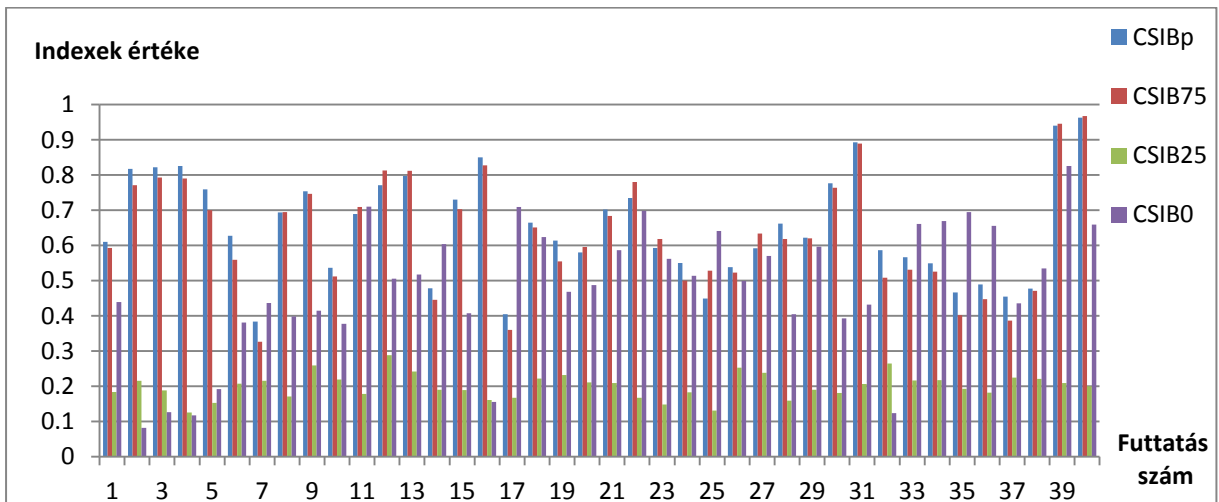
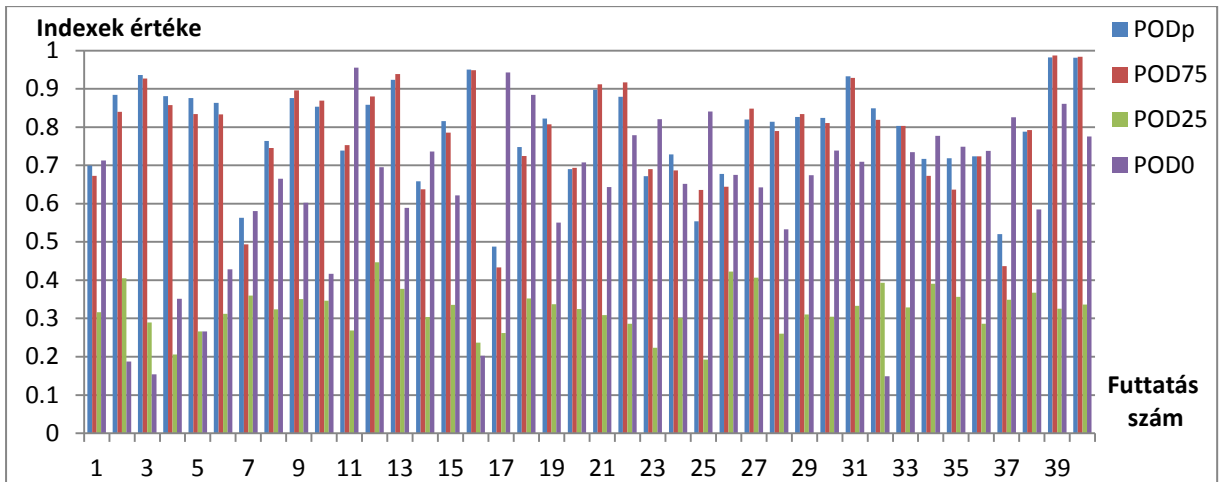
22. Ábra: 2017. 06. 18. 10:55 UTC futtatás kiindulási felhő képei (fent) alatta a 13:55 UTC valós és a 180 perces áthelyezett felhő képek, forrás: OMSZ HAWK rendszer

A 22. ábra felső képén a 2017. 06. 18. 10:55 UTC futtatás kiindulási felhő képei láthatóak, nyilvánvalóan a kiindulási időpontban. Nem volt áthelyezés, így csak rózsaszín és sötétzöld területek szerepelnek. Alatta a 13:55 UTC valós felhő kép és a 180 perces áthelyezéssel kapott felhő kép együttes megjelenítése látható, ahol már megjelenik az élénkzöld és a kék szín is. Ahogyan említettem az élénkzöld illetve a kék színű területeken az áthelyezett felhő kép eltér a megfelelő valós felhő képtől. Érhető, hogy minél kevesebb részt borít élénkzöld és kék szín, „*b*” és „*c*” értékek annál kisebbek, továbbá a kontingencia indexek annál közelebb vannak ideális értékeikhez (az előző fejezetben tárgyaltaknak megfelelően a *POD_p*, a *CSIB_p* és a *CSID_p* ideális értéke 1, míg a *FAR_p* ideális értéke 0).

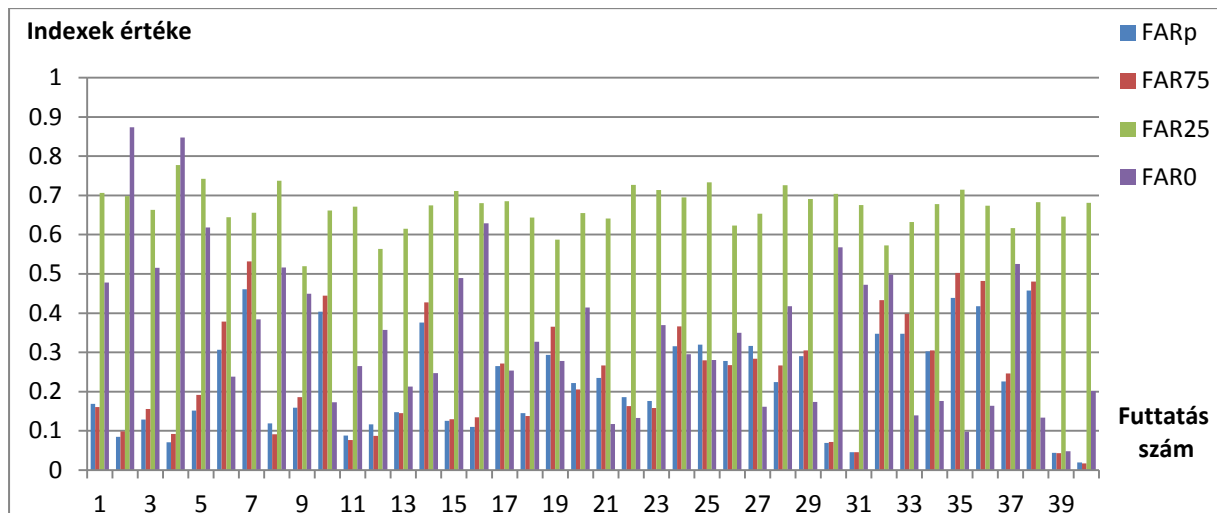
Az 5 x 5-ös négyzetekre definiált kontingencia indexek esetén összetettebb a helyzet: ugyanis itt egy adott négyzeten belül megköveteljük a borult és a derült részek együttes jelenlétét (ami egyes futtatásoknál nem jellemző), így e kontingencia indexeket sokkal nehezebb szemléltetni.

6.2 Nyári félév futtatásinak eredményei

Jelen fejezet célja, hogy rövid átfogó képet adjon a 2017-es nyári félévi futtatások eredményeiről (40 eset, 40 áthelyeződési vizsgálat). Felmerülhet a kérdés mit értek pontosan a futtatás illetve a futtatás eredménye alatt. Adott egy felhő kép és egy hozzátartozó szélmező (pl.: 2017. 06. 06. 06:55 UTC időpontban). Az 5. fejezetben bemutatott áthelyezési eljárással, 15 perces bontásban, 3 órás áthelyezést készítek. Azaz előállítom a +15, +30, ..., +180 perces áthelyezett felhő képeket. Ezeket a megfelelő valós felhő képekkel összevetve, időlépcsőről időlépcsőre (+15, ..., +180 perc) kiszámítom a 16 db kontingencia index értékét (azaz a *POD_p*, *FAR_p*, *CSIB_p*, *CSID_p*, *POD₇₅*, *FAR₇₅*, *CSIB₇₅*, *CSID₇₅*, *POD₂₅*, *FAR₂₅*, *CSIB₂₅*, *CSID₂₅*, *POD₀*, *FAR₀*, *CSIB₀*, *CSID₀* indexek értékeit). Ezáltal 12 x 16 kontingencia index jellemez minden futtatást. Az egyes futtatások könnyebb jellemzésének érdekében futtatásonként és indexenként átlagoltam az értékeket (pl.: 1-es futtatás 12 db *POD_p*, 12 db *FAR_p*, ..., 12 db *CSID₀* értékeit). Ezen átlagos értékeket indexenként csoportosítva mutatja be a 23. ábra négy grafikonja.



23. ábra a–c: Futtatásonként és indexenként átlagolt POD, FAR, CSIB indexek



23. ábra d: Futtatásonként és indexenként átlagolt CSID index

Gyors pillantást vetve a grafikonokra megállapíthatjuk, hogy:

- A kontingencia indexek átlagos értékei futtatásonként változnak, néhány hasonlóságot azonban mutatnak.
- Gyakoriak a 0,8 feletti *POD_p*, *POD₇₅* és a 0,2 alatti *FAR_p*, *FAR₇₅* értékek, melyekből, a felhőzet áthelyeződés közbeni állandóságára (megmaradási hajlamára) következtethetünk
- A közepes felhőzetet a 25 indexek írják le. A 25 indexek elnevezés alatt a 25%-nál nagyobb, 75%-nál kisebb borult / teljes arányú 5 x 5 négyzetek kontingencia indexeit, azaz a *POD₂₅*, a *FAR₂₅*, a *CSIB₂₅* és a *CSID₂₅* indexeket értem. A *POD₂₅* index értékei alacsonyok (0,3 körüliek), míg *FAR₂₅* értékei magasak (0,7 körül vannak). *CSIB₂₅* index 0,2 a *CSID₂₅* index 0,7 körül alakul. Utóbbi érthető, hiszen a *CSIB* indexek a borult, míg a *CSID* indexek a derült területeket jellemzik.
- Feltűnő, hogy a 39-es és a 40-es futtatás oszlopai közel azonosak (azonos értékekig „mennek fel”), ennek oka, hogy a 39-es futtatás záró időpontja (2017. 10. 03. 12:10 UTC) megegyezik a 40-es futtatás kezdő (más néven kiindulási) időpontjával és az aktuális időjárási helyzet állandóságot mutat 09:10 és 15:10 UTC között

6.3 A nyári félév futtatásainak eredményei a szélesebbesség függvényében

Az átlagos értékek ismertetését követően felmerül a kérdés, hogy a különböző időpontokban végzett futtatások kontingencia indexei mi alapján és milyen mértékben térnek el egymástól. Jelen alfejezet e két kérdésre kíván választ adni.

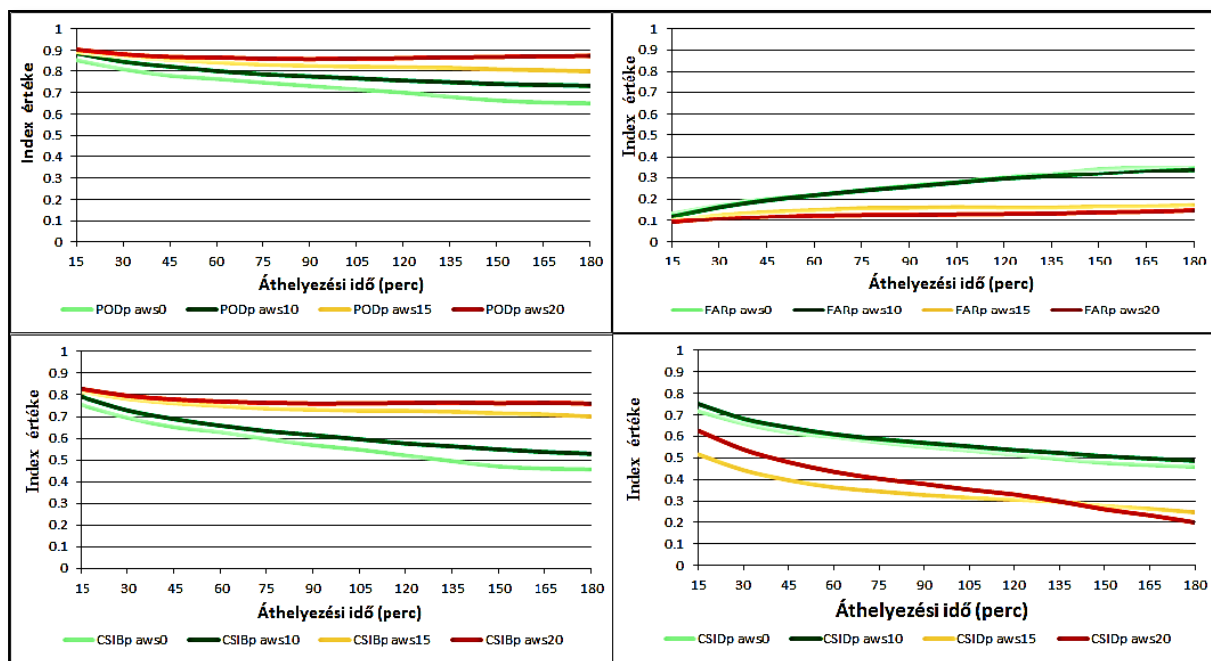
A futtatásokat, az áthelyezéshez alkalmazott átlagos szélesebbesség alapján aws0, aws10, aws15, aws20 szélesebbességi kategóriákba soroltam, e szélesebbességi kategóriákat és a futtatások kategóriákba sorolását mutatja a 7. táblázat.

1. táblázat: Szélesebbességi kategóriák definíciói és a futtatások kategóriákba sorolása

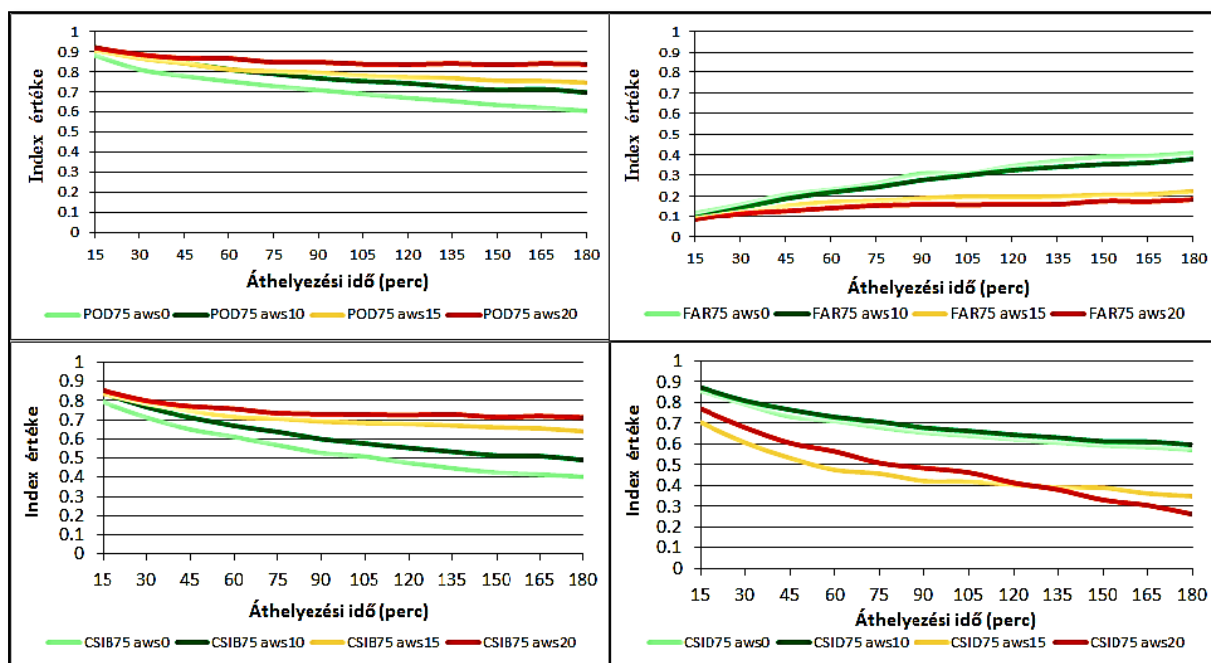
futtatás szám	aws	futtatás szám	aws
1	15,1	21	12,3
2	15,0	22	10,6
3	16,9	23	11,5
4	19,0	24	11,6
5	16,0	25	12,2
6	11,6	26	13,7
7	18,4	27	11,5
8	13,0	28	13,5
9	9,7	29	8,9
10	10,3	30	20,7
11	9,1	31	22,1
12	10,6	32	7,0
13	10,9	33	12,9
14	13,0	34	12,8
15	22,2	35	10,3
16	26,2	36	5,2
17	9,9	37	5,3
18	9,3	38	3,6
19	20,8	39	13,8
20	12,8	40	17,0

aws0: aws < 10 m/s
aws10: 10m/s< aws < 15m/s
aws15: 15 m/s< aws < 20 m/s
aws20: 20 m/s< aws

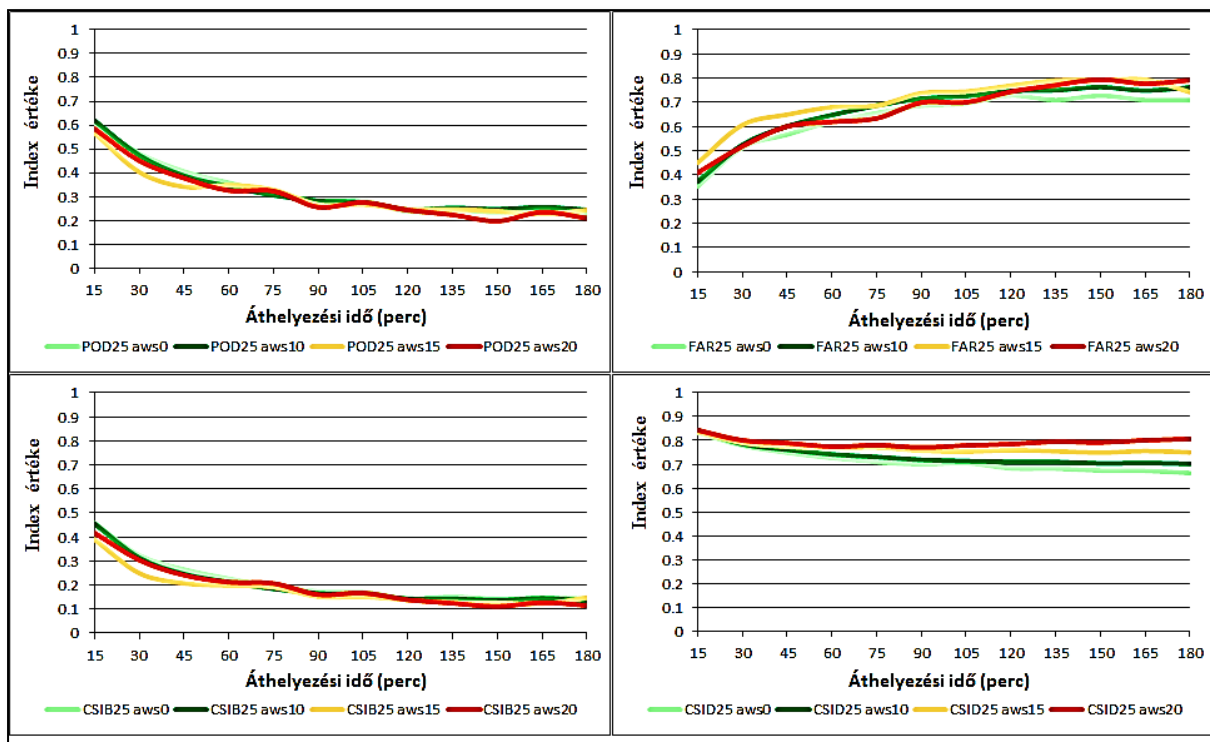
Az egyes szélességi kategóriák esetén átlagoltam a kategóriába tartozó futtatások kontingencia indexeit. Így kontingencia indexenként, áthelyezési időnként és szélességi kategóriánként állt elő egy-egy érték, melyeket a 24–27. ábrák mutatnak be.



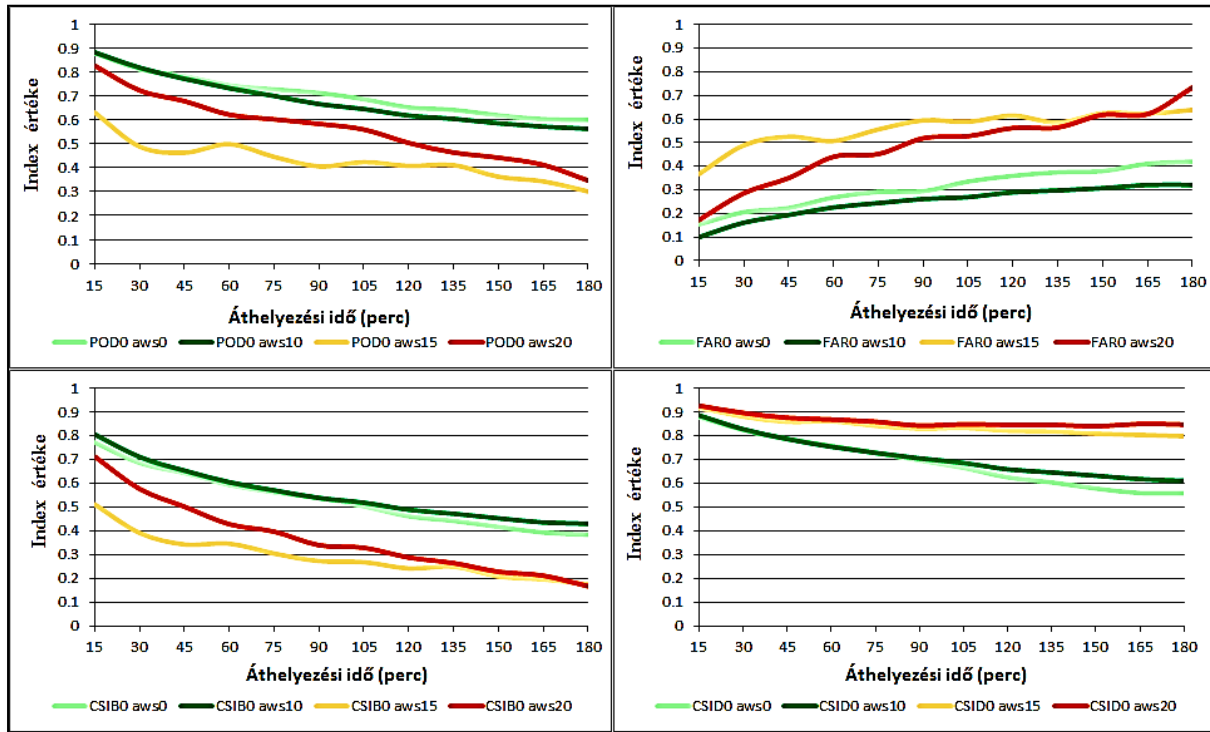
24. ábra: Szélességi kategóriánként átlagolt pontbeli kontingencia indexek áthelyezési idő szerinti változása



25. ábra: Szélességi kategóriánként átlagolt 75% < borult / teljes arányt vizsgáló kontingencia indexek áthelyezési idő szerinti változása



26. ábra: Szélsébségi kategóriánként átlagolt 25% < borult / teljes < 75% arányt vizsgáló kontingencia indexek áthelyezési idő szerinti változása



27. ábra: Szélsébségi kategóriánként átlagolt borult / teljes < 25% arányt vizsgáló kontingencia indexek áthelyezési idő szerinti változás

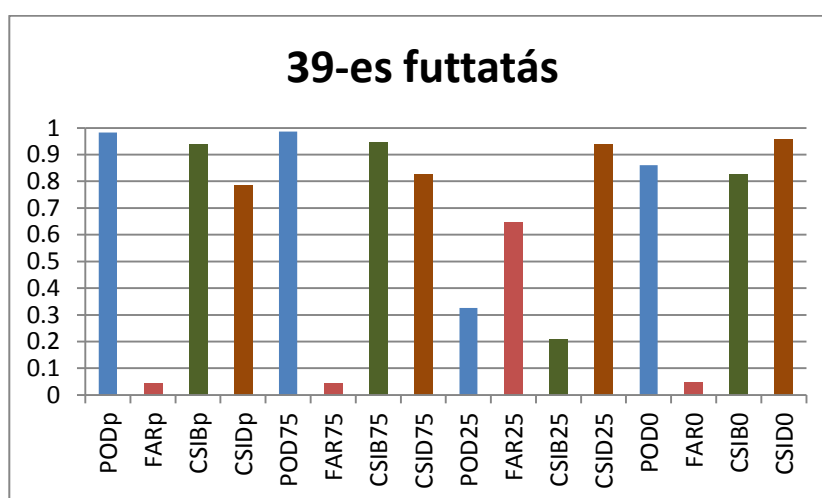
A 24–27. ábrák alapján az alábbiakat állapíthatjuk meg:

- 20 m/s feletti, valamint a 15 és 20 m/s közötti szélességek esetén a felhőzet áthelyeződése jelentős (melyet az 1-hez közeli POD_p , POD_{75} , $CSIB_p$, $CSIB_{75}$ és a 0-hoz közeli, FAR_p , FAR_{75} értékek igazolnak; emlékeztetőül a POD_p , $CSIB_p$, FAR_p jelenti a pontokra vonatkozó kontingencia indexeket)
- 10 és 15 m/s közötti, valamint 10 m/s alatti szélességek esetén a felhőzet áthelyeződése csekély (melyet magas POD_0 , $CSIB_0$ és alacsony FAR_0 értékek igazolnak,
- közepes felhőzet áthelyeződése nem mutat jelentős eltéréseket a szélesség függvényében (aws_0 , aws_{10} , aws_{15} , aws_{20} szélességi kategóriák POD_{25} , FAR_{25} , $CSIB_{25}$ és $CSID_{25}$ görbéi egymáshoz közel futnak a 27. ábrán, azaz a POD_{25} , FAR_{25} , $CSIB_{25}$ görbék maximális eltérése 0,1; míg a $CSID_{25}$ görbék maximális eltérése 0,2).
- az aws_0 , és aws_{10} görbék közel azonos értékeket vesznek fel (pl.: a 24. ábra FAR_p , $CSIB_p$, $CSID_p$ görbéi), tőlük eltérő, de egymáshoz hasonló értékeket vesznek fel az aws_{15} , aws_{20} görbék (pl.: a 24. ábra FAR_p , $CSIB_p$ és $CSID_p$ görbéi). E hasonlóságok szerint 2 szélességi kategória (azaz a 15 m/s-nál kisebb és nagyobb szélességi kategóriák) alkalmazása is elegendő lehet.

6.4 Esettanulmányok

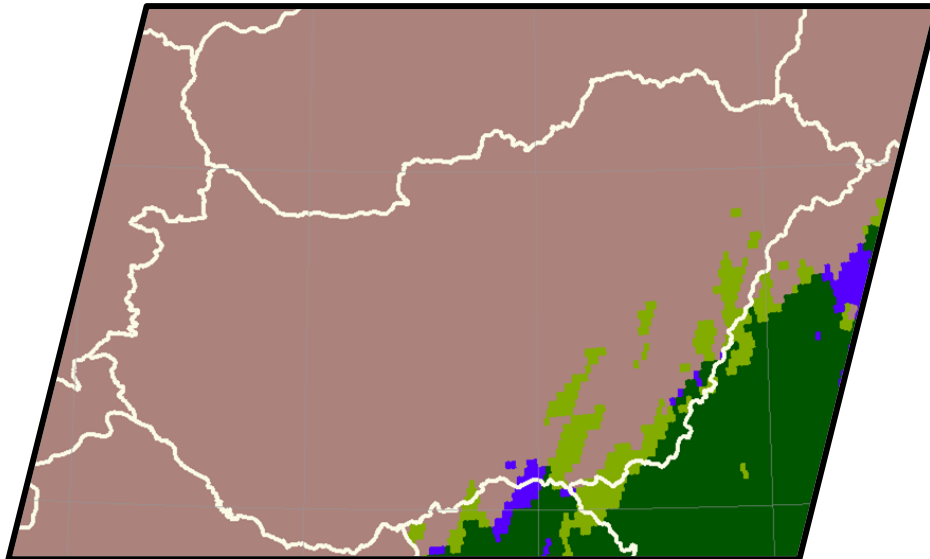
2017. 10. 03. 9:10 UTC azaz a (nyári félévben végzett) 39-es futtatás

A számolt kontingencia index értékek alapos elemzését követően megállapítottam, hogy e futtatás kontingencia index értékei a legideálisabbak (ezért elemzem e futtatást esettanulmány keretében). Az alábbi grafikon összefoglalóan mutatja be a 16 index e futtatásra vonatkozó (időben átlagolt) értékeit. (Időbeli átlagolással a 16 x 12 db (ahol 12 a +15, +30,...+180 perces áthelyezési időt más néven időlépcsőt jelenti) kontingencia index vizsgálata helyett elegendő 16 db átlagos kontingencia indexet elemezni.)



28. ábra: 39-es futtatás átlagos kontingencia index értékei

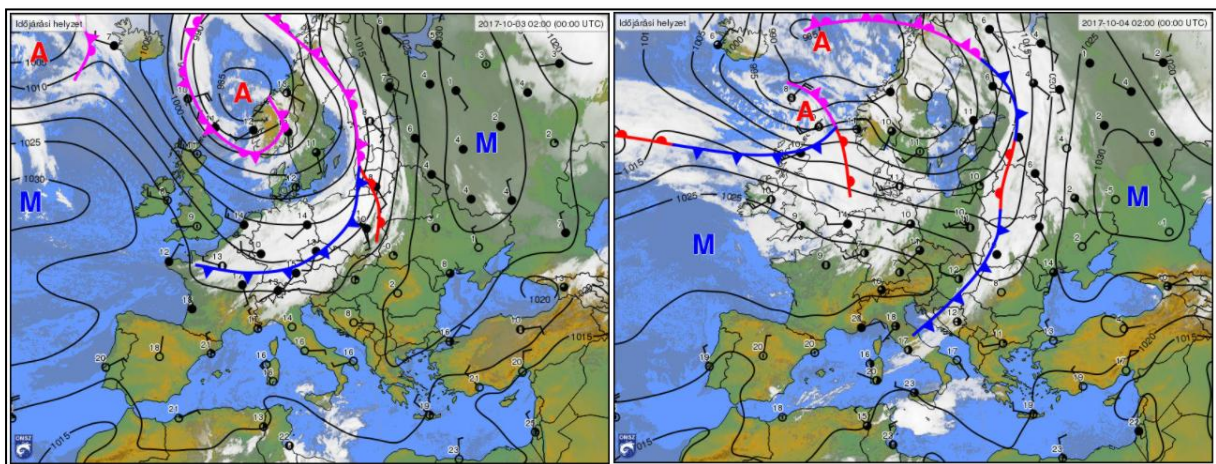
Látható, hogy e futtatás esetén a 0 ideális értékű *FAR* indexek közül 3 kisebb 0,1-nél. Az 1 ideális értékű *POD*, *FAR*, *CSIB*, *CSID* indexek közül 6 nagyobb 0,9-nél. (Emlékeztetőül a *POD* indexek összefoglaló elnevezés a *POD_p*, *POD₇₅*, *POD₂₅*, és *POD₀* indexeket jelenti, hozzá hasonlóan *FAR* indexek alatt a *FAR_p*, *FAR₇₅*, *FAR₂₅* és *FAR₀*; *CSIB* indexek alatt a *CSIB_p*, *CSIB₇₅*, *CSIB₂₅* és *CSIB₀*, *CSID* indexek alatt a *CSID_p*, *CSID₇₅*, *CSID₂₅* és *CSID₀* indexeket értem.) Az említett konkrét indexértékek, a 39-es futtatás esetén egyértelműen igazolják a felhőzet áthelyeződés közbeni megmaradási hajlamát.



29. ábra: A 2017. 10. 03. 09:10 UTC futtatás 180 perces áthelyezett és a 12:10 UTC felhő kép, forrás: OMSZ HAWK rendszer

A 29. ábra (azaz a futtatás 180 perces áthelyezésű felhő képe és a 12:10 UTC felhő kép) is igazolja az iméntieket, hiszen csak a délkeleti határ mentén látható minimális élénkzöld és kék (azaz a felhő képek eltéréseire utaló) terület.

E napon egy hidegfront vonult át hazánkon [12 – OMSZ Napijelentés kiadvány], melyet a 30. ábra szemléltet. A 30. ábra bal oldalán a 2017. 10. 03. 00 UTC fronttérkép található, melyen jól látszik, hogy a front ekkor északnyugati irányból közelített meg hazánkat. A 30. ábra jobb oldalán a 2017. 10. 04. 00 UTC fronttérkép szerepel, mely megfigyelhető hazánk térségét délkeleti irányban elhagyó hidegfront.



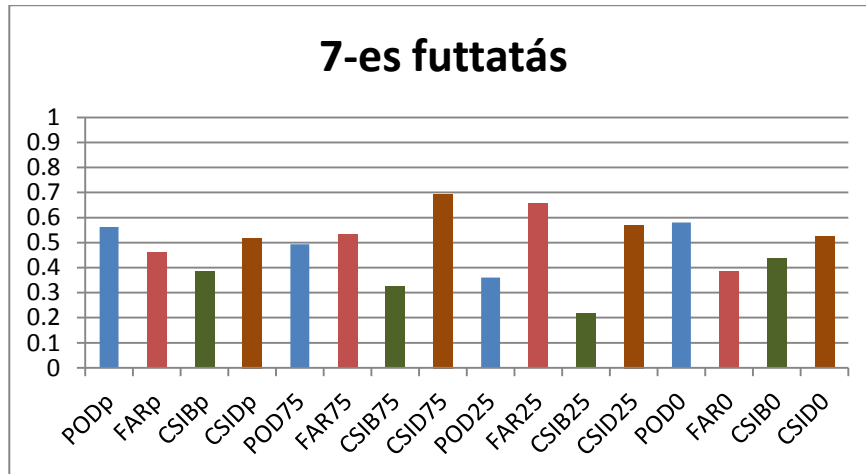
30. ábra: 2017. 10. 03. és 04. 00 UTC fronttérképei, forrás: [12 – OMSZ Napijelentés kiadvány]

A 30. ábra fronttérképei is szemléltetik, a jelentős megmaradási hajlamú felhőzetet a hidegfront átvonulása során. E jelentős megmaradási hajlamot számszerűsítik a 39. ábrán szereplő kontingencia indexek.

2017. 06. 22. 12:25 UTC, azaz a nyári félév 7-es futtatása

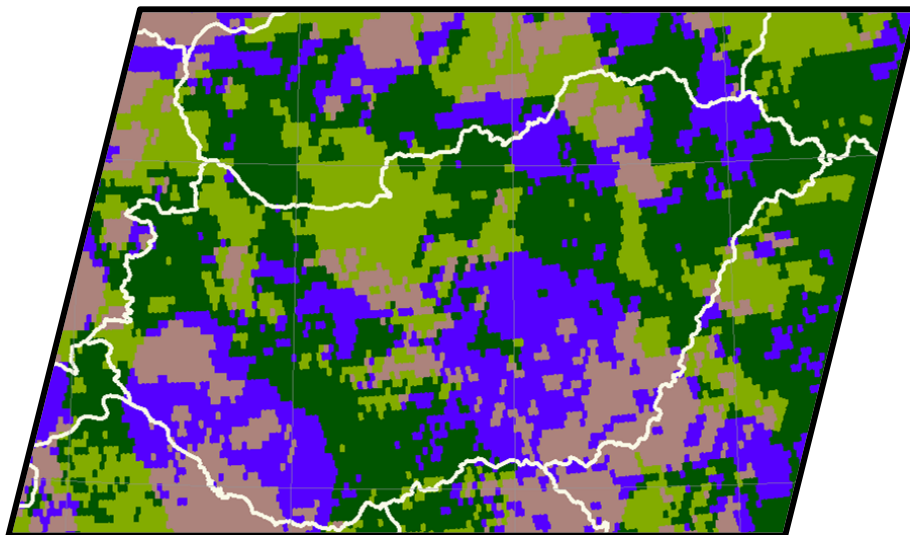
A 40 nyári félévre vonatkozó futtatás közül e futtatás, azaz a 7-es futtatás kontingencia index értékei a legkevésbé ideálisak, ezért mutatom be ezt az esetet is.

A 31. ábra szemlélteti a 16 index 3 órára vonatkozó időben átlagolt értékeit.



31. ábra: A 7-es futtatás átlagos kontingencia index értékei

Látható, hogy nem fordult elő 0,7 feletti, illetve 0,2 alatti kontingencia index érték.

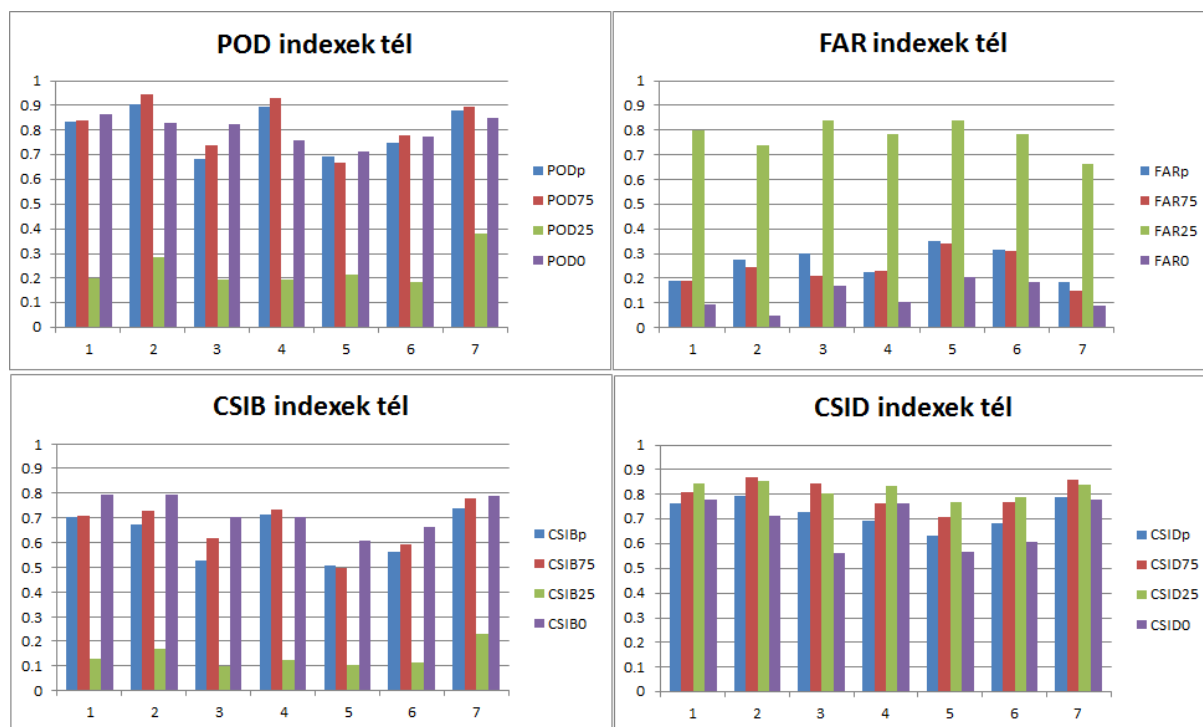


32. ábra: A 2017. 06. 22. 12:25 UTC futtatás 180 perces áthelyezett és a 15:20 UTC felhő kép, forrás: OMSZ HAWK rendszer

A 32. ábra is megerősíti az iméntieket. E napon helyi zivatarok formálták hazánk időjárását [12 – OMSZ Napijelentés kiadvány], így gyenge volt a felhőzet áthelyeződés közbeni megmaradási hajlama. E hatások alakították ki az említett ideálistól távoli kontingencia index értékeket.

A téli félévi futtatások eredményei

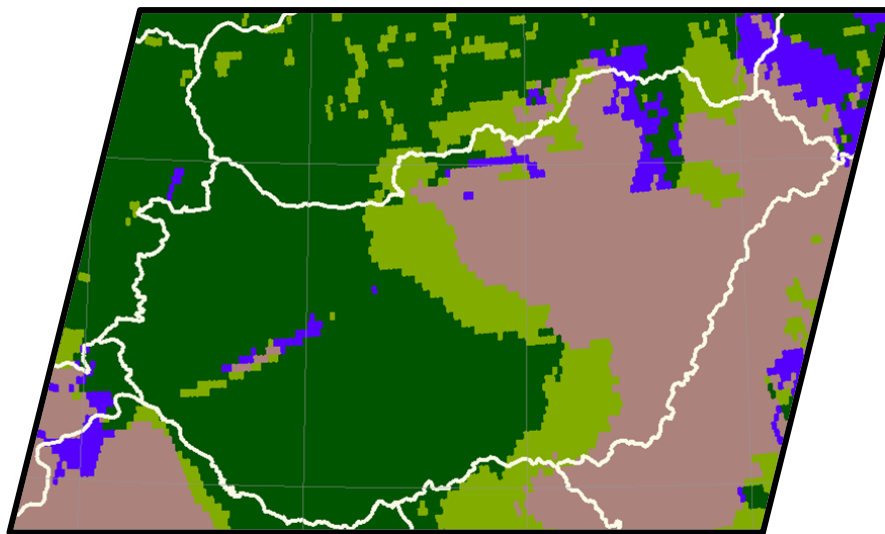
A 7 téli félévi futtatást célszerűbb két esettanulmánynak, mintsem külön vizsgálatnak tekinteni. A 2017. január 19–21. közötti első négy futtatást és a február 12–13-i (5–7) futtatásokat elkülönítve kezelem. A 33. ábrán e futtatások kontingencia indexeinek átlagai láthatók a 4–4 *POD*, *FAR*, *CSIB* és *CSID* indexenként csoportosítva.



33. ábra: Téli félévi (2017. január–február) futtatások átlagos index értékei

Látható, hogy a pontbeli, illetve a 75 és a 0, *POD*, *FAR*, *CSIB* és *CSID* indexek is megközelítik ideális értékeiket: pontbeli, 75, és a 0, *POD*, *CSIB*, *CSID* indexek minden futtatás során elérik vagy meghaladják a 0,5-s értéket; míg a pontbeli, 75, és a 0, *FAR* indexek minden futtatás esetén kisebbek 0,4-nél. Egyedül a 0,4 alatti *POD*25 és a 0,6 feletti *FAR*25 értékek térnek el jelentősen ideális értékeiktől. Ezen értékek az esetszámokkal és a szélsőségekkel magyarázhatóak: a januári futtatások esetén anticiklon határozta meg hazánk időjárását: az ország nagy részét derült égbolt jellemezte, 19-én a délnyugati tájakon felhőzetet észleltek, 20-án és 21-én a délkeleti, keleti országrészben fordult elő köd [12 – OMSZ Napijelentés kiadvány]. Alapvetően a derült és a ködös területeket képes reprezentálni az áthelyezés (ezen állítást alátámasztják az előzőekben közölt értékek). Az 1-es, a 2-es és a 4-es futtatások esetén az átlagos szélsőségek (*aws*) értéke 10 m/s alatt volt, így a köd valótlán áthelyezése (természetesen a köd nem helyeződik át a valóságban) kevesebb hibát okozott (e futtatások legtöbb *POD*, *CSIB*, *CSID* indexe 0,7 feletti, míg a *FAR* indexeik 0,3 alatt vannak) A 3-as

futtatás átlagos szélessége 23,5 m/s (a magyarországi kivágoton szereplő szélességek és szélirányok szórása 0, azaz egyetlen szélvektor szerepelt a kivágoton, ami valószínűleg a ködréteg feletti vagy a kivágot határaihoz közel eső kevés felhőzet elmozdulásából származik). Ezen átlagos szélesség a ködréteg jelentős valótlán áthelyezését okozza, így a 3-as futtatás *POD*, *CSIB*, *CSID* értékei döntően alul, *FAR* értékei felülmúlják az 1-es, 2-es, 4-es, futtatások *POD*, *CSIB*, *CSID*, *FAR* értékeit. A februári futtatások HAWK ábrái hidegpárnás helyzetre utalnak. Bár a hidegpárna sem helyeződik át, azonban az átlag szélesség (az 5-ös, 6-os, 7-es futtatások esetén) 15 m/s alatt van, így a 3 órás kis áthelyezés kevés hibát okoz, ahogyan a 34. ábra is mutatja. Ezen az ábrán a 180 perces áthelyezett és a megfelelő valós felhő kép szerepel.



34. ábra: 2017. 02. 13. 11:55 UTC futtatás 180 perccel áthelyezett és a 14:55 UTC valós felhőt kép, forrás: OMSZ HAWK rendszer

A ködös és a hidegpárnás esetekben végzett futtatásokkal az volt a célom, hogy a nyári futtatásoktól (a lehető legjobban) eltérő időjárási helyzetekben teszteljem a nowcasting technikát és magát teljes kidolgozott eljárást. Az iméntiekben ismertetett esettanulmányok adtak néhány ötletet a további munkámhoz (pl.: ködös és hidegpárnás eseteket a perzisztencia módszerével is tervezem vizsgálni).

7 Összegzés

Munkám során témavezetőim segítségével egy egyszerű nowcasting technika algoritmusát dolgoztam ki. Majd ezen algoritmussal 47 futtatáson keresztül vizsgáltam a felhőzet áthelyeződését és az áthelyeződés közbeni megmaradási hajlamát. Eredményeket vizsgálva beláttam, hogy lokális hatások uralta konvektív helyzetekben nem beszélhetünk a felhőzet megmaradási hajlamáról. Szinoptikus skálájú jelenségek (pl.: hidegfront) esetén azonban a felhőzet áthelyeződés közben állandóságot mutat, így ezen helyzetekben van létjogosultsága e nowcasting technikának. Továbbá derült illetve hidegpárnás téli időjárási helyzetekben is a kívánt értékeket adta, így alkalmazhatónak tűnik. További terveim között szerepel több téli helyzet (más nowcasting technikával pl.: perzisztencia) vizsgálata. Továbbá jelen technikával a nyári helyzetek még részletesebb elemzése például labilitási indexek tekintetében. Az iméntiekén túl a jelenlegi borult és derült kategóriák több kategóriára tagolása, azaz 2 kategória helyett, több kategóriával is tervezek futtatásokat végezni.

Munkám rámutatott, hogy a (helyi hatások uralta helyzeteket leszámítva) a felhőzet áthelyeződése nem tekinthető kaotikusnak, hanem állandóságot mutat. Ebből következően a sugárzási mező változásai sem lehetnek kaotikusak, így további vizsgálatokat követően, érdemes lehet előrejelzési célú globálsugárzás-mérő hálózat megépítésével foglalkozni.

8 Köszönetnyilvánítás

Kiemelt köszönettel tartozom témám ötletgazdájának, Nagy Zoltánnak, aki munkám minden lépését támogatta, valamint mátrai erőmű látogatást, megbeszéléseket szervezet diplomamunkám elősegítéséért. Hálás vagyok Gróbné Szenyán Ildikónak, aki kiemelkedő türelemmel vezetett be a műholdas adatok feldolgozásának világába. Külön köszönet az Országos Meteorológiai Szolgálatnak a műholdas adatok rendelkezésemre bocsátásáért. Hálás vagyok konzulensemnek, Weidinger Tamásnak, aki hasznos ötletekkel, cikkek ajánlásával járult hozzá munkámhoz. Továbbá köszönettel tartozom Szűcs Mihálynak és a Mátrai Erőmű ZRt. munkatársainak a jelenleg operatívan alkalmazott globálsugárzás előrejelzések és azok felhasználásának megismertetéséért.

Nem feledkezhetek meg családomról, barátaimról, kollégáimról, főnökeimről sem akik, mindvégig biztatattak és türelmemmel várták munkám befejezését.

9 Irodalomjegyzék

- Bán B., 2015: *Globálsugárzás modellezése energetikai vizsgálatokhoz. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Weidinger T.) 50 p.*
- Cano, D., Monget, J-M., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N., Wald, L., 1986: *A method for the determination of global solar radiation from meteorological satellites data. Solar Energy, 37, 31-39.*
- Chen, T., Rossow, W. B., Zhang, Y., 1999: *Radiative Effects of Cloud type Variations. Journal of Climate, 13, 264-286*
- Chen, C., Duan, S., Cai, T., Liu, B., 2011: *Online 24-h solar power forecasting based on weather type classification using artificial neural network. Solar Energy, 85, 2856-2870.*
- Chow, C. W., Urquhart, B., Lawe, M., Dominiquez, A., Kleissl, J., Shields, J., Washom, B., 2011: *Intra-hour forecasting with a total sky imager at the UC San Diego solar energy testbed. Solar Energy, 85, 2881-2893.*
- Chow, C. W., 2015: *Cloud Characterization for Solar Forecasting Using Sky Imagery. PhD értekezés, University of California, San Diego (témavezető: Kleissl, J.) 111p.*
- Guillot, E. M., 2010: *Evaluating Satellite-Based Cloud Persistence and Displacement Nowcasting Techniques over Complex Terrain. PhD értekezés, Colorado State University, Fort Collins (témavezető: Vonder Haar, T. H.), 105 p.*
- Guillot, E. M., Vonder Haar, T. H., Forsythe, J. M., Fletcher, S. J., 2011: *Evaluating Satellite-Based Cloud Persistence and Displacement Nowcasting Techniques over Complex Terrain. Weather and Forecasting, 27, 502-514.*
- Hammer, A., Heinemann, D., Hoyer, C., Kuhlemann, R., Lorenz, E., Müller, R., Beyer, H. G., 2002: *Solar energy assessment using remote sensing technologies. Remote Sensing of Environment, 86, 423-432.*
- Hammer, A., Heinemann, D., Lorenz, E., Lücke, B., 1999: *Short-term forecasting of solar radiation: a statistical approach using satellite data. Solar Energy, 67, 139-150.*
- Heinemann, D., Lorenz, E., Girodo, M., 2004: *Forecasting of Solar Radiation. Előadás, International Workshop on Solar Resource from the Local Level to Global Scale in Support of the Resource Management of Renewable Electricity Generation, Ispra, Olaszország.*
- Huang, J., Korolkiewicz, M., Agrawal, M., Boland, J., 2013: *Forecasting solar radiation on an hourly time scale using a Coupled AutoRegressive and Dynamical System (CARDS) model. Solar Energy, 87, 136-149.*
- Juhász Á., Láng I., Blaskovics Gy., Mika J., Szépszó G., Horányi A., Dobi I., Nagy Z., 2009: *Megújuló energiák. Sprinter, Budapest. 265p.*
- Kincses P., 2017: *KÁT pótdíj átalakítás. Előadás, NFM Workshop, Budapest.*
- Kolláth K., Simon A., Pátkai Zs., Fejes E., Horváth Á., Kiss M., Németh M., Fehér B., Szabó D., 2017: *Felhőatlasz. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 312 p.*

- Lorenz, E., Heinemann, D., Hammer, A., 2004: *Short-term forecasting of Solar Radiation Based on Satellite Data*. Előadás, Eurosun Konferencia, Freiburg, Németország.
- Mathiesen, P., Kleissl, J., 2011: *Evaluation of numerical weather prediction for intra-day solar forecasting in the continental United States*. *Solar Energy*, 85, 967-977.
- Molnár Cs., 2015: *A rövidhullámú sugárzás modellezése komplex felszínek felett*. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Weidinger T.). 57 p.
- Morcrette, J.-M., 1991: *Radiation and cloud radiative properties in the European Center for Medium Range Weather Forecasts forecasting system*. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 96, 9121-9132.
- Nagy Z., 2014: *Napfénytartam globálsugárzási adatokból történő számításának módszertana*. *Légkör*, 59, 175-180.
- Nagy Z., Dobos A., Rácz Cs., 2015: *A napsugárzás mérések szerepe a napenergia előrejelzésében*. Előadás, OMSZ, Meteorológiai Tudományos Napok, Budapest.
- Nurmi, P., 2003: *Recommendations on the verification of local weather forecast*. ECMWF Technical Memoranda.
- Perez, R., Lorenz, E., Pelland, S., Beauharnois, M., Knowe, G. V., Hemker, Jr. K., Heinemann, D., Remund, J., Müller, S. C., Traunmüller, W., Steinmauer, G., Pozo, D., Ruiz-Arias, J. A., Lara-Fanego, V., Ramirez-Santigosa, L., Gaston-Romero, M., Pomares, L. M., 2013: *Comparison of numerical weather prediction solar irradiance forecasts in the US, Canada and Europe*. *Solar Energy*, 94, 305-326.
- Szintai B., Mile M., Bölöni G., Szűcs M., Lancz D., 2014: *AROME modell az Országos Meteorológiai Szolgálatnál: operatív alkalmazás és aktuális fejlesztések*. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 25, 38-44 p.
- Tóth Z., 2009: *A légkör rövidhullámú sugárzásátbocsátásának hosszú távú változása Budapest felett*. *Magyar Tudomány*, 170, 428-440.
- Tóth Z., Nagy, Z., Szintai, B., 2017: *Verification of global radiation fluxes forecasted by numerical weather prediction modell AROME for Hungary*. *Időjárás*, 121, 189-208.
- Tymvios, F. S., Jacovides, C. P., Michaelides, S. C., Scouteli, C., 2005: *Comparative study of Ångström's and artificial neural networks' methodologies in estimating global solar radiation*. *Solar Energy*, 78, 752-762.
- Voyant, C., Muselli, M., Paoli, C., Nivet, M.-L., 2013: *Hybrid methodology for hourly global radiation forecasting in Mediterranean area*. *Renewable Energy*, 53, 1-11.
- Wild, M., Folini, D., Schär, C., Loeb, N., Dutton, E. G., König-Langolo, G., 2012: *The global energy balance from a surface perspective*. *Climate Dynamics*, 40, 3107-3134.

Internetes hivatkozások

- [1 – EUMETSAT honlap]
<https://www.eumetsat.int/website/home/index.html>
- [2. – MAVIR termelési terv]
<https://www.mavir.hu/web/mavir/termelesi-terv>
- [3 – MAVIR dokumentum1]
https://www.mavir.hu/documents/10258/107827/389-2007-_-xii-_23--_korm-_rendelet-1_20171001_korn.pdf/52bff97e-63b3-45e3-a837-a2e16a4e1d6e
- [4 – MAVIR dokumentum2]
https://www.mavir.hu/documents/10258/107827/389-2007-_-xii-_23--_korm-_rendelet-1_20180701.pdf/68659964-ae5f5-46f0-b951-0815b948e6f7FF
- [5 – Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek jegyzet]
<http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/MeteorologiaiMuszerekEsMerorendszerek/index.html>
- [6 – Légköri sugárzástan jegyzet]
http://nimbus.elte.hu/~acs/pdf/OKTATAS/legkori_sugarzastan.pdf
- [7 – EUMETSAT felhő produktum leírás]
http://www.nwcsaf.org/documents/20182/30662/NWC-CDOP2-GEO-MFL-SCI-ATBD-Cloud_v1.1.pdf/a5bb6eca-871b-4707-9c76-e0be09915d94
- [8 – NASA Earth Observatory honlap]
<https://earthobservatory.nasa.gov/Features/Clouds/clouds5.php>
- [9 – OMSZ EUMETSAT ismertető]
http://www.met.hu/ismertetok/EUMETSAT_produkulum_ismerteto.pdf
- [10 – EUMETSAT szél produktum leírás]
http://www.nwcsaf.org/documents/20182/30801/NWC-CDOP2-GEO-AEMET-SCI-ATBD-Wind_v1.1.pdf/f315644d-4b19-49bd-a387-f2c4e0049bde
- [11 – Gömbháromszögtani számítások segédlet]
www.agt.bme.hu/staff_h/varga/vetulettan/1hf.doc
- [12 – OMSZ Napijelentés kiadvány]
http://www.met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/napijelentes/