



34. METEOROLÓGIAI TUDOMÁNYOS NAPOK

Az időjárás előrejelzés korszerű módszerei és alkalmazási területei



Riesztás



Várható időjárás péntekestig:

Ma többször lesz erősen felhős az ég, és szórványosan várható eső, zápor, néhol zivatar is lehet, majd éjszaka csöndben a felhőzet.

Holnap kezdetben változóan felhős lesz az ég, majd napközben kelet felől ismét erősen meggyűrűszik a felhőzet, és ott szórványosan a Dumánál csak néhol alakulhat ki zápor. Az északi szél többfelé megerősödik, éjszaktól helyenként viharosá fokozódik.

A legalacsonyabb éjszakai hőmérséklet 1, 6, a legmagasabb nappali hőmérséklet pénteken 12 és 17 órák között alakul.

Meteorológiai előrejelzés Budapest térségére

#

Dátum: ÉvHóNap Óra [UT C]

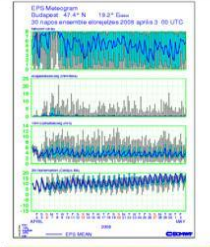
1. hőmérséklet [C]

2. megvilágítás [lux]

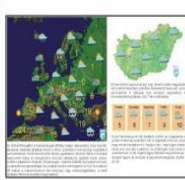
3. megvilágítás 6 óras összeg [Ws/m2]


#

# Dátum	1.	2.	3.
#			
20080410 06	12.7	10	0
20080410 07	14.1	42	0
20080410 08	15.5	42	0
20080410 09	17.0	42	0
20080410 10	17.3	33	0
20080410 11	17.7	33	0
20080410 12	18.1	33	0
20080410 13	18.0	28	0
20080410 14	18.0	28	0
20080410 15	17.9	28	0
20080410 16	16.9	11	0
20080410 17	15.9	11	0
20080410 18	14.9	11	0
20080410 19	14.2	0	0
20080410 20	13.6	0	0
20080410 21	12.9	0	0
20080410 22	12.6	0	0
20080410 23	12.2	0	0
20080411 00	11.9	0	0



EPE Meteorológiai Szolgálat
Budapest, 47°47' N 19°3' E
30 napos előrejelzés országosan 2008. április 7. 00 UTC





Országos Meteorológiai Szolgálat

Budapest, 2009.

34. Meteorológiai Tudományos Napok

MTA Meteorológiai Tudományos Bizottsága

A rendezvény szervezője:
MTA MTB Légekördinamikai Munkabizottsága

A kiadványt szerkesztette: Weidinger Tamás



Kiadja az Országos Meteorológiai Szolgálat
Kiadásért felel: Bozó László, az OMSZ elnöke

Budapest, 2009.

TARTALOMJEGYZÉK

Tartalomjegyzék	3
Előszó	5
A 34. Meteorológiai Tudományos Napok programja	6
Tasnádi Péter <i>A légköri instabilitások szerepe az időjárási rendszer fejlődésében</i>	8
Sallai Márta <i>Az OMSZ időjárás-előrejelző rendszere</i>	27
Horányi András <i>Egységes időjárási és éghajlati előrejelző rendszer kifejlesztése az Országos Meteorológiai Szolgálatnál</i>	39
Hágel Edit <i>Ensemble előrejelzések: elméleti és gyakorlati háttér</i>	53
Zsótér Ervin <i>A nemzetközi együttműködések szerepe a hazai időjárás előrejelzésben</i>	63
Práger Tamás és Reisz András <i>A számszerű és szinoptikus előrejelzések elméleti hátterének fejlődéséről</i>	73
Kullmann László <i>Az ALADIN numerikus előrejelző modell a rövidtávú előrejelzés szolgálatában</i>	74
Horváth Ákos, Geresdi István, Németh Péter, Ács Ferenc és Seres András Tamás <i>Veszélyes időjárási jelenségek (NOWCASTING)</i>	84
Ihász István <i>Közép- és hosszútávú előrejelzési modell-produktumok és alkalmazási lehetőségeik</i>	97
Bonta Imre <i>A rövid- és a középtávú időjárás előrejelzés gyakorlati módszertana</i>	113
Hirsch Tamás <i>Az előrejelzések bevétele, szinoptikus-klimatológiai vizsgálatok</i>	127

Kovács László <i>A meteorológiai előrejelzések szerepe a honvédelemben, a NATO meteorológiai támogatási rendszere</i>	128
Koncsos László <i>A meteorológiai előrejelzések hidrológiai alkalmazásai Valószínűségi előrejelzések kockázatának elemzése</i>	136
Sándor Valéria és Ruzsiczky Pál <i>Jelent-e az időjárás veszélyt a repülés számára?</i>	137
Mészáros Róbert, Lagzi István László, Ferenczi Zita, Steib Roland és Kristóf Gergely <i>Skálafüggő légszennyezettség előrejelzések</i>	144
Bedő Albin Zoltán <i>Meteorológiai előrejelzések felhasználói szemmel</i>	155
H. Bóna Márta és Reisz András <i>Médiameteorológia–2008</i>	156
Major György <i>Fiatal Éghajlatkutatók Fóruma A Magyar Meteorológiai Társaság tudományos pályázata</i>	168
A Meteorológiai Tudományos Napok konferenciasorozat eddigyi rendezvényei, az előadaskötetek és a CD-k adatai	170

ELŐSZÓ

A Meteorológiai Tudományos Napok a meteorológus közösség hagyományos ünnepi rendezvénye 1975 óta. A Magyar Tudományos Akadémián november harmadik hetében megrendezésre kerülő két napos konferencia része a Magyar Tudomány Napja rendezvényt sorozatnak. Az eseményt az MTA Meteorológiai Tudományos Bizottsága szervezi.

A 2008-as tudományos napok témája „Az időjárás előrejelzés korszerű módszerei és alkalmazási területei” volt. Az időjárási előrejelzések iránti igény, a viharjelzések, vagy a repülésmeteorológiai tájékoztatás nyújtotta egyre nagyobb biztonság mindennapjaink részévé vált. A téma fontosságát jelezte az Akadémia nagytermét megtöltő hallgatóság, az MTA vezetőinek, illetve a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium szakembereinek részvétele a konferencia megnyitóján.

Hasonló témakörben, 2003-ban szerveztünk tudományos napokat. Így mód volt a számvetésre, a szakma fejlődésének a bemutatására. Ezért is tartotta fontosnak az Országos Meteorológiai Szolgálat, hogy az előadások anyagát, hagyományainknak megfelelően, az OMSZ honlapján is megjelentesse.

Összesen 17 előadás hangzott el. Az első, elméleti előadás a légköri instabilitások leírásával és az időjárási rendszerek fejlődésében játszott szerepével foglalkozott. Ezután került sor az OMSZ előrejelzési rendszerének, modellfejlesztési eredményeinek, hazai és nemzetközi kapcsolatrendszerének bemutatására. E szerteágazó K+F tevékenység a hatékony időjárás előrejelzést szolgálja. Hat délutáni előadás mutatta be az OMSZ időjárás-előrejelző rendszerét az ultrarövidtávú vihar- és veszélyjelzésektől a szinoptikus klimatológiai vizsgálatokig. A rendezvény második napja az alkalmazásoké, az időjárás előrejelzések gyakorlatban történő hasznosításáé volt. Hallottunk a katonameteorológiáról, a hidrológiai és környezetvédelmi előrejelzésekről, a célzott modellfejlesztésekről, de nem maradhatott ki a repülésmeteorológia, az ipari alkalmazások széles köre, valamint a médiameteorológia sem.

Az előadásokból is kitűnt, hogy az időjárás-előrejelző szakemberek fontos munkát végeznek, s naponta vizsgáznak a nagyközönség előtt jó eredménnyel.

Hagyományteremtő szándékkal került sor a rendezvényen a „Fiatal Éghajlatkutatók Fóruma” szakmai pályázat eredményhirdetésére. A téma az éghajlat, illetve a globális éghajlatváltozás regionális hatásainak elemzése volt. A bírálóbizottság öt szerzőt jutalmazott ösztöndíjjal.

Reméljük, hogy a 2008-as Meteorológiai Tudományos Napok előadásait tartalmazó kiadvány olvasásával új és hasznos ismeretekkel gazdagodnak. Köszönjük az előadóknak, a konferencia szervezőinek a színvonalas szakmai munkát és a kiadvány elkészítését.

2009. szeptember 1.

Bozó László akadémikus

elnök

Országos Meteorológiai Szolgálat

34. METEOROLÓGIAI TUDOMÁNYOS NAPOK

Az időjárás előrejelzés korszerű módszerei és alkalmazási területei

Az ülések időpontja: 2008. november 20–21.

**Az ülések helye: az MTA Nagyterme
Budapest V., Roosevelt tér 9.**

AZ ÜLÉSEK PROGRAMJA

November 20-án 10:00 – 12:40 óra

Elnök: Bozó László

Tasnádi Péter: A légköri instabilitások szerepe az időjárási rendszerek fejlődésében

Sallai Márta: Az OMSZ időjárás-előrejelző rendszere

Horányi András: A numerikus előrejelző modellek fejlesztése és alkalmazása az Országos Meteorológiai Szolgálatnál

Szünet (11:30 – 11:50)

Hágel Edit: Ensemble előrejelzések: elméleti és gyakorlati háttér

Zsótér Ervin, Radnóti Gábor és Kertész Sándor:

A nemzetközi együttműködések szerepe a hazai időjárás előrejelzésben

Ebédszünet (12:40 – 13:45)

November 20-án 13:45 – 16:45 óra

Elnök: Haszpra László

Práger Tamás és Reisz András:

A számszerű és szinoptikus előrejelzések elméleti hátterének fejlődéséről

Kullmann László:

Az ALADIN numerikus előrejelző modell a rövidtávú előrejelzés szolgálatában

Horváth Ákos, Geresdi István, Németh Péter, Ács Ferenc és Seres András:

Veszélyes időjárási jelenségek előrejelzése (nowcasting)

Szünet (15:10 – 15:30)

Ihász István:

Közép- és hosszútávú előrejelzési modell-produktumok és alkalmazási lehetőségeik

Bonta Imre: A rövid- és középtávú időjárás előrejelzés gyakorlati módszertana

Hirsch Tamás: Az előrejelzések bevétele, szinoptikus-klimatológiai vizsgálatok

November 21-én 9:30 – 12:40 óra

Elnök: Major György

A „Fiatal Éghajlatkutatók Fóruma” című pályázat eredményhirdetése

Kovács László: A meteorológiai előrejelzések szerepe a honvédelemben

Koncsos László: A meteorológiai előrejelzések hidrológiai alkalmazásai

Sándor Valéria és Ruzsiczky Pál: Jelent-e az időjárás veszélyt a repülés számára?

Szünet (11:00 – 11:20)

Mészáros Róbert, Lagzi István, Ferenczi Zita, Steib Roland és Kristóf Gergely:

Skálafüggő légszennyezettség előrejelzések

H. Bóna Márta és Reisz András: Médiameteorológia–2008

Bedő Albin Zoltán: Meteorológiai előrejelzések felhasználói szemmel

Zárszó

The development of numerical methods, even to the extent of direct attack using observed data, does not absolve us from the necessity of under-standing the precise significance of our solutions.

Eady, 1951

A légekri instabilitások szerepe az időjárás rendszer fejlődésében

Tasnádi Péter

ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A, e-mail: tasi@ludens.elte.hu

Összefoglaló – A napi időjárást a rövidebb-hosszabb időre stabilizálódó légekri áramlások szabják meg. Az időjárás változásához az alapáramlás megváltozása vezet. Az előrejelzés szempontjából igen fontos tehát az alapáramlás instabilitásainak vizsgálata. Az előadásban röviden áttekintjük a légekri dinamika néhány fontos instabilitás típusát. Foglalkozunk a hidrosztatikai, tehetetlenségi, és a szimmetrikus instabilitással, továbbá az előrejelzés szempontjából talán két legfontosabb instabilitás-típussal a barotrop és a baroklin instabilitással. A tárgyalt instabilitási típusokat szemléletesen, a fizikai folyamatokat kiemelve elemizzük. A matematikai leírás lehetőségét egyszerű, idealizált modellekkel illusztráljuk. Végül röviden kitérünk a barotrop és a baroklin instabilitás energetikai vonatkozásaira is. A matematikai leírásban a részecske módszer mellett alapvetően a linearizált egyenletek normál módus vizsgálataira támaszkodunk.

Bevezetés

A légekri mozgásrendszerek alapvető tulajdonságait a földi viszonyok jellegzetességei szabják meg. Az időjárás szempontjából fontos folyamatok a Földet körülvevő keskeny levegőhéjban, a troposzférában zajlanak le. A troposzféra történéseit a levegőréteg vékonysága mellett döntően megszabja, hogy a mozgás „forgó gömbön” történik. Alapvető jelentőségű továbbá, hogy a napsugárzás a Földet egyenetlenül melegíti, ezért a légekri folyamatokban indulnak áramlások, amelyek ideig-óráig stabilizálódhatnak, de véglegesen nem válhatnak stacionáriussá. A légekri áramlásainak belső tulajdonsága az instabilitás. Nyilvánvaló, hogy a légekri mozgások teljes rendszerének egységes leírása igen bonyolult feladat, ezért csak a választott feladatnak megfelelő egyszerűsítő feltételek bevezetésével felépített modellek vizsgálatával foglalkozunk (skálafüggő modellezés).

Elméleti szempontból a légekri áramlásait a Navier-Stokes-egyenletek megfelelő határfeltételek mellett vett megoldásai írják le. A differenciál-egyenletrendszer megoldására napjainkban már hatékony numerikus módszerek állnak rendelkezésre. A numerikus megoldások azonban gyakran elfedik a folyamatok megértéséhez vezető gondolatmenetet. Ezért is választottuk mottóul Eady sorait, aki már a numerikus módszerek kifejlesztésének hajnalán figyelmeztetett arra, hogy bármennyire pontos számítástechnikai eljárások álljanak is rendelkezésünkre, nem menthetjük fel magunkat a

megoldások pontos tartalmának megértése alól. Jelen dolgozatban néhány ilyen, a légköri folyamatok természetének megértését segítő és az előrejelezhetőség kérdését megvilágító folyamatot taglalunk.

A Navier-Stokes-egyenletek felírásakor a vizsgálandó feladat kijelölését, illetve a lehetséges egyszerűsítések bevezetését, megkönnyíti, hogy a légköri mozgásrendszerekben – a légköri energetikai ismereteink alapján is – jellegzetes, egymástól viszonylag jól elkülönülő tartományok találhatók (*Green, 1999; Lilly, 1986; Wiin-Nielsen és Chen, 1993; Práger, 1982*). A mozgásrendszerek között kiemelt szerepet játszanak a periodikus mozgások, egyrészt, mert a Föld pályamenti mozgása és forgása is természetes periódust visz a légköri folyamatokba, másrészt mert a matematikai leírás során jól felhasználható a függvények periodikus függvények szuperpozíciójával való előállítás. Azonban még az így kapott egyszerűsített egyenletek megoldásainak többsége sem ad stacionárius mozgást, továbbá a stacionárius megoldások is csak akkor maradhatnak fenn, ha a természetes körülmények között, biztosan keletkező kicsiny fluktuációkkal szemben stabilisak. Ha egy áramlás a kicsiny perturbációkkal szemben instabilis, akkor e fluktuációk amplitúdója térben és időben növekszik.

Adott áramlás megváltozása két alapvető problémát vet fel. Az egyik: hogyan állapítható meg hogy milyen alapáramlásra rakódó fluktuációk növekedésével írhatjuk le az instabilitást, a másik: az instabilitás bekövetkezésének és fejlődésének a kérdése.

A fluktuációmentes állapot leírása rendkívül nehéz és összetett feladat. Az áramlási kép megfigyelése és az átlagos áramlás meghatározása megadhat ugyan valamilyen alapállapotot, azonban nehéz megindokolni, hogy éppen ezt az átlagos áramlást tesszik instabilissá a fluktuációk. Általában az átlagos áramlás már tartalmazza a fluktuációk hatását, pontosabban azoknak a fluktuációknak a hatását, amelyek az (ismeretlen) kiinduló állapotot stabilizálják. Így az átlagos állapot többnyire stabilisabb, mint a kiinduló állapot, amelynek perturbációit vizsgáljuk.

Hasonlóképpen nehéz probléma a fluktuációk hatásának vizsgálata. Az áramlást instabilissá tevő perturbációk fejlődése ugyanis csak rövid ideig írható le a szokásos linearizációs eljárásokkal, a nemlineáris hatások figyelembevételére azonban többnyire nem rendelkezünk megfelelő eljárásokkal. Mégis az idealizált kezdeti áramlás kis fluktuációkkal szembeni lineáris stabilitásvizsgálata nagyban hozzásegít bennünket a légköri folyamatok pontosabb megértéséhez.

Az instabilitások létezése szoros kapcsolatban van az előrejelezhetőséggel is. A stabilis áramlások változása a peremfeltételek ismeretében jól leírható, így ezek az áramlások viszonylag pontosan előrejelezhetőek. Az instabilis áramlások fluktuációi gyorsan növekedhetnek és az alapul választott áramlás kis megváltoztatása esetén is „divergensen fejlődhetnek”. Az instabilis áramlások változásait tehát nehéz pontosan „megjósolni”. Az instabilis áramlás egyes részei azonban időben és térben lokálisan stabilissá válhatnak, így ha korlátozottan is de viselkedésük előrejelezhetővé válik. Ilyen esetekben is fontos azonban azoknak a fluktuációknak a felismerése, amelyek az időleges stabilitást leronthatják.

A következőkben alapáramlásként döntően zonálisan homogén áramlást tételezünk fel. A nagytérségű folyamatok leírásában hidrosztatikus feltételezéssel élünk. Az instabilitásokat a normál módusok módszerével, illetve esetenként a részecske módszerrel vizsgáljuk.

A hidrosztatikai, a tehetetlenségi és a szimmetrikus instabilitás

A hidrosztatikai és a tehetetlenségi instabilitás a részecske módszerrel modellezhető legegyszerűbben. E két folyamat leírása közismert (Götz és Rákóczi, 1981), ezért itt rendkívül röviden és csak azért foglalkozunk velük, hogy megkönnyítsük a kevésbé ismert, de a meteorológiai folyamatokban fontos szimmetrikus instabilitás megértését.

Hidrosztatikai instabilitás

Ez az instabilitás akkor következik be, ha a környezetével egyensúlyban lévő vertikálisan kimozdított légrészre ható erők a légréoszt egyensúlyi helyzetétől tovább távolítják, azaz a légrész sűrűsége kisebbé válik, mint környezetéé. A részecske elmélet alapján alapállapotnak ilyenkor a légrész nyugvó, átlagos makrokörnyezetét tekintjük. Feltételezzük, hogy a vizsgált légtömeg és a környezet nyomása mindig azonos, valamint, hogy a légrész mozgása adiabatikus, azaz potenciális hőmérséklete állandó. A stabilitási feltétel egyszerűen megfogalmazható a vizsgált részecske megmaradó tulajdonságának, potenciális hőmérsékletének (θ) segítségével. A részecske mozgásegyenlete

$$\frac{dw}{dt} = B$$

alakban írható fel, ahol w a vertikális sebesség, $B = g \frac{\theta^*}{\theta_0}$ pedig a felhajtóerő.

A felhajtóerőt itt a sűrűség helyett a környezet θ_0 átlagos potenciális hőmérsékletével és a részecske potenciális hőmérsékletének az átlagostól vett θ^* eltéréssel fejeztük ki. Ebből a mozgásegyenlet deriválásával és a felhajtóerő megadott kifejezésének felhasználásával a sebességre a

$$\frac{d^2w}{dt^2} + wN_0^2 = 0$$

egyenlet adódik, amelyben

$$N_0^2 \equiv \left| \frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial z} \right|$$

az ún. Brunt-Väisälä-körfrekvencia négyzete. Amennyiben $\theta_{0,z} > 0$, akkor a mozgás stabilis, a részecske a Brunt-Väisälä-körfrekvenciával végez rezgéseket egyensúlyi helyzete körül. Ha $\theta_{0,z} < 0$, akkor a mozgás instabilis, a részecske egyensúlyi helyzetétől a

$$w = \hat{w} e^{i\sqrt{N_0^2}t}$$

összefüggés szerint távolodik. Megjegyezzük, hogy $\theta_{0,z}$ a folyadékdinamikában használt jelölésnek megfelelően θ_0 z szerinti deriváltját jelenti.

Tehetetlenségi instabilitás

Tehetetlenségi instabilitásról akkor beszélünk, ha a geosztrofikusan kiegyensúlyozott áramlás zavaraival szemben a Coriolis-erő jelenti a horizontális visszatérítő erőt. Példaként tekintsünk olyan zonális, geosztrofikus áramlást, amelynek sebessége csak az y koordinátától függ, azaz a keleti irányú áramlásban horizontális szélnyírás van (Houze, 1993; Knox, 2003). Ekkor az áramlás sebessége az

$$u_g = -\frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad v_g = 0$$

geosztrofikus sebesség, továbbá $w=0$, $\frac{\partial p}{\partial x}=0$. Ha az y_0 (az egyszerűség kedvéért legyen $y_0=0$) helyen egyensúlyban lévő részecskét a $t=0$ időpillanatban az y helyre mozdítjuk úgy, hogy a változás a nyomásviszonyokat nem befolyásolja, akkor ettől a pillanattól kezdve a részecske gyorsuló mozgást végez. Az x irányú gyorsulást a nyomási gradiens eltűnése miatt a Coriolis-erő megfelelő komponense, az y irányút pedig az ageosztrofikus sebességből származó Coriolis-erő szabja meg:

$$\frac{du}{dt} = fv = \left(f \frac{dy}{dt} \right),$$

$$\frac{dv}{dt} = -f(u(y) - u_g(y)).$$

Az első egyenletből látszik, hogy a részecske mozgása során az abszolút impulzus megmaradó mennyiség lesz:

$$M = u(y) - fy = \text{constans}.$$

Mivel a részecske környezetében az alapáramlás geosztrofikus, az abszolút impulzust ott az $M_0 = u_g(y) - fy$ kifejezés adja meg. A környezet abszolút impulzusa általában változik, csak speciális esetben lehet megmaradó mennyiség. Vegyük észre azonban, hogy a vizsgált részecske egyensúlyi helyzetében a két impulzus megegyezik, azaz $M(0) = M_0(0)$. Ennek felhasználásával a második mozgásegyenletet a

$$\frac{dv}{dt} = -f(M(y) - M_0(y))$$

alakra hozhatjuk, majd a környezet impulzusát az egyensúlyi helyzet környezetében sorbafejtve és felhasználva, hogy $M(0) = M_0(0)$, azt kapjuk, hogy

$$\frac{dv}{dt} = -f \frac{\partial M_0(0)}{\partial y} y,$$

azaz

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -f \frac{\partial M_0(0)}{\partial y} y.$$

A mozgásegyenletből leolvasható, hogy $M_{0,y} < 0$ esetén ($M_{0,y}$ az M_0 y szerinti deriváltja) a mozgás instabilis. Ebben az esetben a mozgásegyenlet megoldása $v \cdot \exp(i\alpha t)$ alakú, ahol

$$\alpha = \pm \sqrt{-f \frac{\partial M_0}{\partial y}} = \pm \sqrt{f \left(f - \frac{\partial u_g}{\partial y} \right)}.$$

A tehetetlenségi instabilitás leírása a horizontális síkban analóg eredményre vezet a vertikális síkban bekövetkező hidrosztatikai instabilitásával. Az instabilitás bekövetkezése mindkét esetben attól függ, hogy az individuális részecskemozgás esetén megmaradó mennyiség (abszolút impulzus, potenciális hőmérséklet) hogyan változik a környezetben.¹

Az egyenletek azt mutatják, hogy tehetetlenségi instabilitás akkor alakulhat ki, ha az anticiklonális relatív örvényesség adott helyen meghaladja a planetáris örvényességet. Ez a tapasztalat szerint az alacsony szélességeken következhet be.

Szimmetrikus instabilitás

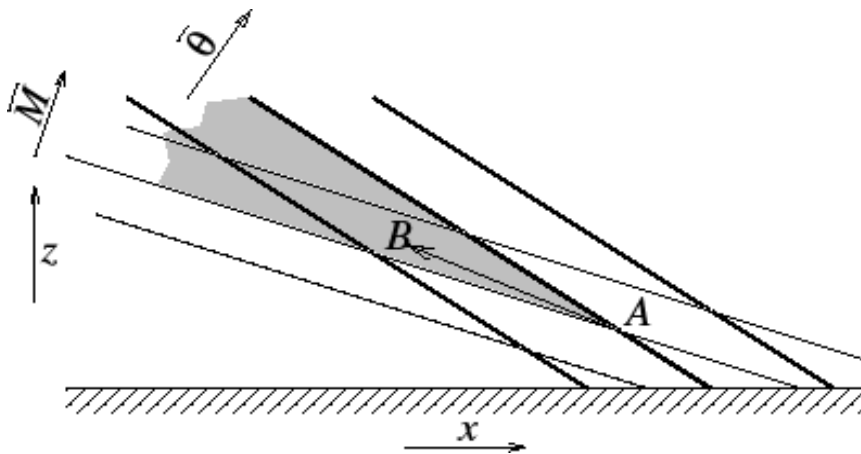
Mind a hidrosztatikai, mind a tehetetlenségi instabilitás esetén a vizsgált individuális légréz elmozdulását síkbeli mozgásra korlátoztuk. Érdekes eredményre jutunk, ha a két lehetséges instabilitási típust együttesen vizsgáljuk (Houze, 1993; Grotjahn, 2003). Ekkor a légréz egyensúlyi helyzetéből való kimozdulása természetesen már térben történhet. Kiindulásként tekintsünk olyan helyzetet, ahol sem hidrosztatikai, sem tehetetlenségi instabilitás nem következhet be, azaz a légköri rétegződést $\theta_{0,z} > 0$ és $M_{0,y} > 0$ jellemzi. Ebben az esetben a vertikálisan kimozduló légréz az egyenlet szerint egyensúlyi helyzete körül harmonikus rezgéseket végez, s hasonlóan viselkedik a horizontálisan elmozduló légréz is. Vizsgáljuk most az egyensúlyi helyzetéhez képest térben kimozdí-

¹ A tehetetlenségi instabilitást megszabó $-\frac{\partial M_0}{\partial y} = f - \frac{\partial u_g}{\partial y}$ mennyiség megegyezik az abszolút örvényességgel. Általánosan is igaz, hogy az alapáramlás abszolút impulzusának horizontális nyírása megegyezik az alapáramlás abszolút örvényességével.

tott légréteg viselkedését. Tételezzük fel, hogy az abszolút impulzus magassággal való változására és az abszolút impulzus horizontális változására teljesül hogy

$$N^2 = \frac{g}{\theta} \theta_{0,z} > 0 \quad (\theta_{0,z} > 0) \quad \text{és} \quad M_{0,y} > 0,$$

azaz a környezet rétegződése mind a hidrosztatikai, mind a tehetetlenségi instabilitás szempontjából stabilis. Olyan helyzetet vizsgálunk, ahol a potenciális hőmérséklet izovonalai a függőleges síkban a pozitív y irányhoz képest erősebben dőlnek, mint az abszolút impulzus izovonalai (lásd az 1. ábrát). Azt vizsgáljuk, hogy mi történik az A pontból B-be mozdított és magára hagyott részecskével ebben a környezetben (1. ábra). A vertikálisan (pozitív irányba) elmozduló részecske eredeti potenciális hőmérsékleténél alacsonyabb potenciális hőmérsékletű környezetbe kerül, azaz magára hagyva tovább távolodik egyensúlyi helyzetétől. Horizontálisan a részecskére „visszatérítő erő” hat.



1. ábra. A szimmetrikus instabilitás kialakulása. Kövessük az A pontból B-be mozgó részecskét! A vastag fekete izovonalak az átlagos potenciális hőmérsékletet ($\bar{\theta}$), a vékony fekete izovonalak pedig az átlagos abszolút impulzus (\bar{M}) értékeit mutatják.

Megállapítható azonban, hogy annak ellenére, hogy a légköri környezetben mind hidrosztatikai, mind horizontális szélnyírási szempontból stabilis viszonyok uralkodnak, bekövetkezhetnek olyan fluktuációk, amelyekre nézve az áramlás instabilis (Houze, 1993).

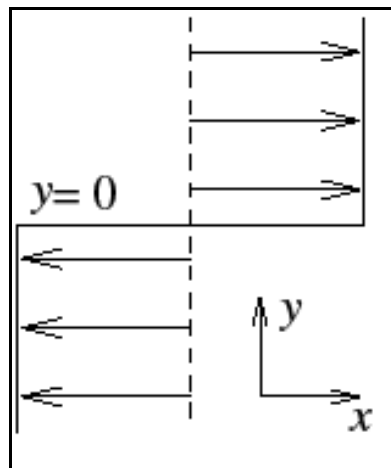
Nyírási instabilitások

Kelvin-Helmholtz-instabilitás

A meteorológiai szempontból legfontosabb instabilitásokat a szélnyírási, döntően a vertikális szélnyírási hozza létre. Az ilyen típusú instabilitások legegyszerűbb és legtisztábban megfogalmazott esete az ún. Kelvin-Helmholtz-féle instabilitás, amelynek részletes leírása a hidrodinamika és a dinamikus meteorológia bevezető tankönyveinek többségében megtalálható (Drazin és Reid, 1981; Panchev, 1985; Grotjahn, 2003).

A nyírási instabilitások megértéséhez érdemes felidézni az ezzel kapcsolatos legfontosabb eredményeket, mert ismeretük megkönnyíti a barotrop és a baroklin instabilitás megértését.

A Kelvin-Helmholtz-instabilitás legegyszerűbb esetében az áramló folyadék sűrűsége állandó és az alapáramlásban a folyadék átlagsebességére merőleges nyírás tapasztalható. (Amennyiben a nyírás a horizontális síkba esik, akkor ez egyben a barotrop instabilitás alapesete is.) Tegyük fel továbbá, hogy a nyírás a 2. ábrának megfelelően a $y = 0$ síkban fellépő sebességugrásban nyilvánul meg.



2. ábra. A horizontális szélnyírás sematikus képe a Kelvin-Helmholtz-féle instabilitás leírásához.

Ez az áramlás kielégíti az Euler-féle egyenletet (Acheson, 1990), és kis perturbációk esetén a linearizált egyenlet az $y > 0$ tartományban a

$$v'_{i,t} + Uv'_{i,x} = -p'_i$$

alakot ölti ($y < 0$ esetén az alapáramlás sebességének helyére $-U$ kerül). Fennáll továbbá, hogy a sebességmező $v'_{i,i}$ divergenciája zérus. (A vesszős jelölés a fluktuációkra illetve a kis perturbációkra utal. A sűrűség egységnyi.) Ekkor a sebesség-komponensek és a nyomás perturbációk normál módusai $\alpha(z) \exp(ik(x-ct))$ alakban írhatók fel. A linearizált mozgásegyenlet divergenciáját képezve adódik, hogy a nyomás perturbáció kielégíti a Laplace-egyenletet, aminek a megoldása

$$p' = \begin{cases} p_1 \exp(i(kx - ky)) \exp(\sigma t) & y > 0 \\ p_2 \exp(i(kx + ky)) \exp(\sigma t) & y < 0 \end{cases}$$

alakú. Figyelembe véve továbbá, hogy a határfelületre merőleges sebesség megegyezik a határfelület y irányú sebességével, a diszperziós relációra $\sigma = \pm kU$, adódik, ami azt jelenti, hogy a perturbációnak mindig lesz exponenciálisan növekvő része. Következésképpen ebben az esetben az áramlás mindig instabilis.

Általánosabb és több valóság tartalmú, ha olyan síkáramlást vizsgálunk, ahol a nyírás sebességugrás nélkül áll elő. Az instabilitás vizsgálatot a Squire-tétel (Kundu és Cohen, 2008) értelmében elegendő kétdimenziós áramlásra korlátozni, mivel tetszőleges párhuzamos kétdimenziósan nyírt háromdimenziós áramlásban a leginkább instabil perturbáció kétdimenziós. A tárgyalást ebben az esetben egyszerűsíti, hogy bevezethető a kétdimenziós divergencia eltűnését automatikusan kielégítő áramfüggvény. Összenyomhatatlan folyadék esetén az örvényesség ebben az áramlásban állandó. Az örvényesség perturbációjára vonatkozó linearizált egyenlet ennek megfelelően az

$$\zeta'_t + U\zeta'_{,x} - v'U_{,yy} = 0$$

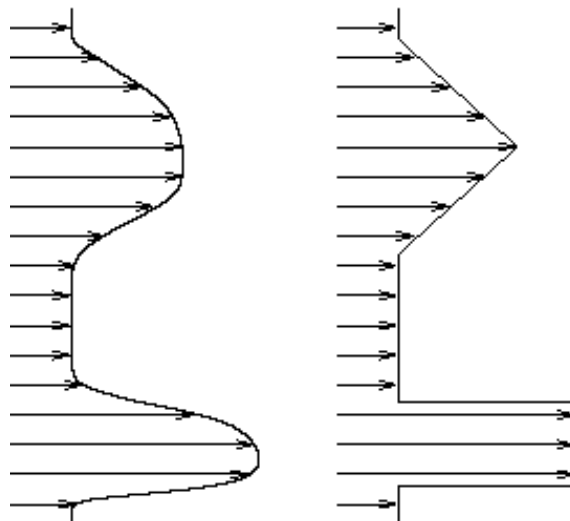
alakot ölti ($U_{,yy}$ jelöli az U y szerinti második deriváltját). Felhasználva, hogy az örvényesség perturbációja az áramlási függvénnyel $\zeta' = \psi'_{,ii}$ alakban fejezhető ki, és a perturbációs áramlási függvényt a k hullámszámú $\psi' = \tilde{\psi}(y) e^{ik(x-ct)}$ normál módusával helyettesítve, az örvényességi egyenletből a

$$(U-c)(\tilde{\psi}_{,yy} - k^2\tilde{\psi}) - \tilde{\psi}U_{,yy} = 0$$

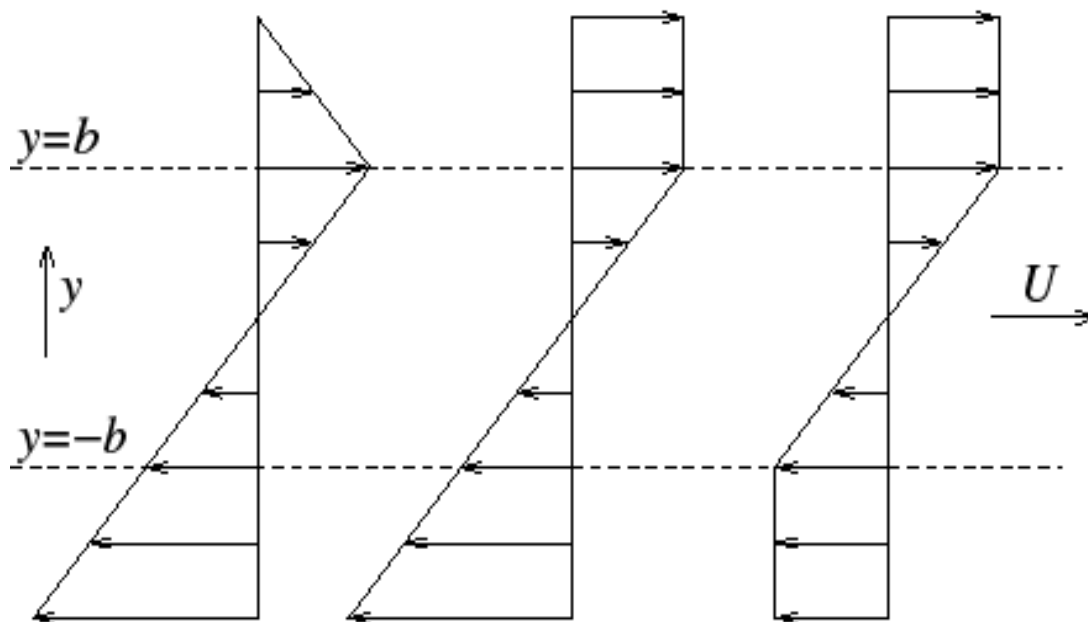
Rayleigh-egyenlet adódik. Ha a β hatást is figyelembe vesszük, akkor a fenti egyenlet kissé módosul:

$$(U-c)(\tilde{\psi}_{,yy} - k^2\tilde{\psi}) - \tilde{\psi}U_{,yy} - \beta\tilde{\psi} = 0$$

A Rayleigh-egyenlet tetszőleges alakú sebességprofilra (3. ábra) vonatkozó általános megoldása nem egyszerű. Szokásos egyszerűsítő eljárás, hogy az áramlást olyan tartományokra osztjuk fel, amelyekben a sebesség-gradiens állandónak tekinthető.

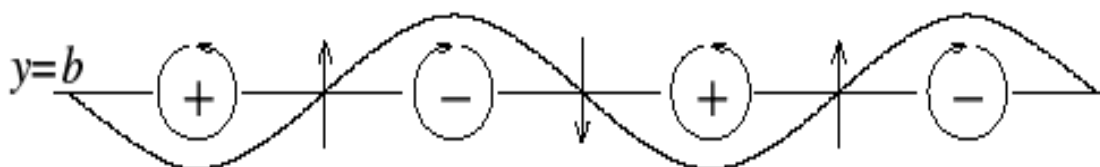


3. ábra. Példák a Rayleigh-egyenletben alkalmazott egyszerűsített sebességprofilokra. A 4. ábra pedig néhány egyszerű és a Kelvin-Helmholtz-féle instabilitás fizikai természetét megvilágító esetet mutat.



4. ábra. Jellegzetes áramlási képek a Kelvin-Helmholtz-féle instabilitás kialakulására.

Az első két esetben az áramlás stabilis és jól illusztrálja, hogy a perturbáció időbeli terjedése a sebesség gradiens ugrási felülete mentén terjedő Rossby-hullámokkal is leírható. Ebben a két esetben az örvényességi gradiens egyetlen (materiális) vonalra koncentrálódik, amelynek perturbálatlan helyzete ($y = b$).



5. ábra. Az örvényesség gradiens vonalának perturbált alakja. Jól elkülönülnek a ciklonális és az anticiklonális területek.

Az 5. ábra az örvényesség gradiens vonalának perturbált alakját mutatja. A vonal mentén bejelöltük a határvonal változásának megfelelően bekövetkező előjeles örvényesség perturbációt. A nyilak azokat a helyeket mutatják, ahol a pozitív és negatív örvényesség perturbáció által létrehozott sebesség perturbációk erősítik egymást. Jól látható, hogy a sebesség perturbáció negyed hullámhosszal elmarad a határvonal áthelyeződésétől. Ebből a képből szemléletesen következik, hogy a határvonal deformációs hulláma az alapáramláshoz képest bal felé mozog. A negyed hullámhossznyi fáziseltolódás alapvetően abból következik, hogy a sebességmező az örvényesség invertálásával határozható meg. (Az örvényesség perturbáció az áramfüggvény laplaszával egyenlő, így közöttük π a fáziskülönbség.)

Az intuitív kép alátámasztható a kis elmozdulásokra alkalmazott lineáris elmélet alapján is. Az egyenleteket rögtön a 4. ábra harmadik esetének leírására is alkalmas

formában írjuk fel. Mivel a sebesség gradiens szakaszonként állandó, $U_{,yy} = 0$, $y \neq \pm b$, így az örvényességi egyenlet

$$\zeta'_t + U\zeta'_x = 0$$

alakra egyszerűsödik. A két törésponton azonban figyelembe kell venni az ugrásszerű örvényesség változást. (A szögletes zárójel a $\pm b$ -nél bekövetkező ugrást jelöli.)

$$(\partial_t + U\partial_x)[\psi'_{,y}]^+ - [U_{,y}]^+ \psi'_{,x} = 0, \quad y = \pm b.$$

Az első két sebességprofil esetén a megoldás

$$\psi' = \tilde{\psi}(y) \exp(ik(x-ct))$$

alakban kereshető, ahol

$$\tilde{\psi}(y) = \exp(-|k(y-b)|).$$

A megoldás $y = \pm b$ kivételével mindenütt zérus örvényességet ad. A két törésponton érvényes örvényesség ugrását kifejező egyenlet az

$$ik(U-c) \cdot 2|k| = [U_{,y}]^+ ik$$

alakot ölti, amiből

$$c - U(b) = -\frac{1}{2} \frac{\Lambda}{|k|},$$

ahol $\Lambda = -[U_{,y}]^+$. Ismét megjegyezzük, hogy a szögletes zárójel a $\pm b$ -nél bekövetkező ugrást jelöli. (Az első két sebességprofil esetén $\Lambda > 0$.) Ez azt jelenti, hogy az x tengely mentén létrejött zavar az alapáramláshoz képest bal felé terjed $-\frac{1}{2} \frac{\Lambda}{|k|}$ fázissebességgel.

Amikor a sebességnek két helyen is ugrása van, akkor az áramlás instabil: mind a Rayleigh–Kuo-, mind a Fjortoft-kritérium szerint lehetséges az instabilitás (Vallis, 2006). A probléma megoldásához az áramlási (v. áram-) függvényt vegyük fel a

$$\hat{\psi} = \begin{cases} A \operatorname{sh}(2kb) \exp(-k(y-b)) & (y > b) \\ A \operatorname{sh}k(y+b) + B \operatorname{sh}(k(y-b)) & (-b < y < b) \\ B \operatorname{sh}(2kb) \exp(k(y+b)) & (y < -b) \end{cases} \quad (1)$$

alakban. Most $k > 0$, és egyszerűen ellenőrizhető, hogy ψ az $y = \pm b$ helyen folytonos és a relatív örvényesség $y = \pm b$ kivételével mindenütt zérus. A zavar terjedési sebesség-

ge és az $\frac{A}{B}$ amplitúdó arány a sebesség gradiens ugrására vonatkozó feltételekből kap-
ható meg. Az áramlási függvény az $y = \pm b$ helyen, rendre

$$\hat{\psi} = A \operatorname{sh}(2kb) \text{ és } \hat{\psi} = A \operatorname{ch}(2kb),$$

a megfelelő ugrási feltételek pedig:

$$(U_{,y}b - c) [\hat{\psi}_{,y}]_{-}^{+} + U_{,y} \hat{\psi} = 0, \quad (2)$$

$$(-U_{,y}b - c) [\hat{\psi}_{,y}]_{-}^{+} - U_{,y} \hat{\psi} = 0. \quad (3)$$

A $\hat{\psi}$ áramfüggvények y szerinti deriváltját véve a b és $-b$ helyen, meghatározhatjuk a
deriváltak $[\hat{\psi}_{,y}]_{-}^{+}$ ugrásait. A b helyen az (1)-ben szereplő első két áramfüggvény deri-
váltja:

$$\psi_{,y}(b) = \begin{cases} -Ak \operatorname{sh}(2kb) \\ Ak \operatorname{ch}(2kb) - Bk \operatorname{ch}(0) \end{cases}$$

a második kettőé pedig a $-b$ helyen

$$\psi_{,y}(b) = \begin{cases} Ak \operatorname{ch}(0) - Bk \operatorname{ch}(2kb) \\ Bk \operatorname{sh}(2kb) \end{cases}$$

Ezekkel a derivált ugrások:

$$\begin{aligned} [\hat{\psi}_{,y}(b)]_{-}^{+} &= -Ak \operatorname{sh}(2kb) - (Ak \operatorname{ch}(2kb) - Bk) \\ [\hat{\psi}_{,y}(-b)]_{-}^{+} &= Ak - (Bk \operatorname{ch}(2kb) + Bk \operatorname{sh}(2kb)) \end{aligned}$$

Beírva ezeket a (2) és (3) feltételi egyenletekbe, végigosztva őket $[\hat{\psi}_{,y}]_{-}^{+}$ szorzójával és
figyelembe véve, hogy $\operatorname{sh}(2kb) + \operatorname{ch}(2kb) = \exp(2kb)$, az amplitúdókra a

$$\begin{aligned} A \left(-k \operatorname{sh}(2kb) - k \operatorname{ch}(2kb) + \frac{U_{,y}}{U_{,y}b - c} \operatorname{sh}(2kb) \right) + Bk &= 0, \\ Ak + B \left(-k \operatorname{ch}(2kb) - k \operatorname{sh}(2kb) + \frac{U_{,y}}{U_{,y}b + c} \operatorname{sh}(2kb) \right) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

homogén lineáris egyenletrendszer adódik. Az egyenletrendszernek csak akkor van
nemtriviális megoldása, ha determinánsa zérus, azaz

$$\left(-k \exp(2kb) + \frac{U_{,y}}{U_{,y}b - c} \operatorname{sh}(2kb)\right) \left(-k \exp(2kb) + \frac{U_{,y}}{U_{,y}b + c} \operatorname{sh}(2kb)\right) - k^2 = 0.$$

Elvégezve a beszorzást és felhasználva, hogy $\exp(4kb) - 1 = 2\operatorname{sh}(2kb)\exp(2kb)$, azt kapjuk, hogy

$$2k^2 \operatorname{sh}(2kb) \exp(2kb) - kU_{,y}b \operatorname{sh}(2kb) \exp(2kb) \left(\frac{1}{U_{,y}b - c} + \frac{1}{U_{,y}b + c}\right) + \frac{U_{,y}^2 \operatorname{sh}^2(2kb)}{U_{,y}^2 b^2 - c^2} = 0 \quad (5)$$

Mivel

$$\frac{1}{U_{,y}b - c} + \frac{1}{U_{,y}b + c} = \frac{2U_{,y}b}{U_{,y}^2 b^2 - c^2}$$

Az (5) egyenletet végigszorozva $\frac{U_{,y}^2 b^2 - c^2}{2k^2 \operatorname{sh}(2kb) \exp(2kb)}$ -tel, majd átrendezve:

$$U_{,y}^2 b^2 - c^2 = \frac{2kbU_{,y}^2 \operatorname{sh}(2kb) \exp(2kb) - U_{,y}^2 \operatorname{sh}^2(2kb)}{2k^2 \operatorname{sh}(2kb) \exp(2kb)} = \frac{U_{,y}^2 b^2}{kb} - \frac{U_{,y}^2 b^2 \operatorname{sh}(2kb)}{2k^2 b^2 \exp(2kb)}.$$

Innen

$$c^2 = (U_{,y})^2 b^2 \left(1 - \frac{1}{kb} + \frac{\operatorname{sh}(2kb)}{2k^2 b^2 \exp(2kb)}\right).$$

Osszuk végig az egyenletet $(2U_{,y}b)^2$ -tel, ekkor a baloldalon a dimenzió nélküli

$$c'^2 = \left(\frac{c}{2U_{,y}b}\right)^2$$

sebesség jelenik meg. Bevezetve továbbá a (szintén dimenziótlan) $\delta = 2kb$ mennyiséget, a diszperziós reláció az

$$c'^2 = \frac{1}{4} - \frac{1}{2\delta} + \frac{\operatorname{sh}(\delta)}{2\delta^2 \exp(\delta)} = \frac{1}{4\delta^2} \left[(\delta - 1)^2 - \exp(-2\delta) \right].$$

alakot ölti.

Amennyiben δ nagyon kicsi, azaz a perturbáció hullámhossza a változó sebességű tartomány méretéhez képest nagy, akkor szögletes zárójelben lévő exponenciális tagot negyed rendig sorbafejtve azt kapjuk, hogy

$$c'^2 = \frac{1}{4\delta^2} \left[-2\delta^2 + \frac{4\delta^3}{3} \right] = -\frac{1}{2} + \frac{\delta}{3}.$$

Ha δ kicsi, akkor a sebességnégyzet negatív, azaz a sebességre a tiszta képzetes

$$c' = \pm i \left(1 - \frac{2}{3} \delta \right)$$

érték adódik, ami mutatja, hogy elegendően hosszú hullámok esetén az áramlás instabilis. Ez egyben azt is jelenti, hogy $k^{-1} > 2b$, azaz az instabilis zavar hullámhosszához képest a teljes nyírt réteg vékony, vagyis ideális örvénylemeznek tekinthető.

Ellenőriznünk kell a két ugrási felület mentén terjedő hullám fázisviszonyait is. Ehhez először célszerű a $\frac{B}{A}$ amplitúdó arányt megvizsgálni. Az ugrási feltételekre vonatkozó (4) egyenletek mindegyikéből kifejezve ezt az arányt:

$$\frac{B}{A} = \text{sh}(\delta) + \text{ch}(\delta) - \frac{U_{,y} \text{sh}(\delta)}{k(U_{,y}b - c)} = \exp(\delta) - \frac{U_{,y} \text{sh}(\delta)}{k(U_{,y}b - c)},$$

illetve

$$\frac{B}{A} = \frac{1}{\text{sh}(\delta) + \text{ch}(\delta) - \frac{U_{,y} \text{sh}(\delta)}{k(U_{,y}b + c)}} = \frac{1}{\exp(\delta) - \frac{U_{,y} \text{sh}(\delta)}{k(U_{,y}b + c)}},$$

vagyis

$$\frac{B}{A} = \left(\exp(\delta) - \frac{U_{,y} \text{sh}(\delta)}{k(U_{,y}b - c)} \right) = \left(\exp(\delta) - \frac{U_{,y} \text{sh}(\delta)}{k(U_{,y}b + c)} \right)^{-1}.$$

Mivel most csak azokkal az esetekkel foglalkozunk, amikor k valós és c tiszta képzetes, látható, hogy az egyenlet két oldalán a zárójelben komplex konjugált mennyiségek állnak, hiszen az egyetlen képzetes kifejezés (c) ellentétes előjellel szerepel bennük. Következésképpen

$$\left| \frac{B}{A} \right| = 1.$$

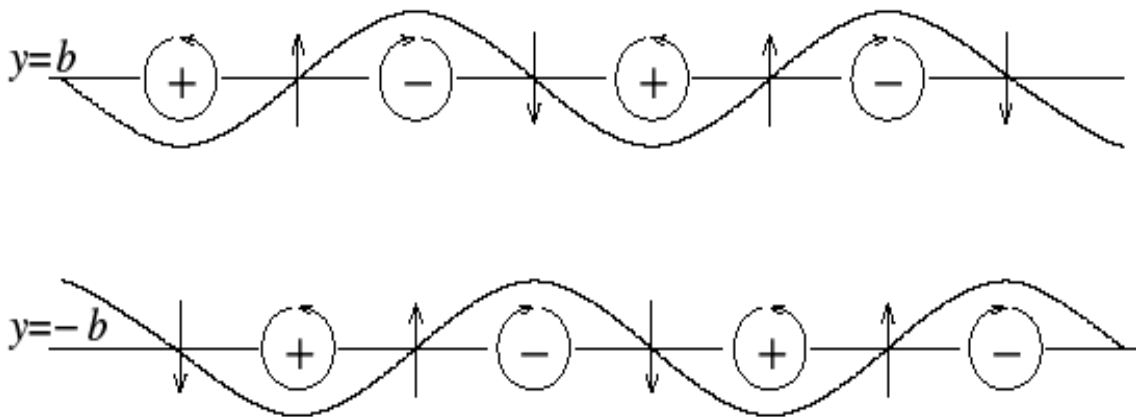
Ha két komplex szám hányadosának abszolút értéke 1, akkor csak fázisban térhetnek el egymástól, és relatív fázisuk a hányados argumentumából olvasható le, vagyis

$$\arg\left(\frac{B}{A}\right) = \arcsin \operatorname{Im}\left(\frac{B}{A}\right) = \arcsin \operatorname{Im}\left(-\frac{U_{,y} \operatorname{sh}(\delta)}{k(U_{,y}b - ic_i)}\right) = \arcsin \operatorname{Im}\left(-\frac{U_{,y}c_i \operatorname{sh}(\delta)}{k(U_{,y}^2b^2 + c_i^2)}\right),$$

ahol Im a komplex szám képzetes részét jelöli, és a $c = ic_i$ jelöléssel hangsúlyozzuk, hogy a sebesség tiszta képzetes. A fázist a c' és δ dimenzió nélküli mennyiségekkel kifejezve:

$$\arg\left(\frac{B}{A}\right) = \arcsin \operatorname{Im}\left(-\frac{c'_i \operatorname{sh}(\delta)}{\delta\left(\frac{1}{4} + (c'_i)^2\right)}\right).$$

A fáziskülönbség megadja, hogy a $y = b$ -nél a perturbációs áramfüggvény, s ennek megfelelően a perturbáció sebessége mennyivel tolódik előre a $z = -b$ helyen lévő megfelelő mennyiségekhez képest. $c'_i > 0$ esetén, amikor a fluktuáció növekszik, ez fázis negatív, azaz $y = b$ -nél a Rossby-hullám balra tolódik az $y = -b$ -nél lévőhöz képest (6. ábra).



6. ábra. Az áramvonalak alakja horizontális szélnyírási mezőben. Az $y = b$ és $y = -b$ helyen azonos nagyságú, de ellentétes irányú a zonális áramlás. A „magasabb szélességeken” állandó a kezdeti szélesebbesség. Lásd a 4. ábra harmadik sematikus szélnyírást!

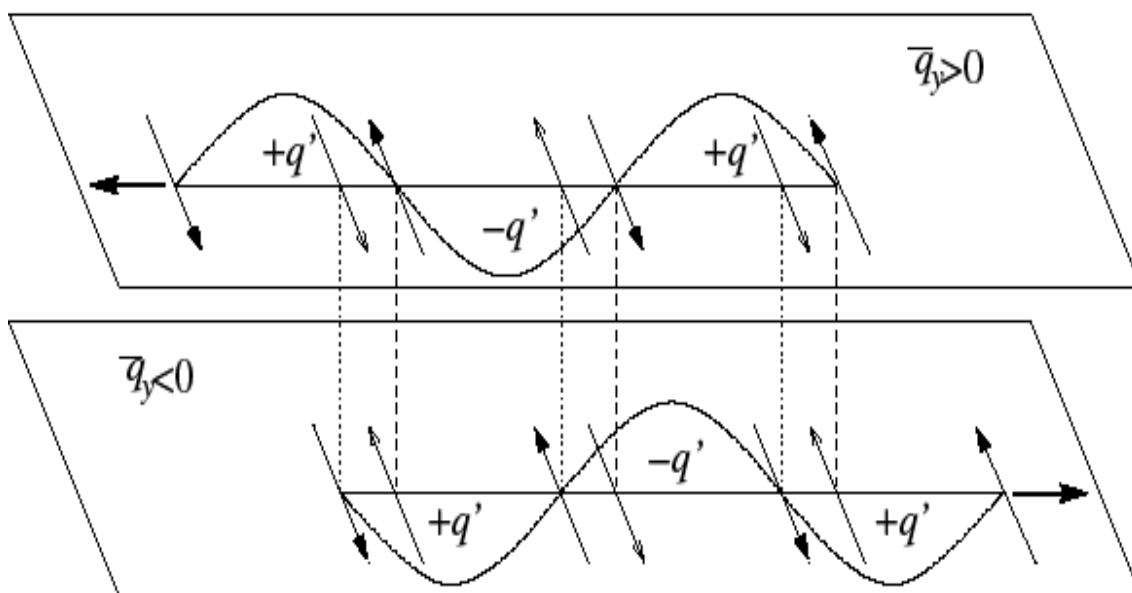
Az állandó fázisú helyeket összekötő görbék éppen ellentétesen dőlnek, mint a sebességnyírási. Ha $\delta = 2kb$ nagyon kicsi és $c'_i \rightarrow \frac{1}{2}$, akkor a két hullám közötti fáziskülönbség jó közelítéssel $-\frac{\pi}{2}$, azaz negyed hullámhossznyi útkülönbségnek felel meg. Megállapítható, hogy az örvényességben kissé nagyobb, de ugyanilyen előjelű fáziskülönbség áll fenn (6. ábra).

A barotrop és a baroklin instabilitás

A fentiekben vizsgált instabilitás magában foglalja a barotrop és a baroklin instabilitás alapeseteit is. Ezért a következőkben (Hoskins, 1985) alapján a fenti matematikai analí-

zsból adódó eredményeket szemléletesen is összefoglaljuk. Kihasználjuk, hogy barotrop esetben az örvényesség, baroklin esetben pedig a potenciális örvényesség fluktuációival írhatjuk le a sebesség gradiens ugrási felületén bekövetkező, Rossby-hullám formájában terjedő zavart. A szélnyírás barotrop esetben horizontális (y) irányú, s ilyenkor a két Rossby-hullám egymás mellett terjed (lásd a 4. és a 6. ábrát), baroklin esetben a nyírás vertikális (z) irányú, s a hullámok egymás felett terjednek (7. ábra).

Hoskins (1985) munkája alapján készült 7. ábrán + és – jelekkel szemléltetjük a hullámokban terjedő örvényesség (potenciális örvényesség) fluktuációkat, feltüntetve a hullámok alapáramláshoz képesti haladási irányát. (A két hullám az alapáramláshoz képest egymással szemben mozog.) A zonális fázis-sebességgel mozgó koordináta-rendszerből nézve mindkét hullám az áramlással szemben mozog és a mozgás állandóságát (stacionaritását) az alapáramlás tartja fenn. Ez akkor lehetséges, ha a potenciális örvényesség gradiense ugyanolyan előjelű, mint a relatív zonális áramlásé.



7. ábra. A planetáris hullámokban terjedő örvényesség (potenciális örvényesség) fluktuációi Hoskins (1985) munkája alapján.

Az instabilitási mechanizmus lényege az, hogy az indukált sebességmezők átfedik egymást. Ezért fontos, hogy a hullámok $2b$ távolsága (lásd a 6. ábrát is) összemérhető legyen a hullámhosszal.

A hullámok átfedéséből az alábbi következtetések vonhatók le:

a) Bár a potenciális örvényességi fluktuációk fázisai negyed hullámhossznyi útkülönbségnél kevésbé térnek el, mindkét hullám segíti a másikat abban, hogy a hullámok a zonális alapáramlással szemben terjedjenek.

b) Az ellentétes irányban terjedő Rossby-hullámok közötti összefüggés miatt a két hullám relatív fázisa blokkolja a 7. ábrán látható hullámmintázatot. (Ha a potenciális örvényesség-minta az áramlás irányában szétcúszna, azaz a felső hullám jobbra, az alsó balra mozdulna, akkor a hullámok fázisban közelednének egymáshoz, erősítenék egymást, és a hullámmintázat visszacsúszna az eredeti fáziskülönbségnek megfelelő helyzet felé.

c) Az egyetlen Rossby-hullám által keltett sebesség fázisa az örvényesség-minta fázisától negyedhullámnyival tér el. Vessük össze a felső és az alsó hullámot, az ott kialakuló sebességi mezőt! E két sebesség negyedhullámnyi fáziskülönbségnél kevesebbel tér el egymástól. Így az eredő sebesség hullám és a megfelelő potenciális örvényesség hullám fáziskülönbsége is negyed hullámhosszynál kisebb.

d) A horizontális áramlásban az északi sebességkomponens egy az elmozdulással azonos és egy attól negyed hullámhosszynak megfelelő fázis-különbségű részből áll. Az elmozdulással azonos előjelű és fázisú sebességkomponens biztosítja, mind a sebesség mind az elmozdulás növekedését.

Az instabilitási mechanizmust a fentiek alapján *Hoskins* nyomán egyetlen mondatban is összefoglalhatjuk:

„A Rossby-hullámok indukált sebességmezője kölcsönösen fázisban tartja és növeli egymást.”

Az instabilitást leíró linearizált egyenletek szerint a két potenciális örvényesség zavar összeesetelődik és azonos fázissebességgel mozgó állandósult (v. rögzült), de exponenciálisan növekedő mintázatot alakít ki.

A barotrop és a baroklin instabilitás energetikája

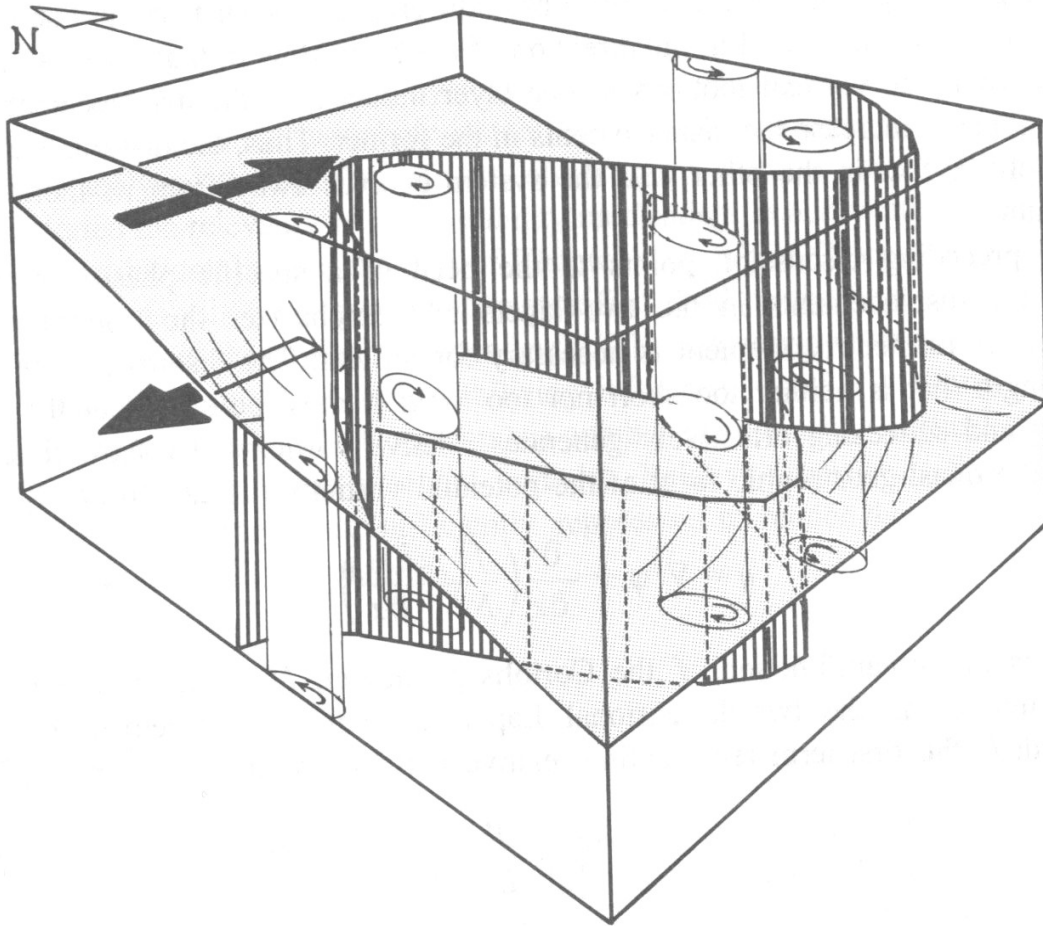
Amint már említettük ennek a két meteorológiában talán legfontosabb instabilitási formának alapvető oka a szélnyírás. Barotrop esetben a horizontális, baroklin esetben pedig a vertikális. Ebből azonnal következik, hogy barotrop esetben a felerősödő örvénymozgás csak az alapáramlás kinetikus energiájából táplálkozhat, baroklin esetben azonban a potenciális energia is „megcsapolható”.

Érdeemes megvizsgálni, pusztán a szemlélet alapján, hogy a baroklin instabilitás esetén hogyan történhet az átrendeződés.

A baroklin instabilitás vertikálisan nyírt és rétegzett, geosztrofikus áramlásban keletkezik. Ebben az áramlásban az izoszterek dőltek, mert a geosztrofikus áramlás kialakulásához horizontális nyomási gradiens szükséges. Horizontális nyomási gradiens a hidrosztatikai feltételek teljesülése mellett csak akkor jöhet létre, ha horizontális sűrűség gradiens létezik. A geosztrofikus és hidrosztatikus egyensúly ily módon tarthat fenn egyensúlyi áramlást. Ez az egyensúlyi áramlás azonban nem minimális energiájú, hiszen a rendszer potenciális energiája csökken, ha az izoszter felületek dőlésének csökkenésével a kisebb sűrűségű légrések a nagyobb sűrűségűek fölé kerülnek. Ez a folyamat egyben csökkenti a horizontális nyomási gradienst és így a geosztrofikus szél sebességét, azaz az áramlás kinetikus energiáját.

A termikus szélben a sűrűségeloszlás relaxációja és ily módon a nyugalmi állapothoz való közeledés nem történhet közvetlen és spontán módon, mivel ez a változás folyadékoszlopok „feszítését” és „összenyomását” tenné szükségessé, ami első pillantásra nem lehetséges a potenciális örvényesség megváltozása nélkül. A függőleges légoszlopok feszítése és összenyomása azonban végbemehet a potenciális örvényesség megmaradása mellett is, ha a deformációs folyamattal egyidejűleg a relatív örvényesség is megváltozik. Ez esetben a rétegzett folyadékoszlop feszítése ciklonális, összenyomása anticiklonális örvényességi járulékot jelent. Enyhén perturbált szélmezőben a nyújtás és

összenyomás különböző helyen megy végbe, és kölcsönható örvényelrendeződést alakít ki. Ez a kölcsönhatás megfelelő elrendeződés esetén akár az eredeti állapot visszaállítását akár a tőle való távolodást elősegítheti.



8. ábra. A termikus szél hatására kialakuló növekvő relatív örvényesség eloszlás (növekvő örvényességi perturbáció) Cushman-Roisin, (1994) nyomán.

Vizsgáljuk meg, hogyan generálhat a termikus szél a perturbáció növekedését elősegítő relatív örvényesség eloszlást. Ennek megértéséhez elegendő a 8. ábrán látható kétrétegű folyadék modellben gondolkodni (Práger, 1981; Hoskins et al., 1985; Cushman-Roisin, 1994). Egyelőre hanyagoljuk el a β hatást (a Coriolis-paraméter szélességi körök szerinti változását). Tegyük fel, hogy a határfelület észak felé emelkedik, és az áramlás a felső rétegben keleti, az alsóban nyugati irányú.

A felső réteg perturbációja egyes légtömegeket észak felé, azaz a sekélyebb területek felé mozgat. Ezek a részek összenyomódnak és anticiklonális örvényességhez jutnak. A réteg alja azonban nem merev, a határfelület kissé elmozdul, a felső légoszlop pedig kevésbé nyomódik össze, emiatt egy kompenzáló összenyomódás jön létre alul, ahol ugyancsak anticiklonális összenyomódás keletkezik. A perturbáció másik része a felső réteget a mélyebb részek felé mozgatja. Itt függőleges nyújtás jön létre és a határfelület flexibilitása miatt, ez áttérjed az alsó rétegre is. Az ilyen perturbáció helyén

ciklonális örvényesség keletkezik. Ez a perturbáció a potenciális energia csökkenésével jár, hiszen a sekélyebb részen a felső réteg lejjebb, a mélyebb részen az alsó feljebb kerül, s ez az izoszter felület vízszintes felé dőlésével jár. Hasonló változással jár, ha az alsó rétegben jön létre perturbáció.

Ha a két réteg mozgása úgy van összehangolva, hogy az egyik rétegben a hátságok a másik réteg völgyeire esnek és a térbeli mintázat az egyik rétegben a rétegbeli alapáramlás irányába tolódik, akkor a két réteg perturbációi miatt létrejövő örvények erősítik egymást. Emiatt a rendszer távolodik eredeti állapotától.

Egyéb instabilitási formák

A fentiekben csak a leginkább közismert instabilitási formákat foglaltuk össze. A légkör valóságos folyamataiban további instabilitás típusok definiálhatók. Általában minden olyan esetben, *amikor valamilyen alapáramlás stabilizálódik, majd valamilyen hatásra megváltozik és egy meghatározott zavar növekedéséhez vezet: instabilitásról beszélhetünk.* Példaként megemlítjük, hogy a közepes szélességeken létrejövő zonális átlagnak megfelelő áramlás barotropikusan stabilis lehet. Amennyiben azonban az áramlásra „semleges Rossby-hullámok” szuperponálódnak, akkor ez az áramlás további perturbációkkal szemben már instabilis lehet. Lorentz (1972) Rossby eredeti megoldását vizsgálta a β síkon és úgy találta, hogy ha a hullámok elegendően erősek, vagy ha a hullámszám elegendően nagy, akkor az áramlás instabilissá válhat. Gyenge áramlás és kicsiny hullámszám esetén azonban a β hatás stabilizálhatja az alapáramlást.

A képet tovább bonyolítja, hogy a stabilitásvizsgálathoz a mozgásegyenleteket általában linearizáljuk, s ezzel a nemlineáris hatásokat kiküszöböljük.

Irodalomjegyzék

- Acheson, D.J., 1990: Elementary fluid dynamics, *Oxford*, p. 303.
- Cushman-Roisin, B., 1994: Introduction to Geophysical fluid dynamics, *Prentice Hall, New Jersey*.
- Drazin, P.G. and Reid, W.H., 1981: Hydrodynamic Stability, *Cambridge University Press, Cambridge*, p. 333.
- Green, J., 1999: Atmospheric Dynamics, *Cambridge University Press*, 6–7.
- Grotjahn R., 2003: Baroclinic instability, in *Enc. of Atm. Sci.* (ed. Holton J.R.), *Elsevier London*, 1004–1014.
- Götz G. és Rákóczi F., 1981: A dinamikus meteorológia alapjai, *Tankönyvkiadó, Budapest*, 176–196.
- Hoskins, B.J., McIntyre, M.E. and Robertson, A.W., 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps, *Q.J.R. Meteorol. Soc.* **111**, 877–946.
- Houze, R.A., 1993: Cloud Dynamics, *Academic Press, London*.
- Knox, J.A., 2003: Inertial Instability, in *Enc. of Atm. Sci.* (ed. Holton J.R.), *Elsevier London*, 179–189.

- Kundu, K.J. and Cohen, I.M., 2008: Fluid Mechanics, *Elsevier*, p. 493.
- Lilly, D.K., 1986: Instabilities in Mesoscale Meteorology and Forecasting (ed. Ray, P.S.), *A.M.S. Boston*, 259–271.
- Lorentz, E.N., 1972: [Barotropic instability of Rossby wave motion](#), *J. Atmos. Sci.* **20**, 258–264.
- Panchev, S., 1985: Dynamic Meteorology, *Reidel Publishing Co., Dordrecht*.
- Práger, T., 1981: Hullámmozgások a Légekörben (in Götz, G. and Rákóczi, F., A dinamikus meteorológia alapjai), *Tankönyvkiadó, Budapest*, 369–412.
- Práger T., 1982: Numerikus Prognosztika I. A hidrodinamikai előrejelzés elmélete, *Tankönyvkiadó, Budapest*.
- Vallis, G.K., 2006: Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics, *Cambridge University Press*, p. 248.
- Wiin-Nielsen, A. and Chen, T.-C., 1993: Fundamentals of Atmospheric Energetics, *Oxford University Press*, 123–130.

Az OMSZ időjárás-előrejelző rendszere

Sallai Márta

Országos Meteorológiai Szolgálat
1024 Budapest, Kitaibel Pál u. 1., e-mail: sallai.m@met.hu

Összefoglaló – Az időjárás előrejelzése a meteorológia szerteágazó tevékenysége közül a legismertebb légkörtudományi alkalmazás, egyben a legkényesebb szakmai és technikai kihívás, amit egy-egy kritikus helyzetben az egész ország figyelmébe kényszerít. Az időjárás előrejelzések készítése több fázisból álló, komplex feladat, amely az alábbi fő feladatcsoportokra bontható:

- a mért és megfigyelt adatok gyűjtése, ellenőrzése, tárolása;
- numerikus előrejelzési modellek futtatása és fejlesztése;
- a légkör jelen és jövőbeni állapotát bemutató analízisek, utófeldolgozott produktumok előállításai;
- adatok, produktumok megjelenítése az előrejelző szakemberek számára megfelelő formátumban;
- általános időjárási előrejelzések megfogalmazása;
- az általános előrejelzésekre épülő speciális előrejelzések készítése a legkülönbözőbb felhasználási területek igényeinek kielégítésére.

Az alábbiakban ezeket a feladatcsoportokat tekintem át, egyben ismertetem, hogy milyen fejlesztések történtek és vannak folyamatban az OMSZ-nál annak érdekében, hogy az előrejelzésekkel szemben támasztott szakmai és társadalmi követelményeknek a lehető legmagasabb szinten tudjunk eleget tenni.

Mérések, megfigyelések, adatgyűjtés, tárolás

Az időjárás előrejelzés folyamata a mérésekkel indul. A légkör tökéletes leírásához gyakorlatilag minden meteorológiai elem mérésére szükség lenne a légkör minden pontjában. A valóságban azonban be kell érni ennél lényegesen ritkább mintavételezéssel. Ez az egyik fő oka annak, hogy előrejelzéseink nem lehetnek determinisztikusak.

Hogyan hasznosulnak a mérések az előrejelzések készítésében? Közvetlenül és közvetve. Közvetlenül az időjárási események folyamatos nyomon követésében, amely elsősorban a nowcasting és az ultrarövidtávú előrejelzések és riasztások kiadásánál nélkülözhetetlen. Közvetve pedig mint kiindulási adat a numerikus előrejelzések futtatása során.

A Meteorológiai Világszervezet (WMO) keretében, az Időjárási Világszolgálat (WWW) szervezésében a Föld egészére kiterjedő légköri megfigyelő rendszer működik. A megfigyelések két nagy csoportba sorolhatók. Az egyik a földfelszínhez kötődik, a másik pedig a mesterséges holdakhoz. A földfelszíni mérések közé soroljuk a szárazföldi és a tengeri-óceáni mérőpontok, a magaslégköri szondák, a repülőgépek és az időjárási radarok méréseit. A másik csoportba a gesztacionárius és a kvázipoláris meteorológiai műholdakról származó adatok tartoznak.

Természetesen a WMO távközlési rendszerén keresztül az adatok – szükség szerinti gyakorisággal – a Föld egészéről eljutnak hozzánk. Itt azonban csak az OMSZ megfigyelési rendszerének rövid ismertetésére térek ki.

Földfelszíni megfigyelések

Az OMSZ adatgyűjtési körébe 103 automata mérőállomás és 564 hagyományos csapadékmérő állomás tartozik. Vizuális megfigyelések ennél lényegesen kevesebb helyen történnek: 17 állomáson, amelyek közül 3 régiós központként is üzemel. (1. ábra)

**Az OMSZ automata állomáshálózata
2008. június 1.**



1. ábra. Az OMSZ automata mérőhálózata (2008. július 1. állapot alapján).

A 2008-as év nagy eredménye az automata állomások adatátvitelének GPRS alapú kommunikációra történő átállítása volt. Ennek, valamint az Elektronikus Kormányzati Gerinchálózathoz való csatlakozásnak köszönhetően a korábbi 1, illetve 3 órás gyakoriságú adatgyűjtésről áttérhettünk a 10 perces adatgyűjtésre, ami az előrejelzők számára jelentős és különösen a rendkívüli időjárási helyzetekben nagyon hasznos információ többletet jelent.

Magaslégköri mérések

Az európai régióban található 142 mérőállomás közül az országban kettő működik. A léggömbbel felbocsátott mérőműszerek (szondák) adatait többféleképp jeleníthetjük meg. Készülnek magassági topográfiai térképek a 925, 850, 700 és az 500 hPa-os szintre. Megrajzoltathatjuk az egyes mérőállomások ún. felszállási görbéit is. A mérési adatokból különböző meteorológiai paramétereket számolhatunk, és jeleníthetjük meg. Így a potenciálisan kihullható vízmennyiséget, vagy a levegő labilitására utaló indexeket.

Radarmérések

Hazánkban három, az OMSZ által működtetett radarállomás található. Budapesten (Pestszentlőrinc), Pogányváron és Nyíregyháza-Napkoron egyaránt egy-egy EEC gyártmányú Doppler-radar működik. A radarállomások mérései 30, 120 és 240 km sugarú méréstartományban külön-külön, illetve összeszerkesztve kompozitként is hozzáférhetők. Egyaránt megtalálhatók a horizontális és vertikális mérések. Az automatizált rendszerben negyedóránként készülnek új térképek. Az európai radar-meteorológiai együttműködésnek (OPERA) köszönhetően nemcsak Magyarországra, hanem Európa más térségére is rendelkezünk radarképekkel.

Villámlokalizációs rendszer

A villámlokalizációs rendszer 5 mérőállomásból áll: Sárvár, Véménd, Buggy, Zsadány, Varbóc. A rendszer nagy érzékenysége lehetővé teszi a kis energiájú felhőn belüli villámok nagy távolságból történő megfigyelését is, ami mintegy 30–50 perces időelőnyt biztosít az első, földet elérő villámokhoz képest. Az adatok jól használhatók az ultrarövidtávú előrejelzésekben, a zivatar előrejelzésben, a korai villámlás riasztásban, a veszélyeztetett területek meghatározásában, valamint a villámlási statisztikák készítésében.

Meteorológiai műholdak

Az űrbázisú rendszerben az OMSZ-nál jelenleg a METEOSAT (MSG) és a NOAA digitális műholdképek vétele és feldolgozása folyik. A második generációs METEOSAT-8 műhold 2003-tól 11 csatornán negyedóránként készít képeket. Új fejlesztés az 5 perces frissítésű ún. rapid scan képek megjelenése, ami a nowcasting területén nyújt nagyon hasznos információ többletet az előrejelzőknek. Magyarország 2008-ban az EUMETSAT teljes jogú tagja lett, ez megnyugtatóan biztosítja a műholdas információk használatát a jövőre nézve is. Az új MSG műholdak adataiból a hagyományos infra, láttható és vízgőz sávban készült képek megjelenítése mellett lehetőség van olyan feldolgozott információk kinyerésére is, mint pl. a felhőtípusok azonosítása, stabilitási indexek számítása, vagy a kihullható vízmennyiség térképek készítése.

Numerikus előrejelzési produktumok

A felsorolt mérések és megfigyelések egyrészt segítséget nyújtanak az előrejelzőnek az időjárási helyzet megismerésére, és jelzést adnak a légkör lehetséges jövőbeli állapotára vonatkozóan. Ugyanakkor a légkör állapotára vonatkozó mérések megfelelő feldolgozás után (adatasszimiláció) a légköri modellek bemenő adataiként is szolgálnak. Az OMSZ által elérhető modellek néhány órától 10 (21) napig adnak információt a légkör várható jövőbeli állapotáról különböző tér- és időbeli felbontásban. A felhasznált modellek rövid ismertetése az alábbiakban olvasható:

Globális és regionális modellek

ECMWF

A néhány nyugat-európai ország és a volt Jugoszlávia által létrehozott Európai Középtávú Előrejelző Központnak 1994 óta vagyunk társult tagjai. Az itt futtatott modellek legfontosabb paraméterei az alábbiakban foglalhatók össze:

Determinisztikus modell:

Időtáv: 10 nap, időbeli felbontás: 3 óra 72 óráig, 6 óra 240 óráig.

Térbeli felbontás: horizontális: 25 x 25 km, vertikális: 91 szint 0,01 hPa-ig.

Ensemble modell:

Időtáv: 10, illetve 15 nap.

50 ensemble tag.

Térbeli felbontás: horizontális: 50 x 50 km, vertikális: 62 szint.

Havi előrejelzési modell:

Futtatás hetente, 50 ensemble tag (kapcsolt légkör-óceán modell).
Térbeli felbontás: horizontálisan 80 x 80 km, vertikálisan 62 szint.

Évszakos előrejelzési modell:

Futtatás havonta, kapcsolt légkör-óceán modell.
Térbeli felbontás: horizontálisan 120 x 120 km, vertikálisan 62 szint.

ALADIN modell

A Meteo France és a közép-európai országok által kifejlesztett korlátos tartományú modell futtatása az OMSZ számítógépén történik. A modell tartománya csaknem egész Európát lefedi. A jelenlegi verzió vízszintes felbontása kb. 8 km, vertikálisan pedig 49 szinttel rendelkezik a modell. A kezdeti értékek meghatározása háromdimenziós variációs analízis (3d-var) eljárással történik. A modell a határ-feltételeket jelenleg már az ECMWF modellből kapja. Modellfuttatás naponta négyszer történik (00, 06, 12 és 18 UTC-kor) 48 órás időintervallumra, az első 36 órára 1 órás, majd 3 órás időlépcsővel.

DWD és UKMO modell

A két fő modellen kívül modell-információt kapunk még a német és az angol nemzeti meteorológiai szolgálattól (DWD, UKMO) az offenbachi és az exeteri előrejelző központból, amelyeket az előrejelzési gyakorlatban kiegészítő információként használunk.

Lokális modellek

MM5 modell és a MEANDER

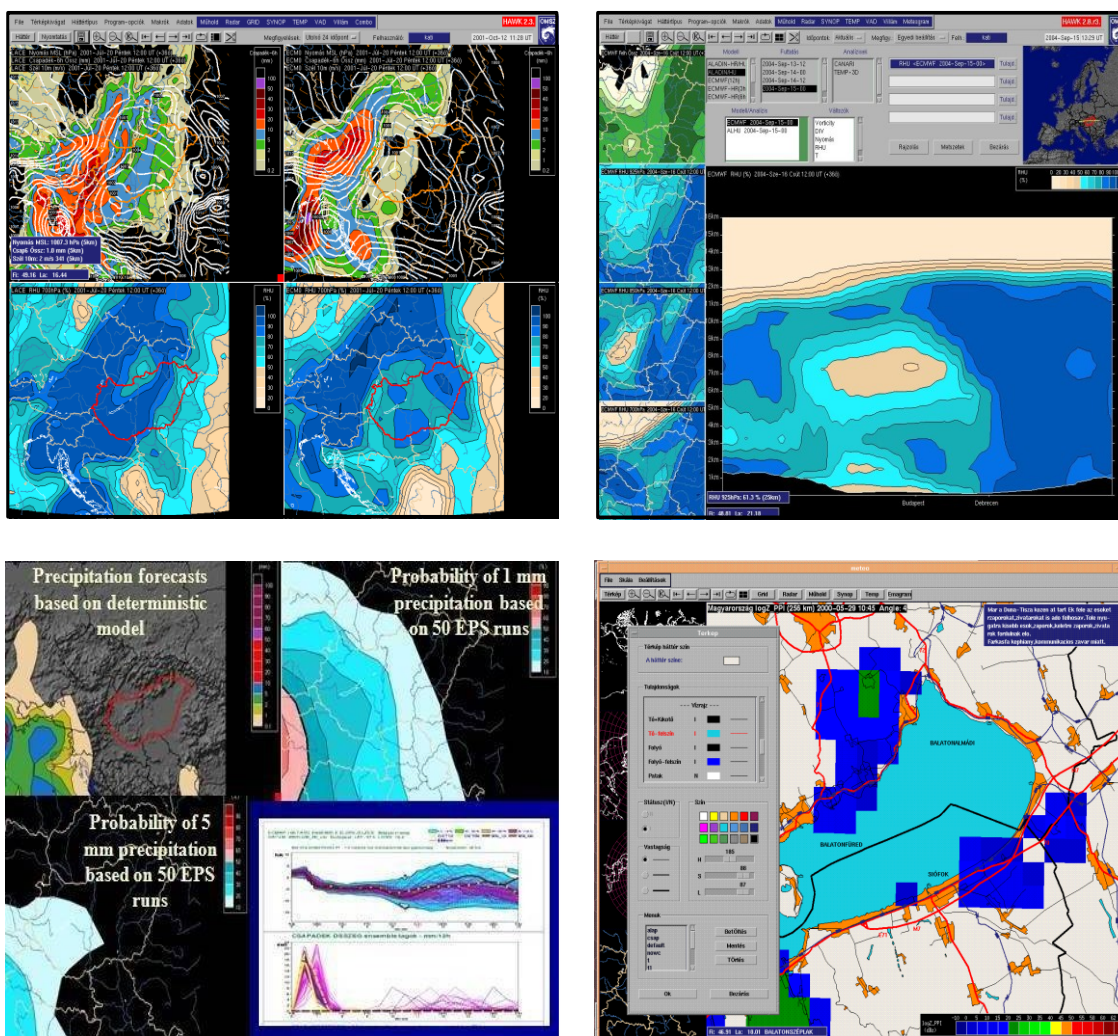
A nowcasting rendszer két fő egységből, az MM5 modellből és a MEANDER rendszerből épül fel. Az MM5 egy nem hidrosztatikus, fejlett felhőfizikai, konvekciós és sugárzási parametrizációval rendelkező korlátos tartományú modell. Az MM5 szerepe, hogy háttér információt (ún. first guess-t) adjon a MEANDER rendszernek. Az MM5 modell különféle változatai és a MEANDER rendszer egymásba ágyazott modellek bonyolult sorozatát alkotják. Az ún. MM5-nagy modell naponta egyszer fut a hajnali órákban és egy nagyobb európai tartományra +48 órára készít előrejelzést. A modell oldalsó peremfeltételeit az ECMWF előrejelzései biztosítják. Az MM5-nagy modell szolgáltatja a kezdeti és peremfeltételeket a naponta hatszor +18 órára futtatott kisebb területet lefedő, de nagyobb felbontású MM5 futtatásokhoz. Ez az MM5 konfiguráció 6 km-es horizontális felbontással 26 vertikális szintre készít előrejelzést, úgy, hogy az MM5-nagy modell futtatásait egy relaxációs technika segítségével kombináljuk a felszíni (SYNOP) és a magaslégköri (TEMP) megfigyelésekkel, illetve a legújabb verzióban már a radar adatokkal is. A MEANDER rendszer a már fent ismertetett módon minden órában fut és a nagyfelbontású MM5 futtatások eredményeit használja fel. A MEANDER rendszer csak kis tartományra, az országot éppen lefedő rácsra készít előrejelzéseket.

AROME modell

Az ALADIN modell nem hidrosztatikus változata jelenleg teszt fázisban fut a meteorológiai szolgálatnál. A modell Magyarország területére számol előrejelzett adatokat, horizontális felbontása 2,5 x 2,5 km, vertikális felbontása 49 szint. A modellfuttatáshoz a határfeltételeket az ALADIN modell adja.

Utófeldolgozás

Az utófeldolgozás célja a modell előrejelzési hibák statisztikai alapú kiszűrése. Az OMSZ-nál használt objektív utófeldolgozási technikák a MOS (modell output statisztika) és a Kálmán-szűrő. Ezekkel a 2 m-es hőmérséklet és relatív nedvesség, illetve a 10 m-es szél statisztikai korrekcióját végezzük el az ALADIN és az ECMWF modell esetében.



2. ábra. Modell outputok megjelenítése a HAWK-2 rendszerben.

Az adatok megjelenítése

Az előrejelzések készítésekor ma már nélkülözhetetlen eszköz az összes felhasznált adat megjelenítésére és elsődleges feldolgozására alkalmas meteorológiai munkaállomás. Az egyes meteorológiai paramétereket a HAWK-2 számítógépes megjelenítő rendszer segítségével többféleképpen lehet ábrázolni. Lehet egy adott időpontban horizontális térképes ábrázolás, lehet valamely sík mentén függőleges térbeli metszetet készíteni, vagy

egy adott pontra időbeli metszetet előállítani (meteogram). A különböző paraméterek együttesen is megjeleníthetők (2. ábra).

Az időjárás előrejelzés folyamata

A „klasszikus” operatív előrejelzési tevékenység folyamata gyakorlatilag évtizedek óta változatlan és az alábbi lépésekkel írható le:

1. Az előrejelző folyamatosan nyomon kíséri az időjárási helyzet alakulását, analízist készít. Ehhez felhasználja a földfelszíni és magaslégköri állomások mérési eredményeit, a rendelkezésre álló intenzív mérési technikák (radar, műhold, villámlokalizáció) adatait. Meghatározza a nyomásrendszerek helyzetét, fejlődését, kianalizálja a frontok és konvergencia vonalak elhelyezkedését. Egyszerűen igyekszik a lehető legpontosabb képet kapni az aktuális időjárási helyzetről.

2. Áttekinti a rendelkezésre álló előrejelzési modellek által adott jövőképet. Az OMSZ gyakorlatában a már korábban felsorolt modellek eredményeit használjuk. A globális modellek outputjait a meteorológiai szolgálatokat összekötő információs hálón (RMDCN) keresztül kapjuk meg az előrejelző központokból. A regionális és a lokális modellek futtatása az OMSZ szuperszámítógépein történik (IBM p655cluster server, SGI Altix 3700).

3. Az előző pontban említett modellek eredményeit az előrejelző kiértékeli, összehasonlítja. Az előrejelzési folyamatnak ez a legnehezebb, legkényesebb része, hiszen a modellek egymástól – az időjárási helyzet előrejelezhetőségétől függően – kis mértékben, vagy akár jelentősen is eltérhetnek. Az előrejelző tapasztalata és a modellek összehasonlítása alapján szubjektív döntéssel határozza meg az időjárás leginkább valószínűsíthető alakulását, a jelenlegi rendszerben 7 napra előre.

Az alap előrejelzés

Ennek a három lépcsőből álló folyamatnak az eredménye maga az alap előrejelzés, amely különféle típusú produktumok formájában kerül a felhasználókhöz. Napjainkban a leggyakoribb produktumok az alábbiak:

- az egész ország területére szóló szöveges előrejelzés rövid és középtávra,
- az ország hat régiójára szóló szöveges előrejelzés rövid és középtávra (7 napig),
- főként a médiának szánt térképes, piktogramos előrejelzés rövid magyarázó szöveggel,
- táblázatban, grafikon formájában, vagy egyszerű adatfájl formájában megadott előrejelzett adatok.

Alapvető fontosságú, hogy a különböző felhasználási területekre, különböző formában kiadott prognózisok az időjárásra vonatkozóan azonos koncepciót képviseljenek. Ezt az úgynevezett alapprognózis biztosítja, amely a továbbiakban minden speciális prognózis alapját képezi.

Az alapprognózis egy az ország 6 időjárasi körzetére, 7 napra kiadott, szám-csoportokból álló kódforma, amely tartalmazza a lehetséges időjárasi paramétereket, illetve képes azok változását is leírni. A kód felépítése az alábbi:

Az első két napra vonatkozóan:

OOKI HHNN BBJJ CCMW SSSS AALL YYXX

A többi napra vonatkozóan:

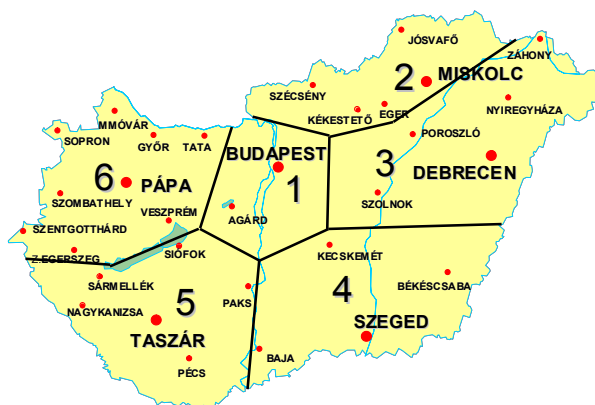
OOKI HHNN BBJJ CCVW SSSS AALL YYXX

ahol: OOKI az ország és körzet azonosító, HHNN az érvényességi időt jelöli, B a borultságra, J a jelenidőre, C a csapadékfajta, M a csapadék mennyiségére, V az 5 mm-t illetve a 10 mm-t meghaladó csapadék valószínűségére, SS a szélirányra, A a szélességre, L a szélőkésre, YY a minimum hőmérsékletre, XX a maximum hőmérsékletre adott kódolt érték. A kódok ismétlésével az adott elem változását tudjuk leírni az adott időszakban. A borultságot, jelenidőt, csapadékfajta 1–9-ig terjedő számokkal írjuk le, amelyek előre definiált állapotot jeleznek. A kódsorozatot az első napra nappali és éjszakai bontásban, a további 6 napra vonatkozóan naponkénti bontásban alkalmazzuk.

A hat régió elkülönítése a 3. ábrán látható:

A kód alkalmazása sokrétű:

- használható automatikus szöveggenerálásra,
- használható a grafikus előrejelzéseknél táblázatok, piktogramok készítésére és
- használható automatikus verifikálásra.



3. ábra. Az előrejelzésnél használt 6 időjárasi régió.

Nagy előnye a kódnak, hogy nemcsak a szinoptikus által generálható szubjektív módon, hanem automatikusan is előállítható a numerikus modell outputokból. Így a gyakorlatban is elérhető, hogy tetszőleges helyre, Magyarországra és az országhatáron kívül is, emberi munkaráfordítás nélkül, automatikusan állítsunk elő az 1–6 napig terjedő előrejelzéseket akár szöveges, akár grafikus, piktogramos formában. Az operatív munkában immár 10 éve használjuk ki az ország 6 régiójára adott, a szinoptikus által szubjektív módon előállított kódot. A procedúra eredményeként kb. félórás munkával kb. 40 oldalas szöveg áll elő, magyar és angol nyelven.

Ebben a szolgáltatási rendben az elkészült típus szolgáltatások egy-egy területre (leggyakrabban országrészre) adnak előrejelzést, napszakokra bontva le az időjárás alakulását. Ennek szakmai magyarázata az, hogy az előrejelzés bizonytalansága nagyobb annál, hogy egy adott földrajzi koordinátára, vagy egy adott időre pontos, megbízható előrejelzést adjuk, főként a középtávú prognózisokban.

A felhasználók többsége viszont azért rendel a Szolgáltatástól meteorológiai előrejelzést, mert azt egy adott döntés meghozatalára kívánja felhasználni. Ez lehet viszonylag egy-

szerű döntés: például egy bizonyos elvégzendő munka, vagy egy tervezett rendezvény miatt szüksége van annak ismeretére, hogy egy adott helyen, adott időben milyen időjárás lesz. Másrészt egyre gyakoribbak az olyan komplex döntéshozó rendszerek, ahol a meteorológiai paraméterek sok más típusú információval együtt egy szoftver input adatát jelentik, amelynek térbeli és időbeli felbontásával kapcsolatban konkrét követelmények vannak. Könnyen belátható, hogy az ilyen típusú igények kielégítésére a hagyományos típus-produktumok nem elégségesek. Szükségesek egyrészt olyan előrejelzések, amelyek – ha már tökéletes előrejelzés nem adható –, legalább az előrejelzések bizonytalanságának mértékére adnak információt. Másrészt szükségesek olyan előrejelzések is, amelyek nem területre, hanem egy adott földrajzi pontra (településre) adnak részletes, akár órás felbontású előrejelzési adatokat. Az első igényt a valószínűségi előrejelzések szolgáltatásával, míg a másodikat automatizálással, valamint a mezőszerkesztő rendszer bevezetésével tudjuk kielégíteni.

Valószínűségi előrejelzések

Az EPS előrejelzések operatív futtatását követően, az ECMWF modell esetében 50 tag futtatási eredményeinek ismeretében az alábbi információk megválaszolására van lehetőség:

- Mennyire jól előrejelezhető aznap az időjárási helyzet? Ha az EPS tagok megfelelő módon összetartanak, számíthatunk rá, hogy előrejelzésünk megfelelő pontosságú lesz, tehát döntést alapozhatunk rá. Ha az EPS tagok teljesen divergálnak, akkor viszont azt kell tudnunk, hogy a kiadott előrejelzés döntési folyamatokban csak bizonytalanul alkalmazható.
- A szinoptikus számára a már említett szubjektív döntési folyamatban alapvető információ, hogy a modell futtatások többsége az időjárási folyamat mely fejlődési irányát támogatja, mennyire van ez összhangban a determinisztikus előrejelzés által adott jövőképpel.
- Készíthetünk különféle kategóriák, vagy küszöbértékek bekövetkezési valószínűségét megadó előrejelzéseket, amelyeket a felhasználók közvetlenül is alkalmazhatnak.

Valószínűségi előrejelzés adható például a csapadék egzisztenciára, az 1 mm-t, 5 mm-t, 10 mm-t és 20 mm-t meghaladó mennyiségű csapadék bekövetkeztének a valószínűségére, a szél és a hőmérséklet különböző küszöbértékeit meghaladó előrejelzési értékek bekövetkeztének a valószínűségére.

A pontra adott előrejelzések megvalósítása: automatizálás és a mezőszerkesztő eljárás

Könnyen belátható, hogy az adott pontokra, részletes időbeli felbontásra irányuló előrejelzési igények kielégítésére a klasszikus előrejelzési folyamat nem működhet. Az előrejelző egymaga képtelen ennyi adatot, információt áttekinteni, szintetizálni, több száz helyre vonatkozóan a modell eredményeit módosítani. Tehát új technikát kell meghonosítani az ilyen típusú előrejelzések készítésére. Az új technika lényege az alábbiakban foglalható össze:

- Minden olyan folyamat, ahol az lehetséges automatizált legyen.

- Elismerve azt, hogy az előrejelző szubjektív döntése sok esetben lényeges javulást eredményezhet az előrejelzés pontosságában, meg kell hagyni számára a lehetőséget a modell outputok szubjektív módosítására.
- De eszközt kell adni a kezébe ahhoz is, hogy ezt a módosítást hatékonyan, minden modell rácspontra érintően elvégezhesse.

Az új rendszer kifejlesztésének alapvető lépései az alábbiak:

- Automatikus eljárások kifejlesztése a direkt modell outputként elő nem állítható időjárási elemek generálására. Köztudott, hogy az előrejelzések alapvető tartalmi elemeként számon tartott időképek (zápor, zivatar, köd, párásság, jégeső, stb.) nem szerepelnek, mint a numerikus modellek paraméterei. Tehát olyan algoritmusokat kellett kifejleszteni, amelyek a rendelkezésre álló modell adatokból ezt a döntést a szinoptikus helyett meghozzák.
- Eljárások kifejlesztése, amely a rácspontra adatokat a felhasználó által feldolgozható formába hozza. Mivel a felhasználók leggyakrabban szöveges előrejelzéseket igényelnek, kifejlesztésre került és operatíván alkalmazzuk azt az eljárást, amely előrejelzett adatokból automatikusan különböző hosszúságú és részletességű szöveget állít elő. Ugyancsak automatikusan készíthetők piktogramos előrejelzések is, és az adatfájlokat kérő felhasználók igényei is automatikus eljárásokkal kerülnek kielégítésre.
- A legnagyobb probléma, a modell outputok hatékony módosításának kérdése. A nyers modell outputokból a bemutatott automatizálási eljárásokkal könnyen készíthetünk pontokra, rácspontra előrejelzéseket, de ezek sok esetben nem lesznek összhangban a szinoptikusok által a modell outputok felülbírálatával, módosításával készített területi (régiós, országos) előrejelzésekkel. Ennek a problémának a megoldásához kell egy olyan hatékony eszköz az előrejelző kezében, amellyel képes minden rácspontra érintően ezt a módosítást interaktív módon elvégezni. Ez az új technika a *mezőszerkesztő eljárás*.

A mezőszerkesztőknél a központi kérdés a meteorológiai változók közötti kapcsolatok leírása, azaz a dinamikailag-fizikailag konzisztens módosítások megvalósítása. Természetesen a probléma egzakt megoldása egy teljes numerikus előrejelző modell használatát igényelné, ami a gyakorlatban nyilván megvalósíthatatlan, ezért többnyire nagyfokú egyszerűsítéseket alkalmaznak. A fő hangsúly általában a technikai eszközökön, a különböző interpolációkon és simításokon van, míg a konzisztencia biztosítására csak nagyon egyszerű összefüggéseket használnak.

Az OMSZ-nál használt mezőszerkesztő saját input és output formátummal rendelkezik és térképvetületen definiált derékszögű rácsot használ a számításokhoz. A program egyszerre több input modellt is képes használni, azaz az előrejelző eldöntheti, hogy a rendelkezésre álló modellek (ECMWF, ALADIN) közül melyik modellt választja ki a szerkeszteni kívánt időlépcsőhöz. A program három különböző típusú időjárási változót különböztet meg: skalár (pl. hőmérséklet), vektor (pl. szél) és időképet (pl. köd). Ez utóbbit a modell outputokból előre ki kell számítani a rendelkezésre álló eljárásokkal.

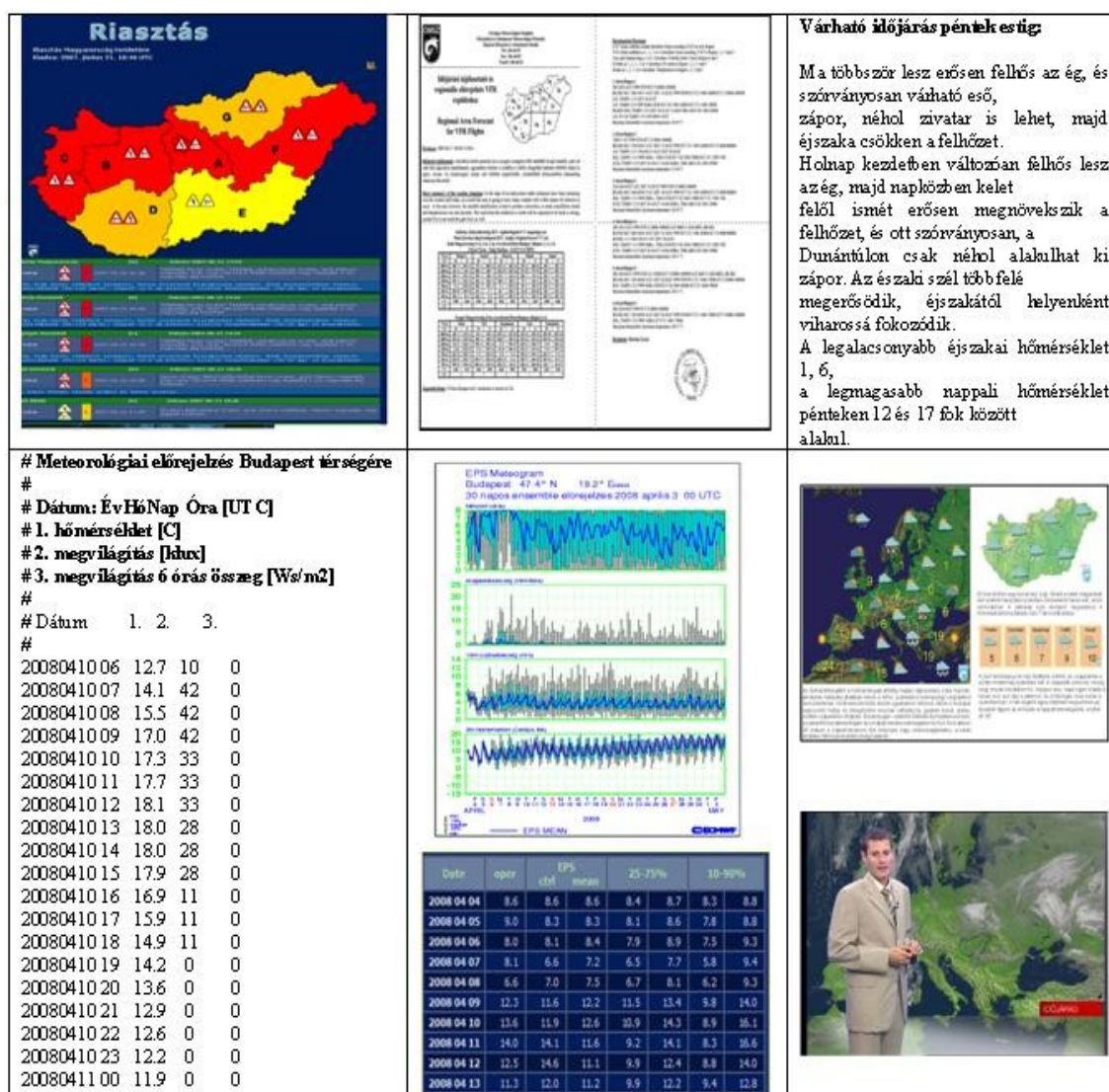
A szerkesztésnél az alábbi beépített funkciók állnak rendelkezésre:

- mező módosítása az izovonalak kiépítése alapján,
- egy adott pontbeli érték módosítása, majd a módosítás kiterjesztése a környező pontokra a távolsággal változó mértékben,
- kijelölt tartományok áthelyezése.

Egyszerre csak egyetlen változó egyetlen időlépcsője szerkeszthető, de lehetséges a kijelölt területre vonatkozó átlag időbeli menetének meteogram szerű megjelenítése és ezen keresztül az időbeli változás módosítása is. Gyakorlatilag a leírt módon ugyanaz történik, mint amit az előrejelző eddig is elvégzett. Bizonyos paramétereket, bizonyos időpontban módosított. Az óriási különbség az, hogy amíg ezt eddig csak néhány helyre tudta megtenni, azt most egyszerre, egy eszköz alkalmazásával minden modell rácspontra megteheti. Ezzel az eljárással tehát elkerülhető az egymással nem konzisztens előrejelzések kiadása.

Előrejelzési produktumok és a felhasználók

A fent részletezett folyamat eredményeként számtalan típus-produktum, vagy egyedi, speciális igényeket kielégítő produktum keletkezik, amelyekből ízelítőül csak néhány példát mutatok be a 4. ábrán.

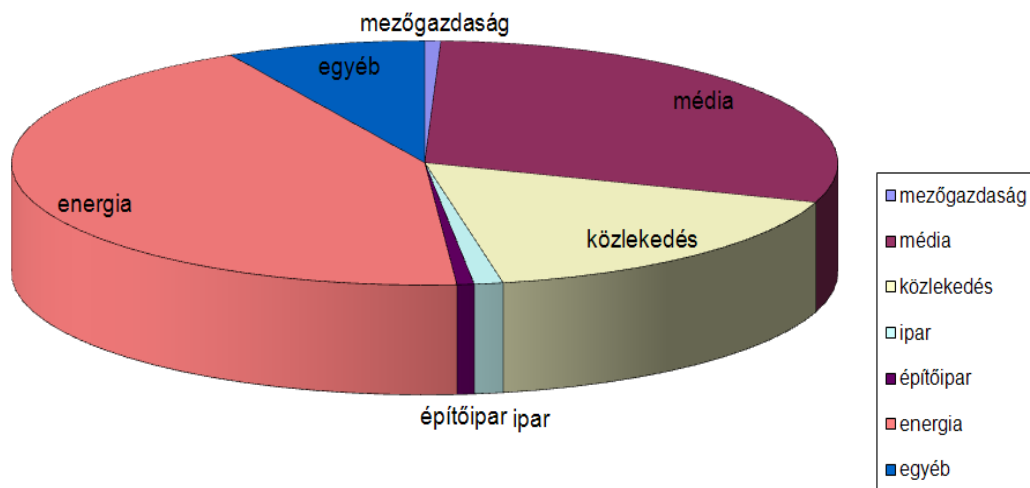


4. ábra. Előrejelzési produktumok.

A meteorológiai előrejelzések felhasználóinak köre széles. A Szolgálat Statútumából következően alapvető feladat az állami alapfeladatként előírt igények kielégítése. Ide tartoznak az élet- és vagyónvédelmi célokból készült előrejelzések, a balatoni és velencei tavi viharjelzés és a nagyközönség számára az előrejelzési alapinformációk előállítás. Ezen kívül nem a központi költségvetésből finanszírozva, szerződésben, vagy együttműködési megállapodásban rögzített módon széles skálán kerülnek ki felhasználó orientált előrejelzések az alábbi célokra:

- repülésmeteorológiai előrejelzések (nagygépes, VFR, sportrepülés részére),
- hidrológiai célokra használt mennyiségi csapadék előrejelzések,
- a közlekedés részére készülő előrejelzések,
- különböző időtávra és területre szolgáltatott előrejelzések az ipar, elsősorban az energiaipar és az építőipar számára,
- szolgáltatások a média részére (TV, rádió, újságok),
- előrejelzések a mezőgazdaság számára,
- sport és szabadidő programok biztosítása.

2008-ban a Szolgálat 230 állandó partnernek adott előrejelzési szolgáltatásokat, ezek mellett 111 alkalmi megkeresés érkezett. Az előrejelzési szolgáltatásokért kapott bevétel gazdasági szektoronkénti megoszlása az 5. ábrán látható.



5. ábra. Az előrejelzési szolgáltatások bevételeinek ágazatok szerinti megoszlása, 2008.

Verifikálás

Ahogy már említettük, az alap előrejelzésnél bemutatott kódolt forma lehetővé teszi a prognózisok automatikus verifikálását is. Az automatikus verifikálás célja egyrészt a prognózisok objektív értékelése, mind belső használatra az előrejelző munka hatékonyságának érdekében, mind külső használatra az üzleti partnereknek, felhasználóknak készítendő verifikációs kiadvány céljából. Másrészt fontos szempont, hogy ezzel a módszerrel a prognózisok összehasonlíthatók az ALADIN és az ECMWF modellekből készített előrejelzésekkel, ami a modellek hatékonyabb felhasználásához vezet.

A verifikált meteorológiai elemek az alábbiak:

- hőmérséklet (*minimum, maximum*),
- csapadék (*mennyiség az 1–2. napra, 5 és 20 mm-es csapadék valószínűsége a 3–7. napig*),
- felhőzet,
- szél (*erősség, irány, lökés*).

A különböző időjárási elemek egyenkénti értékelése mellett érdemes egy komplex verifikációs mutatót is létrehozni ezek valamilyen kombinációjából. Egy ilyen mérőszám összesítetten minősíti az adott napon, vagy az adott hosszabb időszak alatt kiadott prognózisokat. Ebben a komplex mutatóban minden egyes verifikált elem esetén a legjellemzőbb statisztikai mérőszámot vesszük figyelembe, azokat előre meghatározott súllyal szorozzuk, majd összegezzük. Az előrejelzők konszenzusaként létrehozott komplex mutató a következő statisztikai mérőszámokat és súlyokat (arányokat) tartalmazza:

- Hőmérséklet: minimum (RMSE) 25%, maximum (RMSE) 25%, összesen 50%.
- Csapadék: egzisztencia (PC) 10%, mennyiség (MAE) 15%, összesen 25%.
- Szél: átlagszél (RMSE) 5%, szélökés (RMSE) 7,5%, összesen 12,5%.
- Felhőzet: (RMSE) 12,5%.

Az előrejelzések verifikációja folyamatos. A hetenkénti kiértékelt prognózisok verifikációs eredményei az Időjárás Előrejelző Osztály faliújságján állandóan megtalálhatók, hogy az előrejelzők saját maguk is ellenőrizhessék munkájukat. Ezen felül éves összefoglaló értékelés is készül a Magyarország 6 körzetére, 6 napra kiadott előrejelzések verifikációs eredményeiről, amelyet igény esetén a partnereknek is megküldünk.

Egységes időjárési és éghajlati előrejelző rendszer kifejlesztése az Országos Meteorológiai Szolgálatnál

Horányi András

Országos Meteorológiai Szolgálat
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1.; e-mail: horanyi.a@met.hu

Összefoglaló – A számszerű előrejelző modellek produktumai nélkül napjainkra mértékadó időjárás előrejelzés már nem készülhet, de az éghajlati projekciók alapjait is a numerikus modellek eredményei szolgáltatják. Ez nem is meglepő, hisz egy olyan nem-lineáris rendszer esetében, mint a légkör csak modellezés révén tehetünk becsléseket a jövőbeli fejlődésére (s akkor még nem beszéltünk az éghajlatról, amelynek a légkör „csak” egyik eleme az éghajlati rendszeren belül). Az elmúlt, hozzávetőlegesen 20 esztendőben az Országos Meteorológiai Szolgálat is felismerte, hogy a növekvő igényeket kizárólagosan numerikus modellek alkalmazásával elégítheti ki, s ezért személyi, számítógépes és távközlési erőforrásokat biztosít a modellek fejlesztéséhez, fenntartásához és (operatív) futtatásához. Az alábbiakban röviden áttekintjük annak az útnak a legfontosabb eredményeit, amelyet az Országos Meteorológiai Szolgálat bejárt a numerikus prognosztikai fejlesztések és alkalmazások tekintetében. A rendelkezésre álló és a fejlesztés alatt levő modellek segítségével napjainkra lehetőség nyílt arra, hogy egy olyan egységes időjárési és éghajlati előrejelző rendszert fejlesszünk ki, amely alkalmas az időjárás ultrarövidtávú előrejelzésétől kezdve a középtávú előrejelzéseken keresztül az éghajlati jövő becsléséig a különböző tér- és időskálájú folyamatok leírására konzisztens és következetes módon. E rendszer alkalmas a Szolgálattal szemben támasztott növekvő igények kielégítésére.

A cikkben ismertetjük a numerikus előrejelző modellek szakmai alapjait, a kategorikus (determinisztikus) és ensemble előrejelzések együttes alkalmazási lehetőségeit, valamint a tervezett egységes előrejelző rendszer koncepcióját és egyes részleteit.

Bevezetés

Napjainkban a számszerű előrejelző modellek produktumai nemcsak a napi előrejelző munkában játszanak kulcsszerepet, hanem az éghajlati projekciók alapjául is szolgálnak. Más szavakkal kifejezve: manapság már nem képzelhető el olyan mértékadó előrejelzés (s itt az előrejelzés alatt a légkör, illetve a teljes éghajlati rendszer jövőbeli alakulását értjük), ami nem numerikus előrejelző modellek eredményei alapján kerülne elkészítésre (persze ez a tény nem jelenti azt, hogy a modellek mindig tökéletesek és jó előrejelzéseket szolgáltatnak). A numerikus prognosztika alapjait, valamint a numerikus előrejelző modellek legfontosabb részeit, részleteit a következő fejezetben ismertetjük. Itt csak arra szeretnénk röviden kitérni, hogy az elmúlt években egyre szélesebb körben alkalmazott valószínűségi előrejelzések milyen formában és mértékben egészítik ki a hagyományos kategorikus (determinisztikus) előrejelzéseket. A „kategorikus” szót nem véletlenül használjuk az elterjedtebb „determinisztikus” szóhasználat helyett, ugyanis a valószínűségi előrejelzéseket megalapozó ensemble előrejelzések minden egyes eleme szintén determinisztikus, a különbség csupán abban áll, hogy az együttes előrejelzések-nél több ilyen előrejelzést készítünk és értékelünk ki. Kétségtelen, hogy a „kategorikus” szó is félreérthető, hisz itt nem kategóriákról van szó, hanem egy „határozott kijelentés-ről”. A valószínűségi előrejelzésekkel kapcsolatban a legfontosabb kiinduló megállapítás az, hogy egy előrejelzés akkor és csak akkor lehet teljes, ha nemcsak egy adott esemény bekövetkezéséről ad számot, hanem annak beválási valószínűségét is prognosztizálja. Önmagában tehát az nem feltétlenül mond sokat, hogy például holnapután eső

várható, de az már annál többet, ha azt állítjuk, hogy holnapután az eső bekövetkezésének a valószínűsége 80%. Mindez amiatt fontos és jelentős, mert a meteorológiai szituációtól függően hol nagyobb, hol kisebb megbízhatóságú előrejelzéseket tudunk készíteni, s ennek mértékét képesek vagyunk számszerűsíteni és átadni felhasználóink számára (I. ábra). Ez abból adódik, hogy a légkör egy nem-lineáris (és lokálisan kaotikus) rendszer, amelynek az előrejelezhetősége térben és időben nagy változékonyságot mutat. Az előrejelezhetőség egyik leglényegesebb forrása az a tény, hogy a légkör nagyfokú érzékenységet mutat kiindulási állapotaira, azaz nagyon kis kezdeti pontatlanságok nagyon nagy előrejelzési bizonytalansághoz vezethetnek. A modellek tekintetében ez annyit jelent, hogy a kezdeti feltételek meghatározásában ejtett kis hiba eredményeképpen az előrejelzéseink akár jelentősen pontatlanok is lehetnek. Ezt felismerve az együttes (ensemble) előrejelző rendszerek alkalmazása esetén nem egy kezdeti feltételt határozzunk meg, hanem többet, még hozzá olyanokat, amelyek bármelyike valós és reális légköri kiindulási állapot lehet. A kicsit különböző kezdeti állapotokból származtatott előrejelzések együttes kiértékelése fogja azt az információt megadni, hogy az adott helyzetben a légkör viselkedése milyen mértékben jelezhető előre, vagyis milyen mértékben áll fenn például a kezdeti feltételekre vonatkozó érzékenység. Amennyiben az összes előrejelzés hasonló lesz, úgy az előrejelzéseink mellé egy magas bevalási (valószínűségi) mutatót tudunk hozzárendelni, míg ellenkező esetben éppen a bizonytalanságukról és annak mértékéről tudunk számot adni. Fontos hangsúlyozni tehát, hogy az előrejelzésekhez rendelt valószínűségek többlet információt jelentenek, jelenthetnek a felhasználók számára és nem tudásunk korlátainak a bizonyossága (mint ahogy néha interpretálják).

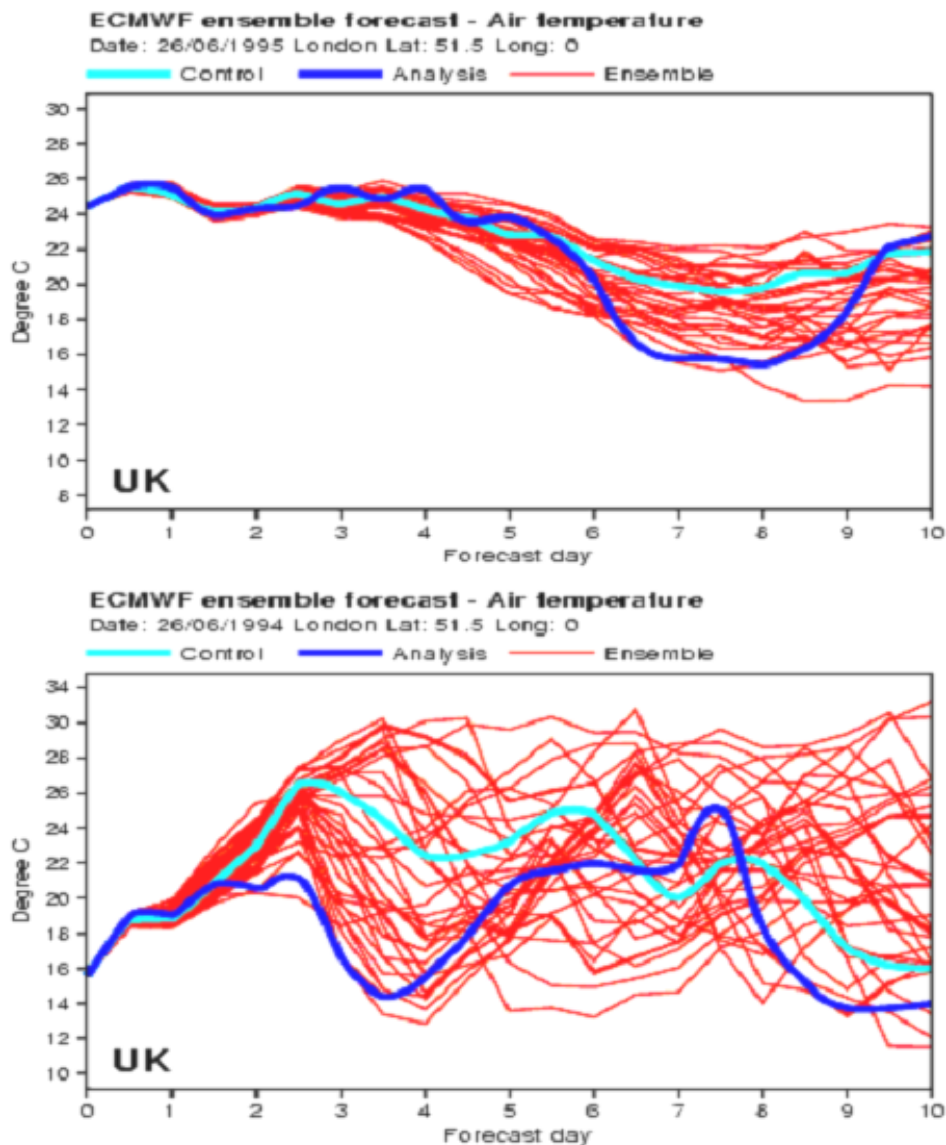
A továbbiakban tehát először röviden ismertetjük a numerikus prognosztika alapjait, fejlesztési irányait, majd részletezzük az Országos Meteorológiai Szolgálat egységes és konzisztens időjárás- és éghajlati előrejelző rendszerének az elemeit, végül pedig összefoglaljuk a legfontosabb megállapításainkat és jövőbeli terveinket.

A numerikus prognosztika alapjai

A XX. század elején merült fel annak a gondolata, hogy elméletileg lehetséges az időjárás előrejelzése a légköri folyamatokat leíró fizikai törvényszerűségek alkalmazása révén. Ezek a fizikai törvények alapvetően a légköri mozgásokat leíró összefüggések (az impulzus és az impulzuszómomentum megmaradása), az energia, illetve a tömeg megmaradása (Newton II. törvénye, a termodinamika I. főtétele, a száraz és a nedves levegő kontinuitási egyenlete). Ezt az egyenletrendszert, kiegészítve az állapot-egyenlettel, nevezzük a légkör hidro-termodinamikai egyenletrendszerének. Ez egy hét egyenletet tartalmazó nem-lineáris parciális differenciál egyenletrendszer. Az ismeretlen – prognosztikai és diagnosztikai – változók száma is hét: a három szélkomponens, a hőmérséklet, nedvesség, nyomás és a sűrűség. Elvben tehát lehetőség kínálkozik az egyenletrendszer megoldására, még akkor is, ha analitikus megoldás nem létezik.

A légköri folyamatokat leíró rendszer determinisztikus, azaz megfelelő kezdeti és (alsó-, felső, illetve szükség szerint oldalsó) határfeltételek megadása esetén az egyenletrendszer megoldásával meghatározhatjuk a rendszer jövőbeli állapotát. A légkör hidro-termodinamikai egyenletrendszerének megoldására matematikai modelleket konstruálunk, amelyek természetesen tartalmazhatnak egyszerűsítő feltételeket a teljes egyenletrendszerre vonatkozóan. Ilyenkor a modellezni kívánt egyenleteket egy-

szerűsítjük, s így azokat nem teljes komplexitásukban oldjuk meg. Gondoljunk csak a széles körben alkalmazott kvázi-hidrosztatikus közelítésre, amikor is a vertikális gyorsulást elhanyagoljuk a horizontálishoz képest. Az így felállított matematikai modellt (egyenletrendszert) közelítő numerikus sémák segítségével (többnyire diszkrét rácspontokban) oldjuk meg.



1. ábra. Példa nagy előrejelezhetőségű és korlátozott előrejelezhetőségű meteorológiai szituációkra. Középtávú fáklya diagramok Londonra két egymást követő év ugyanazon napjára. A felső esetben a bizonytalanság kicsi (a légköri előrejelezhetőség nagy), míg az alsó esetben a bizonytalanság igen nagy (az előrejelezhetőség kicsi).

A numerikus modellek legfontosabb részei az adatasszimiláció (az az eljárás, amely során meghatározzuk modelljeink kezdeti feltételeit), valamint a modell integrálása (az előrejelzés numerikus elkészítése). Az utófeldolgozás (az eredmények konvertálása a felhasználók által megkívánt formába) folyamata szigorú értelemben már nem a

modell „tartozéka”, de mégis elengedhetetlen az információ felhasználóknak történő átadásában.

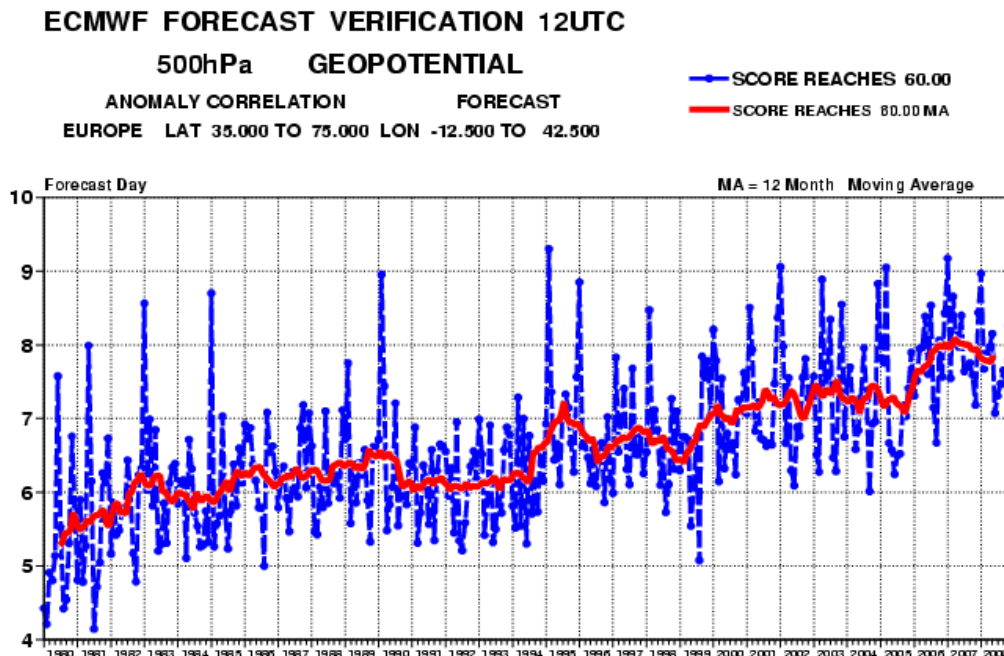
A modell integrálása előtti legfontosabb feladatunk a modell számára megfelelő kezdeti feltételek biztosítása. Ez a gyakorlatban a modell prognosztikai változóinak háromdimenziós rácson való előállítását tételezi fel. Ehhez a feladathoz a lehetőségek adta határokon belül minden rendelkezésre álló információt felhasználunk, melyek elsősorban a mérési adatok (felszíni mérések, rádiószondás felszállások adatai, műholdas és radar adatok, stb.), valamint a numerikus modell korábbi időpontból futtatott, az adott időpillanatra vonatkozó előrejelzése. Ez utóbbi a „first guess”, amely a légkör közelítő állapota a modell egy korábbi, tipikusan 6 órás, előrejelzése szerint. A fentiek mellett természetesen más információk is felhasználhatóak, mint például bármilyen egyéb törvényszerűség, melyet a légkörről feltételezhetünk az adott feladat megoldása során (például geosztrofikus kényszer vagy bármilyen más egyensúlyi feltétel). A fenti két vagy három alapvető információforrást valamilyen optimális eredménnyel kelesztető módszerrel (például optimális interpoláció, vagy variációs analízis technika, hogy csak a legismertebbeket és legelterjedtebbeket említsük) kombináljuk és az így kapott értékek fogják szolgáltatni a modell kezdeti állapotát. Az különböző információk szintézisének arra törekszünk, hogy az egyes adatokat megbízhatóságuk függvényében súlyozzuk az analízis eljárás során (azaz a pontosabb, megbízhatóbb információkat nagyobb súllyal vesszük figyelembe, mint a kevésbé pontosakat). Az adatasszimiláció kifejezése azt jelenti, hogy a fenti módszerrel előállított kezdeti feltételeket adott időintervallumonként (tipikusan 6 óránként), ismétlődően állítjuk elő egy ún. adataszimilációs ciklust létrehozva.

A fenti adatelőkészítő lépések után kerül sor a légköri hidro-termodinamikai egyenletrendszer megoldására, azaz a *modell integrálására*. Az integráláshoz szükséges van a tér- és időbeli diszkretizációra, vagyis az egyenleteket egy térbeli (horizontális és vertikális) rácson, időlépcsők bevezetésével oldjuk meg. A térbeli rács létrehozásának szükségessége szigorú értelemben csak a rácspont modellekre igaz, ugyanis az ún. spektrális módszer alkalmazása esetén a meteorológiai változókat folytonos függvények lineáris kombinációjaként állítjuk elő. Az időbeli diszkretizáció annyit jelent, hogy az előrejelzést lépcsőzetesen végezzük el, mindig egy időlépcsőnyi időintervallummal jelezve előre a légkör állapotát mindaddig, amíg nem érkezőnk el a teljes előrejelzési intervallum végéig. Az egyenletekben megjelenő dinamikai tagokat (mint például a különböző fellépő erőhatásokat) explicit módon tudjuk származtatni. Azokat a kis skálájú jelenségeket, amelyeket a modell véges felbontása, illetve az adott folyamat bonyolultsága miatt egyébként nem tudnánk figyelembe venni, ún. „parametrizációk” révén építjük be a modellekbe. Ilyen jelenség például a csapadékképződés mechanizmusa, a sugárzás, konvekció, felszíni határréteg jelenségei vagy a turbulencia.

Az előrejelzéseket a globális modellek az egész Földre vonatkozóan készítik el, míg az ún. korlátos tartományú modellek a Föld egy adott tartományára adják meg a hidro-termodinamikai egyenletrendszer megoldását. Ez utóbbi esetben az alsó és felső határfeltételek mellett a megfelelő oldalsó határfeltételekről is gondoskodni kell. Az oldalsó határfeltételeket többnyire a globális modellek előrejelzései szolgáltatják a korlátos tartományú modellek számára.

Ahogy arra már korábban utaltunk a következő modellezési lépés, az utófeldolgozás szigorú értelemben már nem része az előrejelző modelleknek, mindazonáltal a modelleredmények értelmezése és alkalmazhatósága tekintetében mégis döntő jelentőségű. Ez a tény abból adódik, hogy a modellek által használt koordináta-rendszerek, il-

letve változók (melyeket úgy választunk meg, hogy a modell integrálása a lehető leghatékonyabb legyen) többnyire nem optimálisak a felhasználói igények kielégítésére. A modell eredményeit tradicionális koordináta-rendszerekbe interpoláljuk (például a széles körben használt nyomási felületekre), illetve olyan – a számításokban nem szereplő – változókat is előállítunk, melyek nagyban segítik az előrejelzési eredmények alkalmazását (például frontparaméterek, vagy akár egy előrejelzett „műholdkép” származtatása).



2. ábra. Az ECMWF középtávú előrejelző modell beválása 1980-tól napjainkig (1980-ban egy 5 napos előrejelzés volt olyan sikeres, mint 2008-ban egy 8 napos).
Forrás: ECMWF (www.ecmwf.int). (Lásd Bonta Imre cikkét is a jelen kötetben.)

Napjainkban a numerikus modellek fejlesztése folyamatos, egyre jobb és pontosabb eljárásokat alkalmazunk az operatív gyakorlatban. A fejlesztés, pontosítás során a legegyszerűbb megoldás a modellek térbeli felbontásának növelése (több rácspont alkalmazása akár vízszintesen, akár függőlegesen; tulajdonképpen ez nem is modell fejlesztés, hisz „csak” a bővülő számítástechnikai lehetőségeket aknázzuk ki). Mindazonáltal a térbeli felbontás növelése nem feltétlenül jelenti az előrejelzések minőségének automatikus javulását (még akkor sem, ha intuitív módon ezt váránk). A fejlődés másik lehetséges útja az, hogy tovább csökkentjük azon közelítések számát, amelyek az alapegyenletekre vonatkoznak. Erre tipikus példa a kvázi-hidrosztatikus közelítés elhagyása, azaz a teljes háromdimenziós mozgásegyenlet-rendszer felírása és megoldása. Az így létrejövő nem-hidrosztatikus modelleket napjainkban már számos országban alkalmazzák az operatív gyakorlatban. A modellekben használt numerikus sémákat is folyamatosan tökéletesítik, hasonlóan az egyes modellezési részterületekhez, mint például az adatasszimiláció vagy a fizikai parametrizációs eljárások vagy éppen a korlátos tartományú modellek oldalsó határfeltételeinek minél pontosabb megadása.

Többek között a fenti fejlesztéseknek köszönhető, hogy a numerikus modellek az elmúlt évtizedekben jelentős fejlődésen mentek keresztül (2. ábra), s ennek következtében és ezzel párhuzamosan a meteorológiai előrejelzések növekvő megbízhatósága ma már társadalmilag is elfogadott és elismert.

Egységes időjárási és éghajlati előrejelző rendszer

Először is röviden tekintsük át azt, hogy melyek azok a jellemzők, amelyek alapján egy előrejelző rendszert konzisztensnek, illetve egységesnek lehet tekinteni:

- A globális (vagy egy nagyobb tartományra futtatott regionális modell) és a korlátos tartományú modell között az oldalsó határfeltételek teremtenek kapcsolatot, azaz konzisztens rendszer esetében az alkalmazott globális modell, illetve az ebbe „ágyazott” regionális és lokális modellek az oldalsó határfeltételeken keresztül érintkeznek egymással (és ily módon nem függetlenek egymástól).
- Az előző pontban említett határfeltételek mellett fontos és kívánatos a „meghajtó”, például az alkalmazott globális modell és a „meghajtott” korlátos tartományú modell közötti dinamikai és fizikai konzisztencia biztosítása annak érdekében, hogy a két modell eltérő fizikai és dinamikai tulajdonságai (az oldalsó határfeltételeken keresztül) ne okozhassanak olyan nemkívánatos jelenségeket (zajokat, hullámokat), melyek negatív hatással lehetnek az előrejelzés minőségére.
- Szoros kapcsolatnak kell fennállnia a modellekben alkalmazott adatasszimilációs rendszer és az együttes (ensemble) előrejelzések között, hisz az együttes előrejelzések készítése során a különböző kezdeti feltételek megállapításakor olyan perturbációkat ültetünk a referencia kiindulási állapotra, amelyek az analízis (adatasszimiláció) hibáinak megfelelőek (más szavakkal jól kell ismernünk az adatasszimilációs hibákat, annak érdekében, hogy a kiindulási feltételekben rejlő bizonytalanságokat leíró perturbációkat megfelelő módon tudjuk származtatni).
- Négydimenziós adatasszimilációs rendszerek esetében a fentiek mellett (mivel egy időintervallumon szándékozunk a legjobb modell trajektóriát meghatározni) alkalmazzuk a fizikai parametrizációs eljárások egyszerűsített változatait is, azaz ezen négydimenziós rendszerek nem függetlenek az alkalmazott fizikai parametrizációs eljárásoktól sem.
- Lényegi szempont az is, hogy az egységes rendszer lehetőleg egy egységes elvek alapján kialakított számítógépes kódrendszerben jelenjen meg, ami nagyban megkönnyíti a rendszer fenntarthatóságát.
- A valószínűségi (ensemble) előrejelző rendszernek képesnek kell lennie az előrejelzéseinkkel kapcsolatos összes bizonytalanság számszerűsítésére.

A fenti ismérvek és lehetséges modellek közötti kapcsolódási pontok alapján a célunk egy olyan egységes és konzisztens időjárási és éghajlati előrejelző rendszer kiépítése, amelynek az időjárási szegmense a középtávú előrejelzések alapján várhatóan bekövetkező szélsőséges jelenségek korai felismerésén, annak rövidtávú pontosításán, illetve ultrarövidtávú térbeli és időbeli lokalizációján alapszik. Az éghajlati szegmens pedig a Kárpát-medencében várható éghajlatváltozás regionális részleteit térképezi fel regionális klímamodellek alkalmazásán keresztül. Az egyes idekapcsolódó konkrét modelleket, illetve azok alapvető jellemzőit az *I. táblázat* szemlélteti.

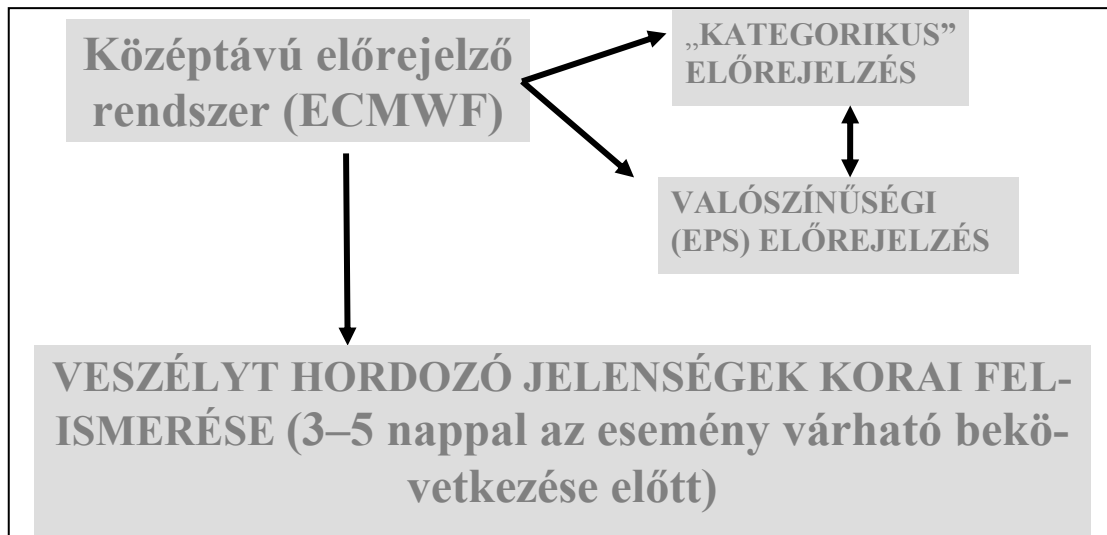
	Éghajlati skála	Középtáv (szezonális skála)	Rövidtáv	Ultra-rövidtáv
Modell(ek)	ALADIN-Climate és REMO	ECMWF: IFS	ALADIN	AROME
Ensemble komponens	Multi-modell	ECMWF EPS	ALADIN EPS	---
Tipikus felbontás és időtáv	10–25 km; 2021–2050, 2071–2100 (30 év)	25 km 10 napig 80 km 15 napig (EPS: 50 km)	8 km (EPS: 12 km), 2 nap	2–3 km; 24 óra
Oldalsó határfeltételek	ARPEGE-Climate, ECHAM5	---	ECMWF: IFS (ARPEGE EPS: PEARP)	ALADIN
Megjegyzés	ELTE: PRECIS és RegCM modellek	---	ALARO	---

I. táblázat. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazandó egységes és konzisztens időjárási és éghajlati előrejelző rendszer konkrét elemei és azok alapvető jellemzői.

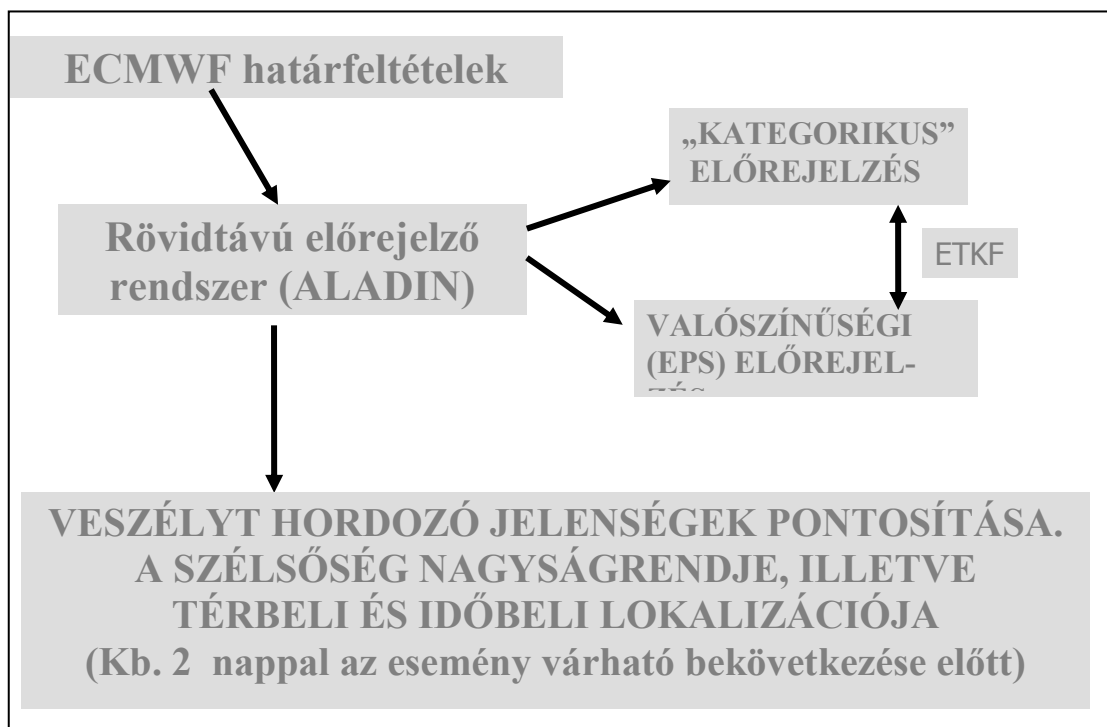
A gyakorlatban az időjárási szegmens kiindulási pontja az ECMWF középtávú előrejelző rendszere, s azon belül is a valószínűségi előrejelzéseket biztosító EPS rendszer (ami jelenleg 50 + 1 tagból áll), ami az előrejelzők számára jóval a várható bekövetkezési idő előtt, korai stádiumban felismeri azokat a meteorológiai objektumokat, amelyek helyi szélsőséges jelenségekkel járhatnak (3. ábra). Azokat a jelenségeket, amelyekre a középtávú előrejelző rendszer révén figyeltünk fel, tovább pontosíthatjuk középtávú, majd rövidtávú kategorikus és rövidtávú valószínűségi előrejelzésekkel, ezzel is finomítva a szélsőséges jelenség intenzitását, térbeli és időbeli elhelyezkedését (4. ábra). Az utolsó lépésben a jelenség bekövetkezése előtti 12–24 órában a pontos térbeli és időbeli behatárolás következhet egy ultrarövidtávú nem-hidrosztatikus modell többszöri futtatásával (5. ábra). A fenti koncepció megvalósításához először is optimalizálnunk kell az ECMWF középtávú (elsősorban valószínűségi) előrejelzéseinek hazai alkalmazását (egyéb, az ECMWF együttműködéssel kapcsolatos részletekről *Ihász István* cikke ad felvilágosítást ugyanebben a kötetben). Helyi viszonylatban azon kell dolgozunk, hogy operatív módon alkalmazzunk egy 5–10 km-es felbontású modellt, amely ECMWF határfeltételeket használ, s a „szokásos” kategorikus (determinisztikus) előrejelzések mellett valószínűségi (ensemble) előrejelzések előállítására is képes. A modellkaskád utolsó lépéseként olyan néhány km-es felbontáson működő nem-hidrosztatikus modellt kell alkalmaznunk, amely képes a szélsőséges jelenségek pontos időbeli és térbeli behatárolására és megfelelő adatasszimilációs rendszerrel támogatva naponta többször – legalább négyszer, de lehetőség szerint napi nyolcszor is – tud frissülő előrejelzéseket szolgáltatni.

Az éghajlati szegmens fejlesztése során először is az adaptált regionális klíma-modellek múltra vonatkozó szimulációit próbáljuk tökéletesíteni (ez természetesen a modellek fejlesztését is jelenti), majd a már tökéletesített (ALADIN-Climate és REMO) modell változatokkal jövőre vonatkozó projekciókat készítünk (2021–2050-es és 2071–

2100-as időszakokra 10 és 25 km felbontásban. A regionális klímamodellek esetében a projekciókban rejlő bizonytalanságokat elsősorban több modell együttes használatával próbálják számszerűsíteni (ugyanis a klímamodellezésben a kezdeti feltételekre vonatkozó érzékenység nem releváns, hisz globális skálán a külső kényszerek megváltozása az, ami az éghajlati rendszer új állapotát eredményezi, eredményezheti, míg lokális skálán a globális modellekből származó határfeltételek kormányozzák a regionális klímamodelleinket).



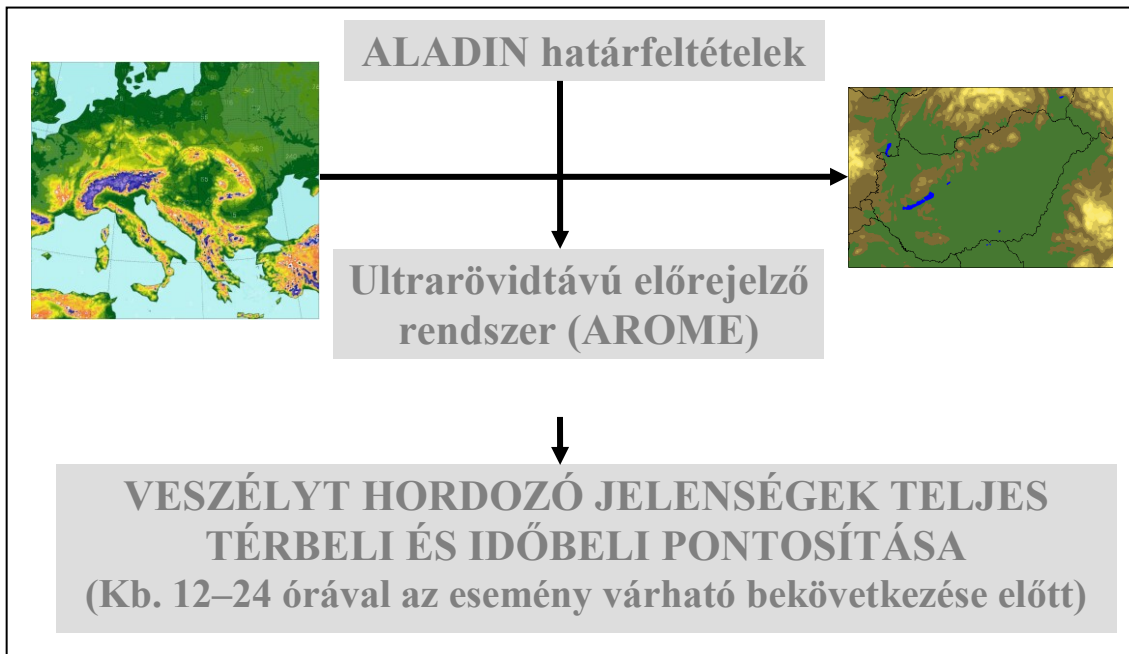
3. ábra. Az egységes időjárási előrejelző rendszer középtávú szegmense.



4. ábra. Az egységes időjárási előrejelző rendszer rövidtávú szegmense.

Ez a tény indokolja azt, hogy az időjárási modellektől eltérően a klímamodellek

esetében több modellre támaszkodunk párhuzamosan, illetve különböző forgatókönyveket tekintünk a légköri szén-dioxid koncentráció várható alakulására (és ezen különböző forgatókönyvekre futtatjuk le modelljeinket). A regionális klímamodelleink elsődleges információforrást jelentenek, jelenthetnek az éghajlatváltozás hatásait vizsgáló szakemberek számára.



5. ábra. Az egységes időjárás-előrejelző rendszer ultrarövidtávú szegmense, valamint a határfeltételeket biztosító ALADIN modell és az AROME modell tartománya.

Az alábbiakban először ismertetjük az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) egységes előrejelző rendszere egyes elemeivel kapcsolatban tervezett fejlesztő és kutató munka részleteit, majd röviden bemutatjuk az operatív alkalmazás konkrét terveit.

AROME nem-hidrosztatikus modell

Az AROME modellt a közeli múltban adaptáltuk, majd esettanulmányokon vizsgáltuk alkalmazhatóságát mindenekelőtt a nagy csapadékos helyzetek előrejelzésében (lásd *Kullmann László* cikkét ugyanebben a kötetben). Az eddigi vizsgálatok arra mutattak rá, hogy az eredetileg minimális (magyarországnyi) méretűnek választott modell tartomány túlságosan kicsi (lásd az 5. ábrán megjelenő AROME tartományt), ugyanis ezen tartomány alkalmazása esetén a határfeltételek hatása dominál, s így a modell nem képes meghajtó (ALADIN) modellnél jobb eredmények előállítására. Ily módon elengedhetetlen a modelltartomány megnövelése, ami természetesen a számítógépes költségek növekedését is eredményezi. Terveink szerint az új modelltartományon párhuzamos tesztek fogunk végrehajtani, azaz rendszeresen futtatjuk az AROME modellt és eredményeit szisztematikusan hasonlítjuk össze az ALADIN modell eredményeivel. A rendelkezésre álló számítógépes kapacitás függvényében a modell teljes operatív bevezetésének vár-

ható időpontja 2009 vége.

ALADIN-AROME adatasszimilációs fejlesztések

Az OMSZ az ALADIN adatasszimilációs fejlesztések élvonalába tartozik (ezt jól illusztrálja az a tény, hogy az ALADIN tagországok közül először vezettük be a háromdimenziós variációs adatasszimilációs sémát operatív módon), illetve jelenleg koordináló szerepet töltünk be ezen a területen a LACE (www.rclace.eu) projektben. A hagyományosan magas színvonalú fejlesztő munka folytatását az alábbi feladatok megvalósításában látjuk:

- A háromdimenziós variációs adatasszimilációs rendszer (3d-var) időbeli kiterjesztése a 3d-fgat (átmenet a háromdimenziós és négydimenziós rendszerek között, amikor már egy időintervallumon veszünk figyelembe megfigyeléseket, de a modell állapotok csak egy meghatározott időpontra vonatkoznak), illetve 4d-var rendszerekké (teljes négydimenziós variációs adatasszimiláció, amikor a megfigyelések mellett a modell állapotokat is egy időintervallumon vesszük figyelembe és hasonlítjuk össze). A négydimenziós adatasszimilációs rendszerek eddig elsősorban szinoptikus skálájú folyamatok leírására lettek kifejlesztve a mezoskálájú fejlesztés, és alkalmazás komoly szakmai kihívás.
- A mezoskálájú adatasszimilációba bevont nagy felbontású megfigyelések bővítése különös tekintettel a radar adatokra (a műholdas adatok bevonása már most is folyamatban van).
- Az adatasszimilációs rendszerben használt előrejelzési (modell) hibákat leíró előrejelzési hiba kovariancia mátrix pontosítása az Ensemble Transform Kalman Filter (ETKF) eljárás segítségével, amely az ensemble módszer alapján a futtatásonként számolt előrejelzési hibákat használja fel az adatasszimiláció során (azaz az előrejelzési hibák meteorológiai szituáció függőek lesznek). Ez a fejlesztés tehát lehetővé teszi az adatasszimilációs és ensemble előrejelző rendszerek összekapcsolását és egymással kölcsönható alkalmazását.

A fenti feladatok mindegyike nagyon komoly szakmai háttérrel igényel, melyet csak team-munkában lehet megvalósítani, s amelyhez az ALADIN nemzetközi projekt megfelelő keretet biztosít.

Rövidtávú ensemble előrejelzések

A korlátos tartományú modelleken alapuló rövidtávú ensemble előrejelzések vonatkozásában is aktívan veszünk részt az ALADIN projektben. Az elmúlt időszakban már több módszert is teszteltünk annak érdekében, hogy a szélsőséges jelenségek előrejelzésére valószínűségi információt származtathassunk az előrejelző szakemberek számára. Ezen előzetes munkák alapján az alábbi fejlesztések megvalósítását tervezzük:

- Az ALADIN EPS rendszer teljes operatív bevezetése, ami az ARPEGE EPS rendszer dinamikai leskalázása az ALADIN modellel. Az ALADIN EPS rendszer a 18 UTC-s futtatás alapján 10 + 1 tagú ensemble-t állít elő 60 órás előrejelzési időtávig (bővebben *Hágel Edit* cikkében ugyanebben a kiadványban). Ez a rendszer kiegészülve az SRNWP-PEPS (európai operatív rövidtávú előrejelző modellekből kialakított együttes

előrejelző rendszer) és COSMO-LEPS (az ECMWF EPS rendszer dinamikai leskálázása a COSMO nem-hidrosztatikus modell segítségével) rendszerekkel jó háttérrel biztosít a magyarországi rövidtávú valószínűségi előrejelzések megalapozására.

- Az ALADIN modellen alapuló szinguláris vektorok származtatása az ALADIN EPS rendszer számára előállítandó kezdeti perturbációk meghatározásához. Az ALADIN EPS operatív együttes előrejelző rendszer további javítása a szinguláris vektorokon alapuló kezdeti perturbációk származtatásával.
- Részvétel a HIRLAM program által kezdeményezett GLAMEPS projektben, amelynek célja egy olyan „grand-ensemble” rendszer kifejlesztése, melynek elemei önálló, különböző típusú EPS rendszerek (tehát a különböző európai országok által futtatott EPS rendszereket egy olyan nagy EPS rendszerre szerkesztjük össze, amelyet amúgy az egyes résztvevő országok önmaguk nem lennének képesek előállítani).

Regionális klímamodellek

A regionális klímamodellekkel kapcsolatos tevékenységünk mintegy öt éves múltat tekintenek vissza, amikor is elkezdtek a REMO és az ALADIN-Climate modellek budapesti adaptálását. Az adaptációs munkák befejezése után különböző érzékenységvizsgálatokat hajtottunk végre az optimális tartomány méret és felbontás, illetve a felpörgési idő (az az időtartam, ami után a klímamodell már „elfelejti” a kiindulási felszíni viszonyokból adódó inkonzisztenciákat) meghatározására.

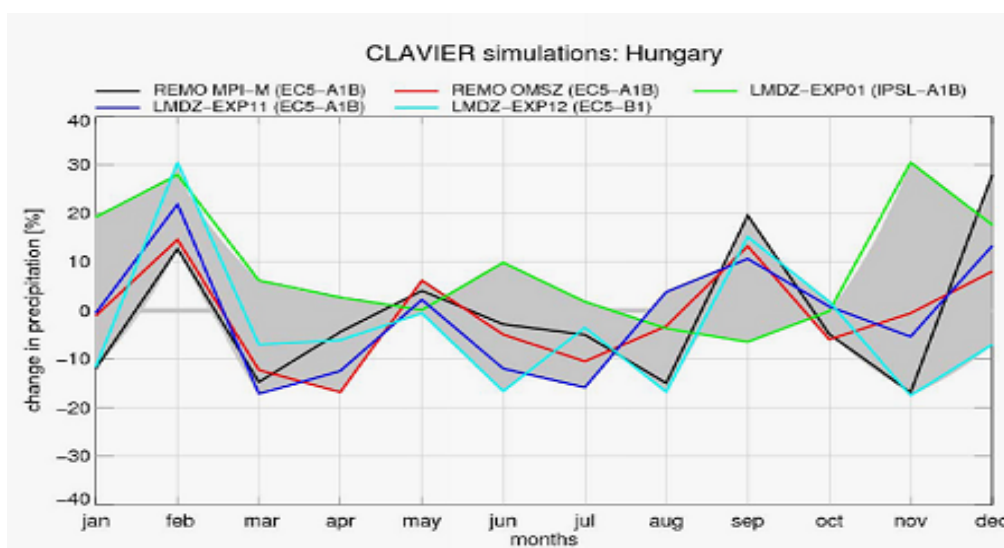
A következő lépés a modellek alapvető tesztelése a közelmúltba való futtatása, azaz a múlt éghajlatának rekonstruálása. A múltba vonatkozó eredményeket különböző megfigyelési adatbázisokkal hasonlítjuk össze és vonunk le következtetéseket a modelleink „minőségére” vonatkozóan. Az esetleges hibás teszt-szimulációk alapján igyekszünk modelleinket tovább fejleszteni, és tökéletesíteni mielőtt megkezdénénk a jövőre vonatkozó futtatásokat.

A regionális klímamodellek fejlesztésével párhuzamosan nemzetközi projektek révén egyre pontosabb globális klíma-modell eredményekhez is hozzájutunk. A jobb modellek és pontosabb határfeltételek segítségével megbízható regionális éghajlati forgatókönyvek megalkotását valósítjuk meg a 2021–2050-es illetve a 2071–2100-as időszakokra. Jelenleg Magyarországon az OMSZ-ban, illetve az ELTE Meteorológiai Tanszékén négy regionális klímamodell áll rendelkezésre (ALADIN-Climate és REMO modellek mellett az ELTE-n a PRECIS és RegCM modellek), melyeket tehát az ELTE-vel közösen szeretnénk szisztematikusan, kis elemszámú multi-modell együttes rendszerként kiértékelni. A négy modell révén tehát lehetőségünk nyílik a regionális projekciókban rejlő bizonytalanságok objektív, valószínűségi alapú számszerűsítésére (amire a 6. ábra szolgál illusztrációként). Végül, de nem utolsósorban folyamatosan építjük ki kapcsolatainkat az éghajlatváltozás hatásait vizsgáló szakemberekkel annak érdekében, hogy a hatásvizsgálattal foglalkozó kollegák kvantitatív, numerikus modelleken alapuló információkra alapozva tudjanak számot adni az éghajlatváltozás várható hatásairól.

- 2008 vége, 2009 eleje: az ALADIN modellen alapuló EPS rendszer teljes operatív üzembe állítása (időközben megvalósult), majd folyamatos további tökéletesítése.
- 2009 első fele: az ALADIN modell ECMWF határfeltételekkel működő változatának teljes bevezetése (időközben megvalósult, 7. ábra), valamint az 5–10 km-en hatékony

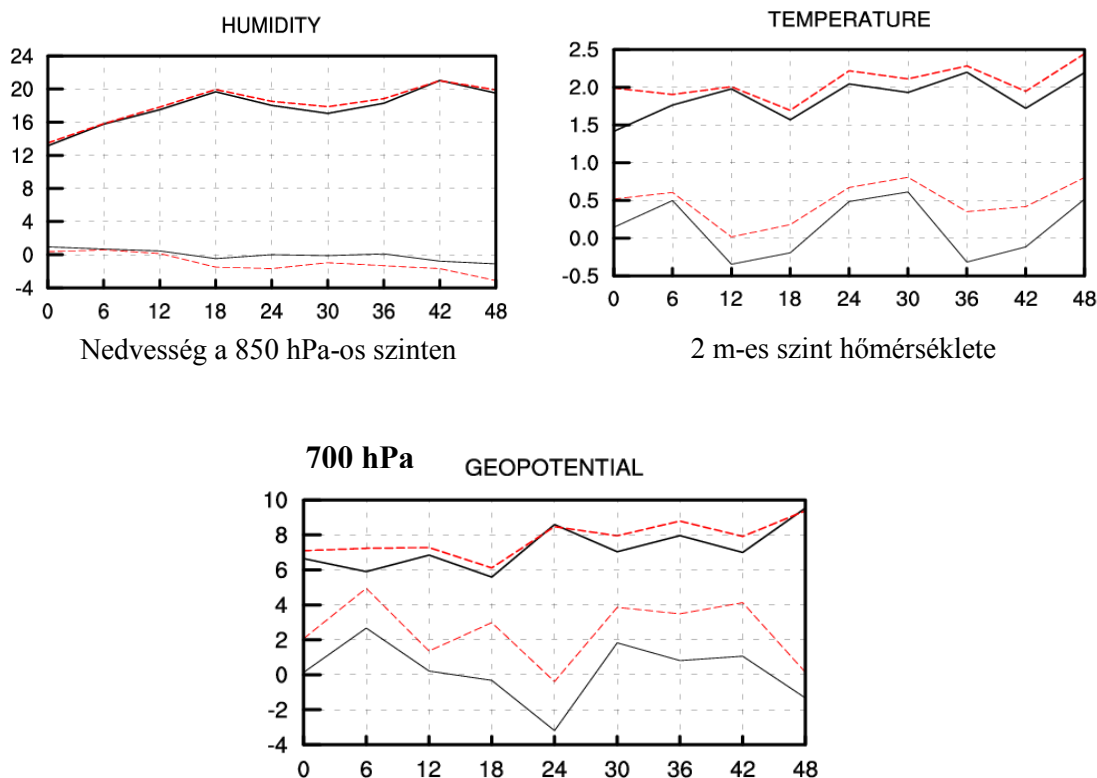
újabb ALADIN változat (ALARO) installálása (ezzel párhuzamosan az EPS rendszert is bővítjük az újabb modell változat alkalmazásával).

- 2009 második fele: az AROME modell (2–3 km-es felbontás) teljes operatív alkalmazása, majd további folyamatos fejlesztése (ezzel az ALADIN operatív futtatás kiegészül egy, az ALADIN modellbe „ágyazott” AROME 24 órás futtatással).
- 2009 második fele: az ALADIN-Climate és REMO modellek jövőre vonatkozó futtatásainak befejezése (a XXI. század közepére és végére vonatkozó információk előállítása érdekében).
- 2010 első fele: az Ensemble Transform Kalman Filter (ETKF) eljárás operatív bevezetése az ALADIN adatasszimilációs és EPS rendszerek összekapcsolására.
- 2010 első fele: egységes módszertan alapján regionális klímamodellek outputjainak alkalmazása klímaváltozási hatástanulmányok készítésére.
- 2010 második fele: az ALADIN modellhez kapcsolódó adatasszimilációs rendszer időbeli kiterjesztése a 3d-fgat vagy 4d-var eljárások operatív alkalmazásával.
- 2010 második fele: a regionális klímamodelleinkben rejlő bizonytalanságok számszerűsítése, valószínűségi klíma-projekciók előállítása a Kárpát-medence térségére.
- 2011 első fele: az ALADIN modell szinguláris vektorai alapján számolt kezdeti perturbációk operatív alkalmazása az ALADIN/EPS rendszerhez.
- 2011 második fele: fejlett adatasszimilációs rendszerrel és intenzív megfigyelésekkel (például radar adatok felhasználása) rendelkező AROME modell üzembe állítása.
- 2011 második fele: regionális klímamodelleken alapuló valószínűségi információk alkalmazása éghajlati hatásvizsgálatok számára.



6. ábra. Magyarországra vonatkozó havi átlagos csapadékváltozási projekciók 2021–2050-re különböző regionális klímamodellek együttes kiértékelése alapján (referencia időszak: 1961–1990).

Az elkövetkező évek fontos feladata a vázolt időjárási és éghajlati előrejelző-rendszer kifejlesztésére. E rendszer teljes operatív üzembe állítása az elmúlt kb. 20 éves hazai numerikus prognosztikai tevékenység méltó megkoronázása lehetne.



7. ábra. Az ECMWF: IFS határfeltételek hatása az ALADIN előrejelzésekre (négyzetes és szisztematikus hibák az előrejelzési idő függvényében) folytonos vonal ECMWF határfeltételekkel megvalósított futtatás, szaggatott vonal: referencia – a korábban alkalmazott francia ARPEGE globális modell peremfeltételeivel.

Összefoglalás, kitekintés

A fentiekben igyekeztünk bemutatni a numerikus prognosztika alapjait, illetve annak az egységes előrejelző rendszernek a koncepcióját (a közeljövően várható fejlesztési irányokkal együtt), amelynek az alapjait az elmúlt években dolgoztuk ki az Országos Meteorológiai Szolgálatnál. Mindezek alapján összességében az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

- Az időjárás és az éghajlat előrejelzésében elengedhetetlen a számszerű előrejelző modellek eredményeinek alkalmazása.
- A hagyományos kategorikus (determinisztikus) előrejelzéseket mindenképpen ki kell egészíteni valószínűségi információkkal. Az együttes előrejelzéseken alapuló valószínűségi információk a felhasználók számára többlet értéket jelentenek, melyek révén komoly hozzáadott értékre tehetnek szert (amelyek érdemi gazdasági haszonnal is járnak) a hagyományos előrejelzésekhez képest.
- A modellek folyamatos és intenzív fejlesztése elengedhetetlen (az ehhez szükséges munkaerőt nemzetközi projekteken való részvétellel lehet biztosítani).

- A numerikus modellek fejlesztése komoly szakértelmet igényel a részletek kidolgozása, illetve az egységes és konzisztens rendszer kiépítése érdekében.
- A szabadon elérhető „fekete-doboz” típusú modellek felhasználóbarátok, mindazonáltal szakértelem nélküli alkalmazásuk csak korlátozott sikerekkel kecsegtet (ugyanis a modellek szakértelem nélküli futtatása során olyan beállítási hibák, inkonzisztenciák léphetnek fel, melyek nehezen elhárítható előrejelzési hibákhoz vezethetnek).
- Az egységes időjárási (éghajlati) előrejelző rendszer számos eleme már rendelkezésre áll az Országos Meteorológiai Szolgálatnál, illetve a többi részlet az elkövetkező néhány évben kerül kifejlesztésre.
- A numerikus modellek fejlesztéséhez, alkalmazásához és egységes rendszerré történő integrálásához komoly infrastrukturális háttér (humán erőforrások, nagy teljesítményű számítógépek, megfigyelések, távközlés, stb.) megteremtése és fenntartása szükséges.
- Jelenleg Európában 22 ország, elsősorban az ALADIN és a HIRLAM numerikus modellezési együttműködések tagországai, a jelen cikkben leírtakhoz hasonló alapokon képzelik el az időjárás előrejelzését megalapozó numerikus prognosztikai tevékenységeket.
- A regionális klímamodellezés terén az elmúlt néhány évben bekerültünk a nemzetközi (elsősorban európai) szakmai „vérkeringésbe”, amit jól mutatnak az elnyert Európai Unió projektek (például CECILIA, CLAVIER vagy a legújabb az ECCONET), illetve a 2009 nyarán megrendezésre kerülő klímadinamikai témájú Nyári Iskola. *(A Nyári Iskola azóta sikeresen megvalósult. A szerkesztő megjegyzése.)*

Mindezek alapján úgy ítéljük meg, hogy a bemutatott egységes és konzisztens hazai előrejelző-rendszer nemzetközi szinten is megállja a helyét és jó alapot biztosít az időjárási és éghajlati előrejelzési igények kielégítésére.

Köszönetnyilvánítás

Mindenek előtt szeretnék köszönetet mondani mindenkinek, aki részt vett és részt fog venni a cikkben vázolt egységes időjárási és éghajlati előrejelző-rendszer kifejlesztésében. Ezen belül is elsősorban a mindenkori numerikus modellezéssel foglalkozó szakembereket illeti köszönet és elismerés (a Numerikus Módszertani Kutatócsoport, az Időjárás-előrejelzési Fejlesztő Osztály, a Numerikus Előrejelző Osztály, valamint a Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztály dolgozói): *Adamcsek Edit, Borbás Éva, Bölöni Gergely, Bujdosó Ildikó, Csima Gabriella, Csíkós József, Csirmaz Kálmán, Csomós Petra, Dévényi Dezső, Diószeghy Márta, Hágel Edit, Hirsch Tamás, Horváth Ákos, Ihász István, Kerényi Judit, Kertész Sándor, Kiss Gergő, Kozári Tamás, Kullmann László, Lénárt László, Lőrincz Andrea, Mika Ágnes, Molnár Csilla, Povázsay Judit, Putsay Mária, Radnóti Gábor, Randriamampianina Roger, Rajnai Márk, Sipos Győző, Szabó László, Szabó Péter, Szabó Tamás, Szépszó Gabriella, Szoták Regina, Tóth Helga, Vörös Miklós, Zsótér Ervin.* Köszönjük a 3A/051/2004 (cím: Kockázatbecslés és gazdasági tervezés valószínűségi időjárás előrejelzések felhasználásával) NKFP, a 3A/082/2004 (cím: Magyarország éghajlatának dinamikai vizsgálata, és a numerikus modelleken alapuló regionális klímaelőrejelzések módszertanának megalapozása) NKFP és a 2/007/2005 (cím: Új generációs grid technológiák kifejlesztése és meteorológiai alkalmazása a környezetvédelemben és az épületenergetikában) JÁP projektek támogatását. A szerző köszöni a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai Ösztöndíjas támogatását.

Ensemble előrejelzések: elméleti és gyakorlati háttér

Hágel Edit

Országos Meteorológiai Szolgálat, Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztály
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1., e-mail: hagel.e@met.hu

Összefoglaló – A valószínűségi, más néven együttes (idegen szóval ensemble) előrejelzések témaköre napjainkban a numerikus időjárás előrejelzés egyik legdinamikusabban fejlődő területe. Háttérben az a felismerés áll, hogy az időjárás előrejelzése során megoldandó egyenletrendszer nagyfokú érzékenységet mutat a kezdeti feltételekre, illetve az azokban megmutatkozó hibákra, pontatlanságokra. A kezdeti feltételek azonban minden esetben hibával terhelték, hiszen maguk a megfigyelések sosem tökéletesen pontosak, s számuk a légkör szabadsági fokához viszonyítva csekély. Mindezek a tényezők bizonyos időjárási helyzetekben jelentős előrejelzési hibához vezethetnek. Az ensemble módszer lényege (az eredeti elgondolás szerint) az, hogy nem egyetlen előrejelzés készül, a legjobbnak ítélt kezdeti feltétel felhasználásával, hanem több másik is, melyek kezdeti feltételeit a kontroll tag kezdeti feltételének hibahatáron belüli módosításával nyerik. Ezáltal lehetőség nyílik arra, hogy minden előrejelzett időjárási esemény mellé valószínűségi értékeket társítsunk, valamint következtetni lehet az előrejelzés bizonytalanságára is. Napjainkban emellett már számos más módszer is létezik ensemble előrejelzések készítésére, pl. multi-modell, multi-fizika, stb.

A cikkben bemutatjuk az ensemble előrejelzések elméleti, és gyakorlati háttérét, különös tekintettel az OMSZ-ban folyó kutatásokra.

Elméleti háttér

Az időjárás előrejelzése során megoldandó egyenletrendszer egy nemlineáris parciális differenciál egyenletrendszer, mely nagyfokú érzékenységet mutat a kezdeti feltételekre, illetve az azokban megmutatkozó kis hibákra, pontatlanságokra. Ez az érzékenység bizonyos időjárási helyzetekben jelentős előrejelzési hibához vezethet. A problémát az jelenti, hogy a kezdeti feltételek minden esetben hibával terhelték, hiszen maguk a megfigyelések sosem tökéletesen pontosak, s számuk a légkör szabadsági fokához viszonyítva csekély. Megoldást jelenthet erre a problémára az együttes (ensemble) előrejelzések módszere. A módszer lényege, hogy nem egyetlen előrejelzést készítünk, hanem előrejelzések együttesét, ezáltal lehetségessé válik a valószínűségi megközelítés, és következtetni lehet az előrejelzés bizonytalanságára is.

Az együttes előrejelzések módszere kezdetben a globális térskálára és középtávra korlátozódott. Manapság azonban egyre nagyobb az igény a rövidtávú, korlátos tartományú valószínűségi előrejelzésekre is, így a világ számos előrejelző központjában megindult a kutatás a rövidtávú valószínűségi rendszerek kidolgozására. Az OMSZ-ban e témában folyó kutatások és fejlesztések célja egy operatív módon alkalmazható, rövidtávú, ensemble előrejelző rendszer kidolgozása, az operatív futtatás előkészítése, bevezetése, valamint a rendszer folyamatos fejlesztése.

Ensemble előrejelzések készítésére alkalmazható módszerek

Együttes előrejelzések készítésére manapság számos módszert alkalmaznak. Ezek már nem csupán a kezdeti feltételekre mutatott érzékenységet veszik figyelembe, hanem számításba veszik a modellek hibáit, vagy éppen a parametrizációs sémákban megmu-

tatkozó bizonytalanságot is. A következőkben lehetséges ensemble módszerekre mutatunk néhány példát:

- **Multi-analízis ensemble:** Különböző technikákkal és/vagy modellekkel készített analíziseket használnak fel kezdeti feltételként. Gyakran ötvözik a multi-modell rendszerrel is. Ilyen rendszerre példa a Spanyol Meteorológiai Szolgálat (AEMet) SREPS rendszere.
- **Kezdeti perturbációk származtatása:** A globális ensemble előrejelzések több mint 15 évvel ezelőtti operatív beindításakor mind az ECMWF²-ben, mind az Amerikai Egyesült Államokban ezt a módszert alkalmazták. Az ECMWF-ben a szinguláris vektorok mellett döntöttek, míg az USA időjárás előrejelzési központjában (NCEP) a breeding módszert kezdték alkalmazni. A *szinguláris vektorok módszere* igen komoly matematikai háttérrel rendelkezik. Lényegében egy sajátérték feladat megoldását jelenti. A cél egy adott norma szerint leggyorsabban növekvő perturbációk meghatározása. A módszer alkalmazása igen komoly számítógép kapacitást igényel (Buizza et al., 1993). A *breeding módszer* esetében kezdetben véletlenszerű perturbációkat alkalmaznak. Az így módosított analízisekből kiindulva adott hosszúságú (általában 6 órás) előrejelzéseket készítenek, majd a ciklus végén a perturbációkat visszaskálázzák, az aktuális analízist módosítják, s indul újra a folyamat. Eredményképpen 4–5 nap múlva kiválasztódnak a fázistér leginkább instabilis irányai. A rendszer tehát véletlenszerű perturbációkból kiindulva “kitenyészti” (erre utal a breeding szó) a legoptimálisabb perturbációkat (Toth és Kalnay, 1997).
- **Megfigyelések perturbálása:** ennél a módszernél nem a kezdeti feltételeket perturbálják, hanem az adatasszimiláció során felhasználásra kerülő megfigyeléseket. Ezt a módszert alkalmazzák a Kanadai Meteorológiai Szolgálat ensemble rendszerében.

Az eddig ismertetett módszerek esetében a tagok közötti eltérés a kezdeti feltételek különbözőségéből adódott. Léteznek azonban olyan módszerek is, amelyek a modellhibát, vagy a parametrizációs sémákban rejlő bizonytalanságot veszik számításba:

- **Multi-modell ensemble:** A rendszer tagjait különböző modellekkel készített előrejelzések jelentik. Egyik lehetséges formája, amikor nem egyetlen előrejelző központban készült előrejelzéseket raknak össze, hanem különböző központok “hagyományos” (determinisztikus) előrejelzéseit. Ebben az esetben hívják “Poor man’s ensemble prediction system”-nek, azaz “szegény ember ensemble előrejelző rendszerének” is, hiszen lényeges plusz költség nélkül juthatunk valószínűségi előrejelzéshez. Erre példa a Német Meteorológiai Szolgálat (DWD) által koordinált SRNWP-PEPS projekt, melyet később ismertetünk részletesen. Elképzelhető azonban az is, hogy egy előrejelző központon belül több modellt futtatunk, s ezek alkotják ensemble rendszerünk tagjait. Erre példa a Spanyol Meteorológiai Szolgálat (AEMet) korábban már említett SREPS rendszere.
- **Multi-paraméter, multi-parametrizáció:** Ennél a módszernél egy adott parametrizációs csomag paramétereit, vagy magát a parametrizációs csomagot változtatják az egyes tagok esetén.

² ECMWF: European Centre for Medium-range Weather Forecasts, Európai Középtávú Előrejelző Központ

Ensemble előrejelzések megjelenítése

A valószínűségi előrejelzések megjelenítése is eltér a „hagyományos”, determinisztikus előrejelzések megjelenítésétől. Ebben az esetben ugyanis nem egyetlen előrejelzés adatait kell megjelenítenünk, hanem előrejelzések együttesét. Mindeközben törekednünk kell arra is, hogy a rendszer által hordozott információ világos és áttekinthető formában kerüljön az előrejelző szakemberek elé. A valószínűségi előrejelzések esetén leggyakrabban alkalmazott megjelenítési módok a következők:

- **Ensemble tagok megjelenítése külön-külön:** Mint a „hagyományos” determinisztikus előrejelzések esetében is, valószínűségi előrejelző rendszerünk tagjait is megjeleníthetjük egyesével, minden tagot külön. Ez kis elemszámú rendszer esetén még áttekinthető mennyiség, de nagy elemszámú rendszerrel (mint például az ECMWF 51 tagú rendszere) már komoly gondot okozhat a tagok egyesével történő áttekintése.
- **Ensemble átlag/medián:** Az információ tömörítésére szolgál, ha az egyes ensemble tagok helyett azok átlagát ábrázoljuk (3. ábra). Azt azonban sosem szabad elfelejtenünk, hogy az átlag nem egy valós előrejelzett mező; a tagok között meglévő hasonlóságokat kihangsúlyozza, a különbségeket azonban elsimítja, így egyes esetekben igen félrevezető lehet. Reálisabb képet fest az ensemble tagok mediánja, amely már egy valós előrejelzés. Ábrázolhatjuk továbbá az ensemble átlagot és a szórást egyazon térképen.
- **Bélyeg diagram:** Egy másik lehetőség az összes ensemble tag ábrázolására az ún. bélyeg diagram. Ebben az esetben az összes tagot egymás mellé rendezve és szükségszerűen erősen lekicsinyítve ábrázoljuk. A részletek így természetesen nem tanulmányozhatók, azonban könnyen felismerhetőek az egyes tagok közötti, lényeges eltérések.
- **Valószínűségi térképek:** A valószínűségi előrejelző rendszerek nagy előnye, hogy az egyes időjárási események mellé valószínűségi értékeket is társíthatunk. Megadhatjuk például a 0 °C alatti hőmérséklet valószínűségét, de lehet az esemény a 10 mm-t meghaladó napi csapadékösszeg, vagy bármilyen más meteorológiai változó. A valószínűségi térképek segítségével következtetni tudunk az előrejelzés bizonytalanságára is (3. ábra).
- **Fáklya diagram, meteogram:** Ez a két diagram egy adott földrajzi helyre vonatkozóan mutatja be néhány, kiválasztott paraméter időbeli alakulását az összes ensemble tagra vonatkozóan. A fáklya diagram esetén minden tagot külön-külön feltüntetünk (4. ábra), míg a meteogram ún. box-plot diagramok formájában ábrázolja az előrejelzések együttesét. A dobozok (boxok) nagyságából következtetni tudunk a tagok szórására, illetve fel szokás tüntetni a medián, az alsó és a felső kvartilis értékeket, valamint a minimumot és a maximumot is.
- **Spagetti diagram:** E diagram a fáklya diagrammal ellentétben nem időben, hanem térben adja meg a bizonytalanság mértékét (3. ábra). Egy adott paraméter kiválasztott izovonalát/izovonalait ábrázoljuk minden ensemble tagra vonatkozóan. Így arról nyerhetünk információt, hogy mely földrajzi térségben nagy az egyes tagok eltérése.
- **Clusterek:** A clusterek az információ tömörítésére szolgálnak. Segítségükkel a valószínűségi rendszer tagjait csoportokba sorolhatjuk, s így elénk tárulnak a lehetséges, egymástól lényegesen eltérő jövőbeli állapotok.

Az SRNWP-PEPS³ rendszer

Az SRNWP-PEPS rendszer egy európai rövidtávú ensemble előrejelző rendszer, amely a multi-modell módszerre épül. A projektben négy konzorcium (ALADIN, COSMO, HIRLAM, UK Met Office) tagjai vesznek részt, összesen 21 ország (köztük Magyarország), 24 különböző modellel, modellverzióval (*1. táblázat*). A résztvevő országok naponta négyszer (a 00, 06, 12 és 18 UTC-s futáshoz kapcsolódóan) elküldik operatív (determinisztikus) előrejelzésüket a projektet koordináló Deutscher Wetterdienst-be, (DWD) ahol a beérkező előrejelzéseket egy közös, 7 km-es felbontásra interpolálják, és elkészítik a különböző valószínűségi produktumokat (pl. *1.a ábra*), melyek azután a nemzeti meteorológiai szolgálatokhoz visszajutva segíthetik az előrejelzők munkáját.

Az SRNWP-PEPS rendszer előnyei között kell megemlíteni, hogy nem igényli több ensemble tag futtatását a résztvevő előrejelző központoktól. Hátrányai közé tartozik azonban, hogy az ensemble elemszáma térben és időben változik. A térbeli változékonyságot (*1.b ábra*) az okozza, hogy a különböző előrejelző központok különböző tartományon készítik előrejelzéseiket. Az időbeli változékonyság oka pedig az, hogy nem minden előrejelző központ futtat előrejelzést naponta négyszer, illetve esetenként egy-egy központ előrejelzése kimarad. A térbeli változékonyság a valószínűségi térképek vizsgálatakor lehet fontos, hiszen pl. 70% valószínűség nem ugyanazt jelenti Svájc és Spanyolország esetében (a tagok száma Európa középső területei felett a legmagasabb).

Konzorcium	Résztvevő országok
ALADIN	Ausztria, Belgium, Franciaország, Portugália, Horvátország, Csehország, Magyarország , Szlovákia, Szlovénia
COSMO	Németország, Olaszország, Svájc, Lengyelország
HIRLAM	Dánia, Finnország, Írország, Hollandia, Norvégia, Spanyolország, Svédország
UK Met Office	Egyesült Királyság

1. táblázat. Az SRNWP-PEPS projektben résztvevő konzorciumok és országok.

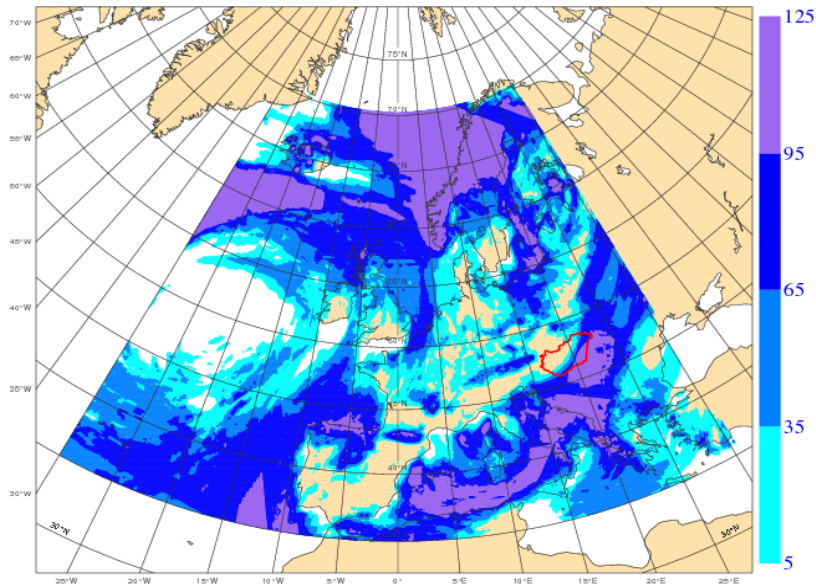
Az OMSZ kvázi-operatív LAMEPS⁴ rendszere

Az Országos Meteorológiai Szolgálat kvázi-operatív rövidtávú valószínűségi előrejelző rendszere az ALADIN modellre épül. Az ALADIN modell (*Horányi et al., 2006*) egy korlátos tartományú, spektrális numerikus időjárás előrejelző modell, melyet egy nemzetközi együttműködés keretében fejlesztenek (a fejlesztésben az OMSZ munka-társai is aktívan részt vesznek).

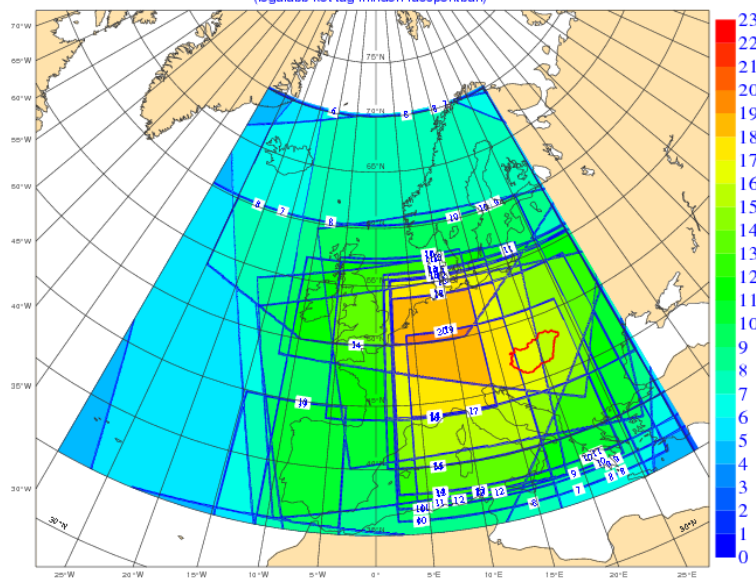
³ PEPS: **P**oor man's **E**nsemble **P**rediction **S**ystem, „Szegény ember” valószínűségi előrejelzési rendszer

⁴ LAMEPS: **L**imited **A**rea **M**odel **E**nsemble **P**rediction **S**ystem, Beágyazott modell valószínűségi előrejelzési rendszer.

SRNWP-PEPS előrejelzés, futtatás kiinduló időpontja: 2008 11 25, 00utc
 VALÓSZÍNŰSÉGI MEZO, 24 óras csapadékosszeg nagyobb mint 1mm (%)
 Idoszak: 2008 11 25, 06utc - 2008 11 26, 06utc



SRNWP-PEPS előrejelzés, futtatás kiinduló időpontja: 2008 11 25, 00utc
 ensemble mérete, hany modell fedt le a területet
 (legalabb ket tag minden racspontban)

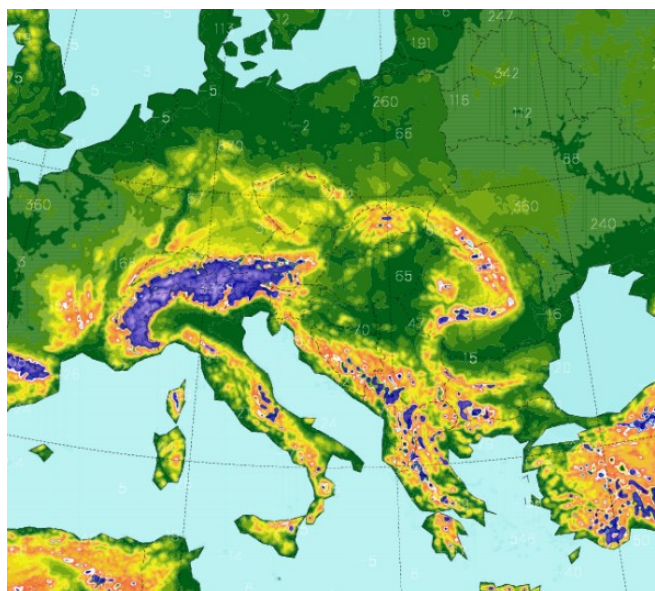


1. ábra. Valószínűségi mező (fent), a 24 órás csapadékösszeg nagyobb, mint 1 mm. A futtatás dátuma 2008. november 25. 00 UTC. Érvényesség időpontja: 2008. november 25. 06 UTC – 2008. november 26. 06. UTC. Az ensemble mérete (lent). Az egyes rácspontokat lefedő modellek száma (lásd az ábrán). A futtatás dátuma 2008. november 25. 00 UTC.

A rendszer ismertetése

Korlátos tartományú modellek esetén a kezdeti feltételek mellett szükségünk van oldalsó peremfeltételekre is, melyet leggyakrabban egy globális modell szolgáltat. Korlátos tartományú valószínűségi előrejelző rendszereknél egy további fontos kérdés is felmerül: mivel bizonyos idő eltelte után sokkal inkább a peremfeltételek, mint a kezdeti feltételek határozzák meg az előrejelzést, ügyelnünk kell arra, hogy minden ensemble taghoz különböző oldalsó peremfeltételt használjunk, azaz a peremfeltételeket szolgáltató rendszernek is valószínűségi előrejelző rendszernek kell lennie. Ezen megfontolások alapján az Országos Meteorológiai Szolgálat kvázi-operatív ALADIN ensemble rendszerének kezdeti-, és peremfeltételeit az ARPEGE globális modellen alapuló PEARP rendszer tagjai szolgáltatják.

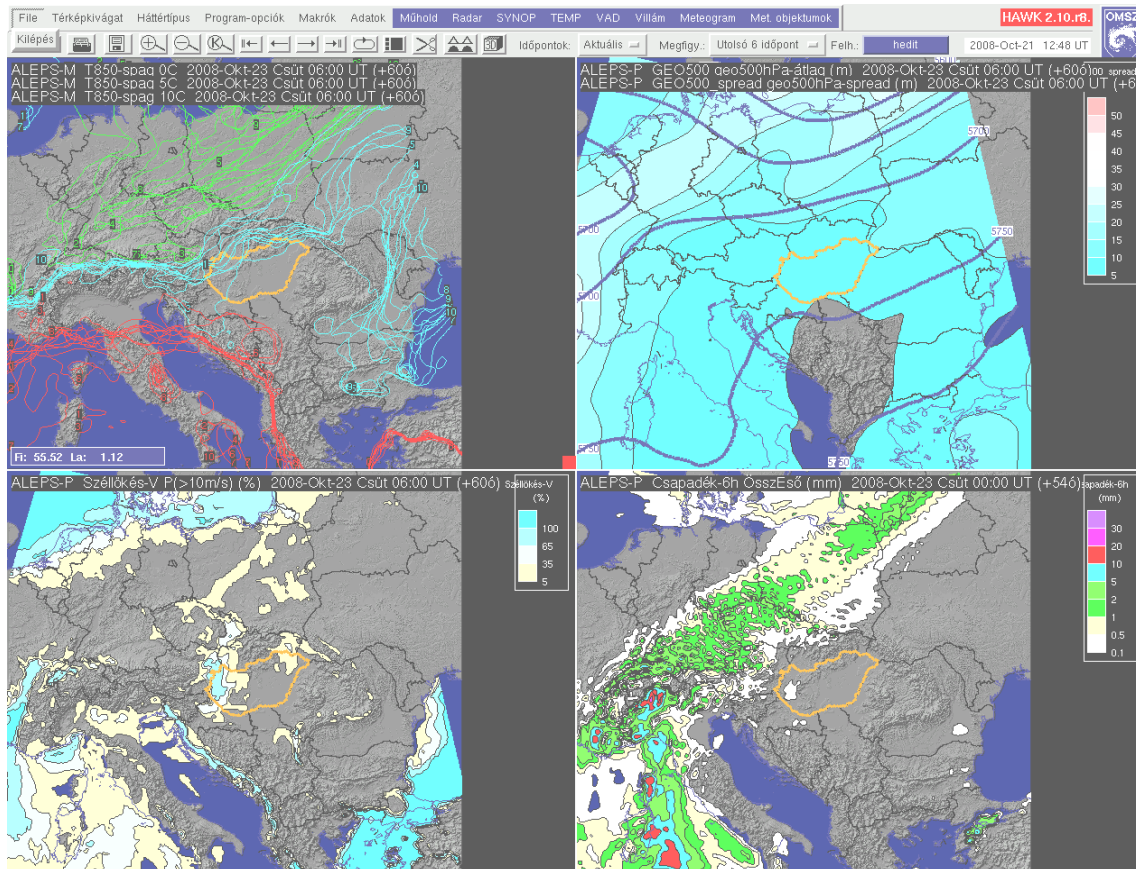
A PEARP rendszer a Francia Meteorológiai Szolgálat (Météo-France) operatív, rövidtávú globális valószínűségi előrejelző rendszere, mely 11 tagból áll (10 tag perturbált kezdeti feltételekből indítva, valamint az ún. kontroll tag). A rendszer az ARPEGE nevet viselő, globális időjárás előrejelző modellen alapul. Naponta egyszer, a 18 UTC-s analízisből kiindulva 60 órás előrejelzéseket készítenek. A kezdeti feltételek perturbációja a célzott szinguláris vektorok módszerével történik. A szinguláris vektorokat négy céltartományra számolják (Európa és az Atlanti-óceán északi medencéje, északi félgömb, déli félgömb, trópusi területek), majd az így kapott szinguláris vektorok lineáris kombinációjával állítják elő a kezdeti perturbációkat. A PEARP rendszer felbontása Európa felett kb. 25 km, vertikálisan pedig 55 szintet alkalmaznak.



2. ábra. Az ALADIN ensemble rendszer előrejelzési tartománya.

Mivel a kezdeti-, és peremfeltételeket szolgáltató PEARP rendszer 11 tagból áll, így az OMSZ kvázi-operatív ALADIN ensemble rendszere is 11 tagú. Jelenleg a PEARP rendszer leskálázása történik, nem állítunk elő lokális perturbációkat, a jövőben azonban tervezzük a kezdeti perturbációk ALADIN szinguláris vektorokkal történő elő-

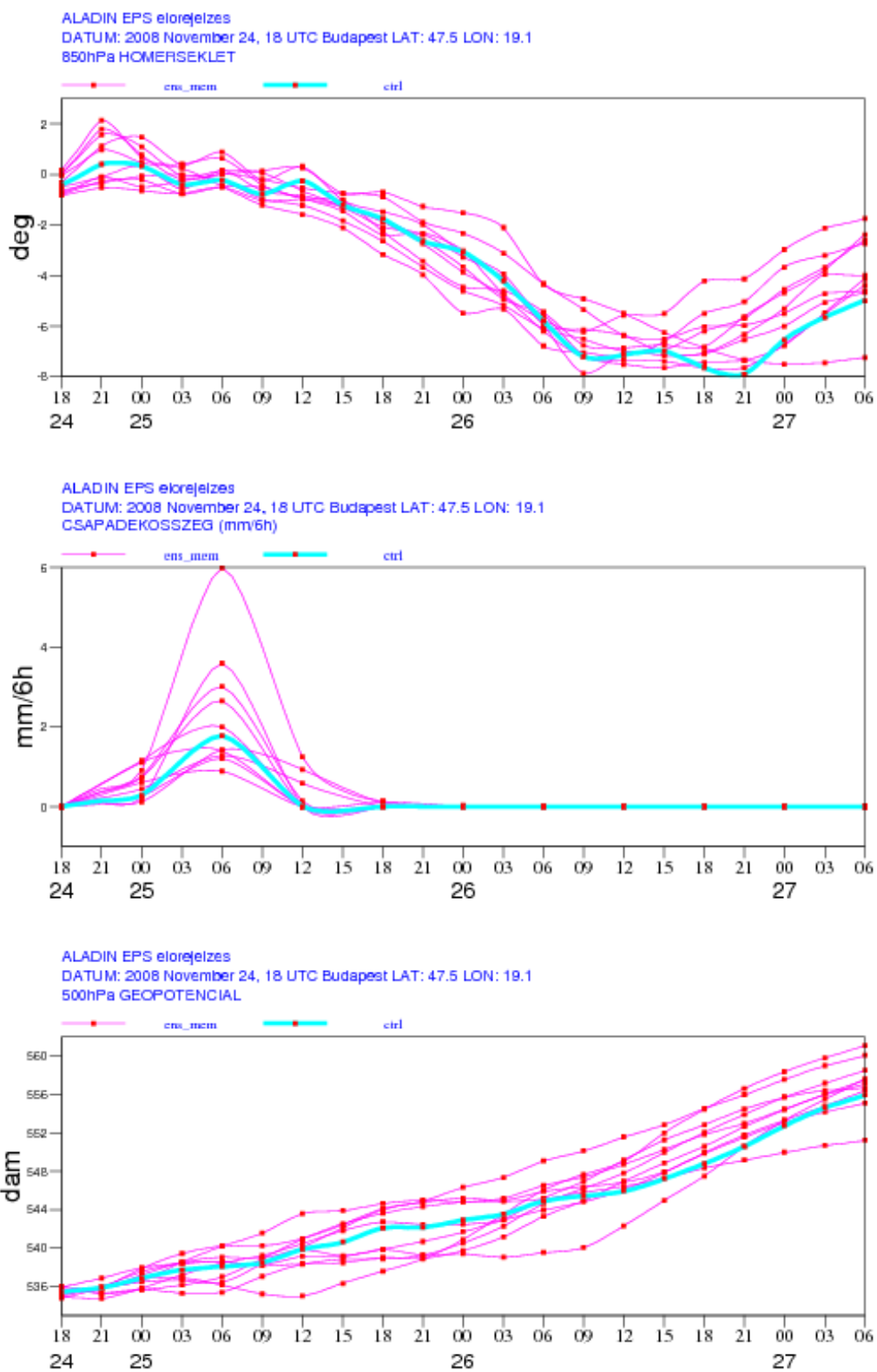
állítását. Csakúgy, mint a PEARP rendszer az ALADIN EPS is naponta egyszer fut a 18 UTC-s adatokból kiindulva, és 60 órára készítünk előrejelzéseket. Az alkalmazott horizontális felbontás 12 km, míg vertikálisan 46 modellszinttel számolunk egy Európa nagy részét lefedő tartományon (2. ábra). Az előrejelzések megjelenítése az OMSZ-ban kifejlesztett HAWK rendszerrel történik (3. ábra), valamint előállítunk fáklya diagramokat is 10 magyarországi városra (4. ábra).



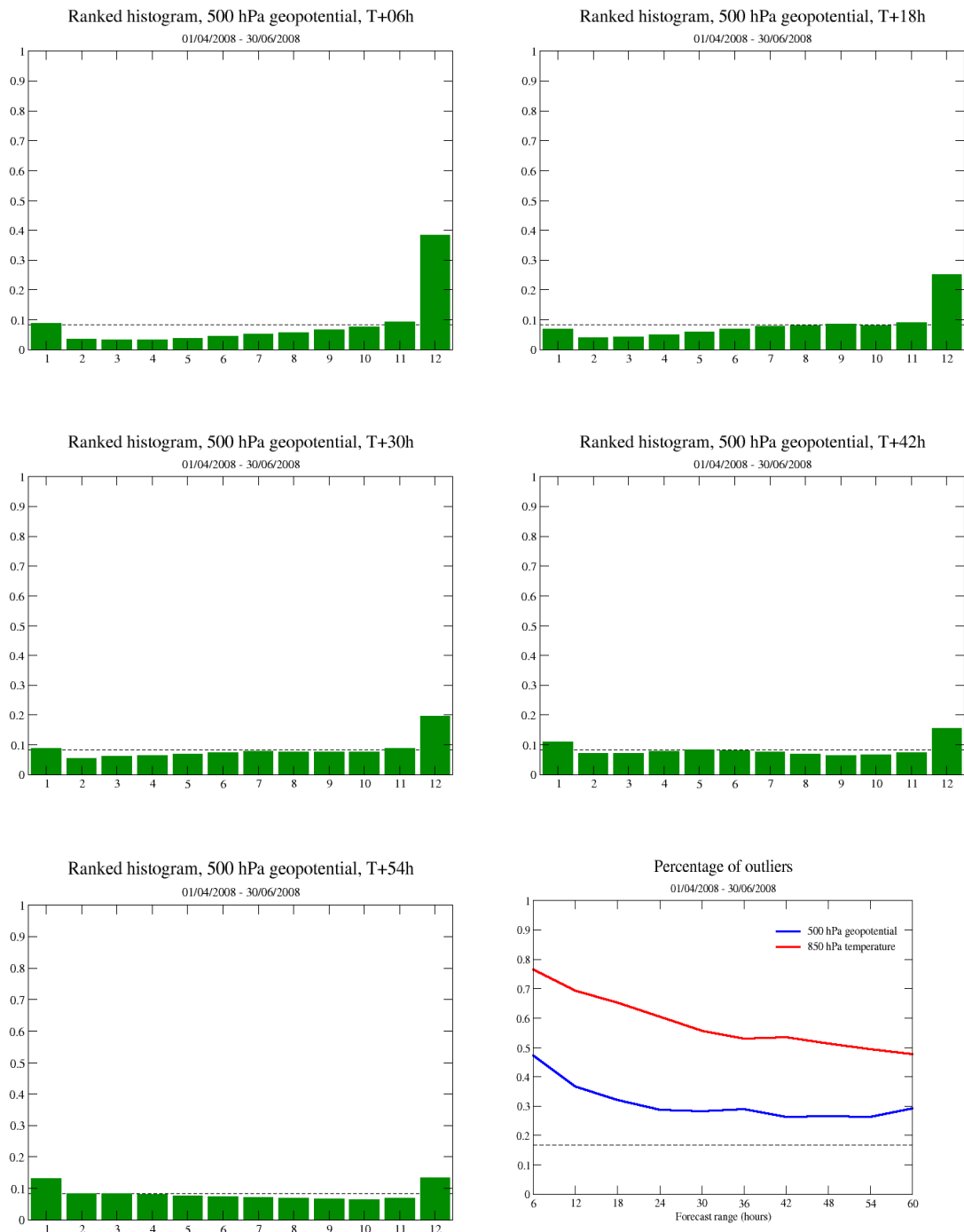
3. ábra. Az ALADIN ensemble előrejelzések megjelenítése a HAWK rendszerben. Bal felső ábra: spagetti diagram, 850 hPa-os szint hőmérsékletének három izovonala mind a 11 tagra vonatkozóan. Jobb felső ábra: ensemble átlag és szórás, 500 hPa-os geopotenciál. Bal alsó ábra: valószínűségi mező, szélökés nagyobb, mint 10 m/s. Jobb alsó ábra: 6 órás csapadékösszeg, ensemble átlag. Futtatás dátuma 2008. október 20. 18 UTC. Érvényesség időpontja: 2008. október 23. 06 UTC, illetve a csapadék esetében 2008. október 23. 00 UTC.

Verifikációs eredmények

Az OMSZ kvázi-operatív rendszerének verifikációja jelenleg is folyamatban van, így ezen beszámolóban csak előzetes eredményeket áll módunkban ismertetni. Tekintsük a ranked hisztogramokat a 2008. április 1. – június 30. közötti időszakra (5. ábra). A ranked hisztogramok (Toth et al., 2003) segítségével azt ellenőrizhetjük, hogy a megfigyelt értékek milyen valószínűséggel esnek az egyes tagok által meghatározott intervallumokba (ide értve azokat az eseteket is, amikor a megfigyelt érték kisebb,



4. ábra. Fáklya diagram az ALADIN EPS előrejelzéséből, a futtatás dátuma 2008. november 24. 18 UTC.



5. ábra. Első öt ábra: ranked hisztogramok az 500 hPa-os geopotenciálra vonatkozóan. (Bal felső ábra: $T + 06$ h, jobb felső ábra: $T + 18$ h, középső sor, bal oldal: $T + 30$ h, középső sor, jobb oldal: $T + 42$ h, bal alsó ábra: $T + 54$ h.) Hatodik, jobb alsó ábra: percentage of outliers diagram az 500 hPa-os geopotenciálra (kék görbe) és a 850 hPa-os hőmérsékletre (piros görbe) vonatkozóan. Verifikációs időszak: 2008. április 1. –2008. június 30. A vízszintes vékony vonal minden ábrán a tökéletes előrejelzés esetén elvárt értéket jelöli.

illetve nagyobb mint a tagok minimuma/maximuma). A *Percentage of outliers* diagram (Toth et al., 2003) segítségével pedig megadhatjuk, hogy az esetek hány százalékában esik a megfigyelés a legkisebb és a legnagyobb értéket felvevő tagok által meghatározott értéktartományon kívülre (valójában tehát a *ranked hisztogram* két szélső oszlopának vizsgálatáról van szó). Az 5. ábra mutatja a ranked hisztogramokat az 500 hPa-os geopotenciál esetére több előrejelzési időlépcsőre (T + 06 h, T + 18 h, T + 30 h, T + 42 h, és T + 54 h). Megfigyelhető, hogy kezdetben a két szélső oszlop lényegesen magasabb a többinél, ami arra utal, hogy a megfigyelés gyakran esik az ensemble tagok által meghatározott értéktartományon kívülre. Ez a jelenség az előrejelzési időtáv előre haladtával csökken, az oszlopok magassága egyre kiegyensúlyozottabb, a hisztogram pedig egyre laposabb, tehát az időszak végére a rendszer szórása az 500 hPa-os geopotenciálra vonatkozóan kielégítő. Az utolsó ábra az ún. percentage of outliers diagram az 500 hPa-os geopotenciálra és a 850 hPa-os hőmérsékletre vonatkozóan. Megfigyelhető, hogy a geopotenciálra vonatkozó görbe végig sokkal közelebb van az ideális értékhez, mint a hőmérsékletre vonatkozó görbe.

A 850 hPa-os hőmérséklet esetében tehát a megfigyelés nagyon gyakran esik az ensemble tagok által meghatározott tartományon kívülre a teljes előrejelzési időtávon (00 – 60 h). Ennek egyik lehetséges oka az, hogy a szinguláris vektorok energiája (a PEARP rendszerben a perturbációkat szinguláris vektorok segítségével állítják elő) kezdetben a 700 hPa-os szint környékén maximális, majd az idő előrehaladtával az energia inkább felfelé, mint lefelé terjed. Mivel a felszíni mezők közül csak a felszíni légnyomást perturbálják, így az alsóbb rétegekben kisebb a perturbáció, s így kisebb az ensemble rendszer szórása is. Egy lehetséges megoldás erre a problémára a felszíni perturbációk lokális előállítás.

Összefoglalás

A cikkben röviden ismertettük az ensemble előrejelzések elméleti hátterét, valamint bemutattunk néhány lehetséges módszert együttes előrejelzések készítésére. Szóltunk az Országos Meteorológiai Szolgálatnál is elérhető SRNWP-PEPS multi-modell ensemble rendszerről és ismertettük az OMSZ kvázi-operatív LAM EPS rendszerét is.

Az ALADIN EPS rendszert illetően a közeljövő tervei között szerepel a verifikációs mérőszámok előállítása több paraméterre, és hosszabb időszakra vonatkozóan. Hosszútávú terveink pedig a kezdeti perturbációk lokális előállítására, illetve a felszíni perturbáció kérdésére irányulnak.

Irodalomjegyzék

- Buizza, R., Tribbia, J., Molteni, F. and Palmer, T., 1993: Computation of optimal unstable structures for a numerical weather prediction model, *Tellus* **45A**, 388–407.
- Horányi, A., Kertész, S., Kullmann, L. and Radnóti, G., 2006: The ARPEGE/ALADIN mesoscale numerical modeling system and its application at the Hungarian Meteorological Service, *Időjárás* **110**, 203–227.
- Toth, Z. and Kalnay, E., 1997: Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method, *Mon. Wea. Rev.* **125**, 3297–3319.
- Toth, Z., Talagrand, O., Candille, G. and Zhu, Y. 2003: Probability and ensemble forecasts. – In: Jolliffe, I.T., Stephenson, D.B. (Eds.): *Forecast Verification: A practitioner's guide in Atmospheric Science*, Wiley&Sons, Ltd, 137–163.

A nemzetközi együttműködések szerepe a hazai időjárás előrejelzésben

Zsótér Ervin

Országos Meteorológiai Szolgálat
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1, e-mail: zsoter.e@met.hu

Összefoglaló – Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazott előrejelzési módszerek területén az 1990-es évek hozták el a jelentős változás lehetőségét. Ekkortól a hazai kutatók és szakemberek előtt is megnyíltak a már meglévő és a későbbiekben alakuló nemzetközi együttműködések kapui. Az évek során az OMSZ-ban folyó időjárás előrejelzés gyakorlata gyökeresen átalakult. Az EUMETSAT műhold-felvételeinek egyre szélesebb körű felhasználása az ultrarövidtávú előrejelzések készítésében jelentett nagy segítséget. Ugyanakkor a rövidtávú előrejelzéseknél az ALADIN konzorciumban való aktív részvétel, a közép- és hosszútávú előrejelzések tekintetében pedig az ECMWF-hez való fokozatos közeledés hozott forradalmi változást. Emellett az elmúlt évek során az EUMETNET – az európai meteorológiai szolgálatok szervezete – keretei között is számos, a hazai meteorológiát is érintő nemzetközi projekt járult és járul ma is hozzá az időjárás előrejelzések javításához.

Bevezetés

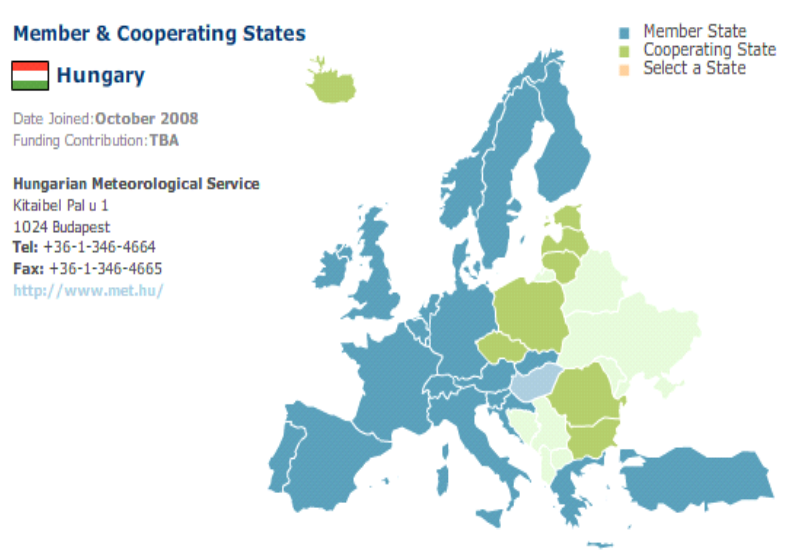
Az elkövetkezőkben röviden áttekintjük az időjárás előrejelzés területén általunk fontosnak ítélt, nagy jelentőséggel bíró európai együttműködések. Részletesebb információkért a hivatkozásokban szereplő honlapokat ajánljuk. A bemutatandó együttműködések az EUMETSAT, EUMETNET, ALADIN / RC LACE, valamint az ECMWF.

EUMETSAT

Az EUMETSAT – European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites – meteorológiai műholdak egész rendszerét üzemelteti, amelyek segítségével műhold adatokat, képeket, különböző produktumokat állít elő időjárási és éghajlati alkalmazások számára. Az EUMETSAT kormányok közötti szervezet, amely jelenleg 22 tagállam, 8 társult tag (1. ábra), valamint világszerte több más felhasználó számára szolgáltató műholdas információt.

A szervezet 1986-ban alakult, eredetileg 16 tagállammal. Magyarország számára a produktumok sokáig csak igen korlátozott mértékben álltak rendelkezésre. Az EUMETSAT-hoz való közeledési folyamat a 90-es évek közepétől kezdődött. Jelentős lépést a társult tagság kivívása jelentett 1999-ben, amikortól a produktumokhoz korlátlanul hozzáférhettünk. Ugyan technikai értelemben Szlovákia után néhány nappal lettünk társult tagok, mégis az ECMWF esetéhez hasonlóan (lásd később), az OMSZ úttörő szerepet játszott a társult tagság intézményrendszerének kialakításában. A csatlakozási folyamat végül 2008 októberében zárult le véglegesen, amikortól a valamikori „keleti” blokkból Szlovákia, Horvátország és Szlovénia után az EUMETSAT teljes jogú tagjává váltunk. Teljes jogú tagként a döntéshozásban már Magyarország is részt vesz delegáltjai útján, továbbá az adatokhoz való korlátlan hozzáférés mellett különböző pályázatok elnyerésére is lehetősége van a hazai gazdasági szereplőknek, kutatóknak (szakmai kutatások, szoftverfejlesztés, műszerépítés, stb.).

Az EUMETSAT döntéshozó testülete a Vezetői Tanács, amelynek működését különböző bizottságok segítik. A szervezet dolgozóit a tagállamokból toborozza, jelenleg kb. 200 fő áll alkalmazásban. A szervezetet alapvetően a tagországok hozzájárulásából finanszírozzák, amelyet a Gross National Income (GNI – bruttó nemzeti jövedelem) alapján arányosan határoznak meg (társult tagok a teljes tagok számára előírt hozzájárulás felét fizetik).



1. ábra. A EUMETSAT tagállamai (kék) valamint társult tagállamai (zöld).
Forrás: EUMETSAT.

A műholdas produktumok ma már nélkülözhetetlen részét képezik az időjárás-előrejelzés folyamatának. Egyrészt a gyakorlati előrejelzésben az ultrarövid-távú prognózisok készítéséhez nyújtanak segítséget, illetve az időjárási helyzetek, objektumok, jelenségek felismerésében használatosak. Továbbá ma már legalább ilyen jelentőségű, hogy a számszerű időjárás-előrejelző modellek adatasszimilációs rendszerei által felhasznált adatok legnagyobb része is úrbázisú: különböző műholdas távérzékelési rendszerből származik, köztük az EUMETSAT által működtetett műholdakkal.

EUMETNET

Az EUMETNET – The Network of European Meteorological Services – az európai meteorológiai szolgálatok hálózataként keretet biztosít a tagok közötti együttműködések szervezéséhez a meteorológia számos területén, mint például a megfigyelési rendszerek, adatfeldolgozás, időjárás előrejelzés, vagy éppen a tréning tevékenység. Az EUMETNET tevékenységének legfőbb célja Európán belül a meteorológia számára elérhető erőforrások sokkal hatékonyabb hasznosítása, végeredményben a legjobb minőségű meteorológiai információ előállítás.

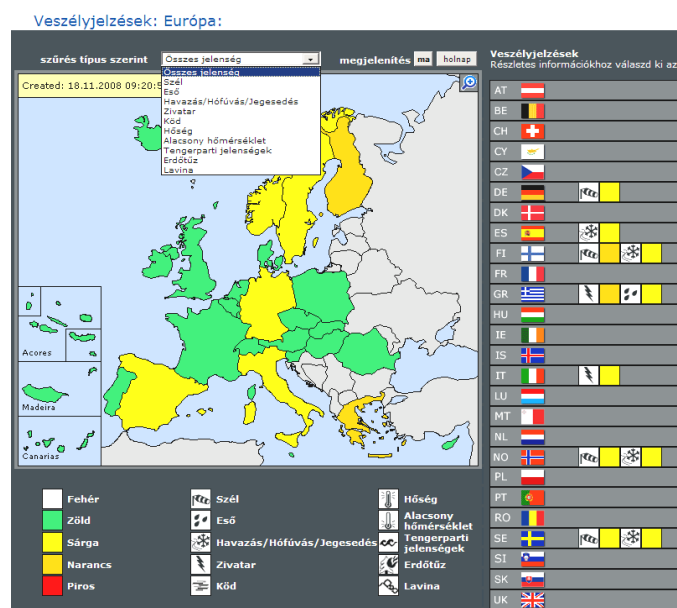
Létrejöttét más, a meteorológia területén Európában már létező és sikeres együttműködések inspirálták, mint például az ECMWF, vagy az EUMETSAT. Az együttműködés 1996-ban alakult meg, jelenleg 24 európai ország tagja, köztük Magyarország is 2004-től (2. ábra).



2. ábra. Az EUMETNET tagállamai. Forrás: EUMETNET.

A következőkben az időjárás előrejelzést közvetlenül, vagy indirekt módon érintő, az EUMETNET égíse alatt működő programokat soroljuk fel:

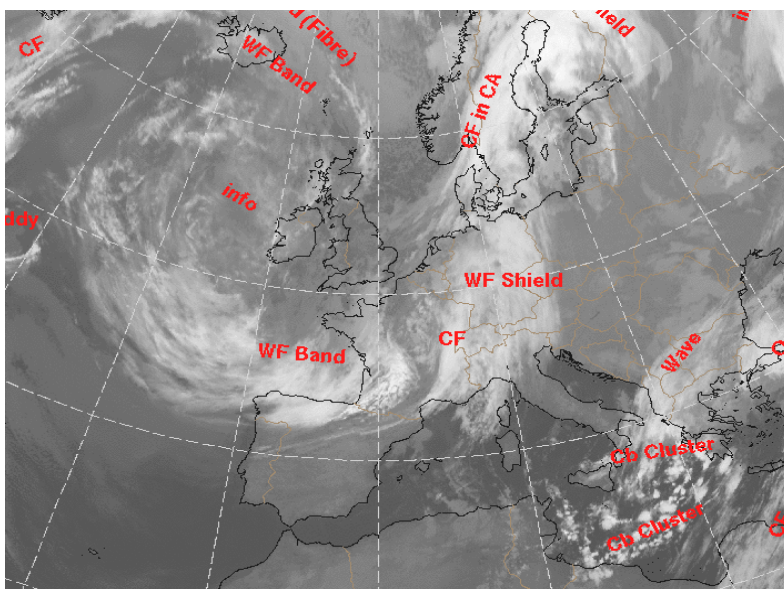
Az **EMMA** – The European Multi-services Meteorological Awareness – program kereteiben került kifejlesztésre a www.meteoalarm.eu honlap, amely az egyes nemzeti meteorológiai szolgálatok extrém időjárási helyzetekre vonatkozó figyelmeztető előrejelzéseit integrálja egységes megjelenésű felületbe (3. ábra). A központi felületről az egyes országokra kattelve a nemzeti meteorológiák veszélyjelző oldalaira jutunk. A rendszerben jelenleg 26 ország területére, 48 óráig érhető el veszélyjelzések több szélsőséges időjárási jelenségre egy 4 fokozatú, könnyen értelmezhető színskála segítségével, 28 különböző nyelven.



3. ábra. A meteoalarm honlap. Forrás: METEOALARM.

Az egyes országok figyelmeztető előrejelzéseinek egységesítése már a 2000-es évek elejétől elkezdődött. A folyamathoz a kezdő lökést az 1999 Karácsonya után gyors egymásutánban Európa északnyugati részén átgázoló két ciklon – „Lothar” és „Martin” – által végzett hatalmas pusztítás adta meg. Az EMMA, majd az EMMA II. projekt végül elvezetett a meteoalarm rendszer operatív bevezetéséhez 2007 márciusában. Időközben a projekt neve is METEOALARM-ra változott. A honlap egyre népszerűbb, fejlesztése jelenleg is tovább folytatódik. A távlati cél közel 50 ország részvétele, további időjárási jelenségek bevonása, valamint például az időtáv esetleges kiterjesztése és a riasztási küszöbrendszerek egységesítési lehetőségeinek keresése.

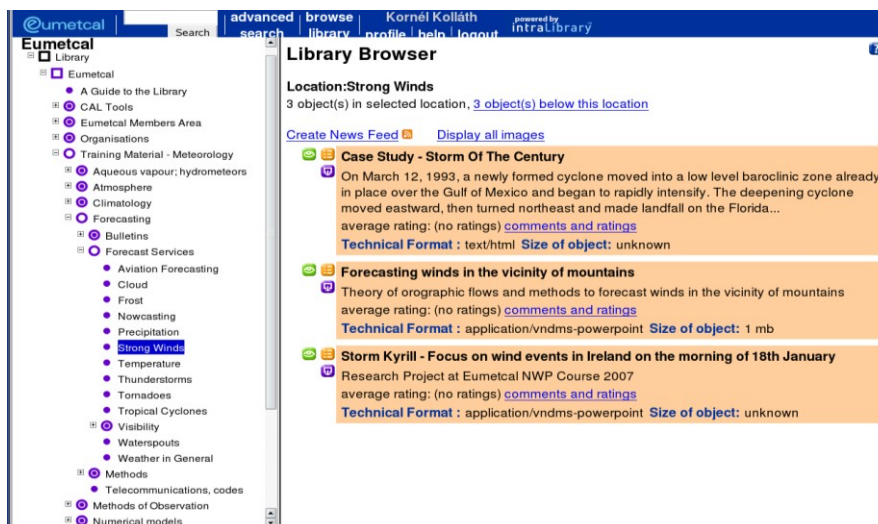
A **SatRep** – Satellite and Report – egy összetett módszer, amely az aktuális időjárást írja le műholdfelvételek és numerikus modell adatok alapján. A felhőképeken látható időjárási objektumok az ún. konceptuális modellek segítségével ismerhetők fel, a beazonosítási folyamat végén egy, a 4. ábrán is látható produktum készül. A SatRep módszert először a 80-as évektől az Ausztriai Meteorológiai Szolgálatnál kezdték alkalmazni. Később az EUMETSAT-tal és a Finn-, valamint a Holland Meteorológiai Szolgálattal közösen fejlesztették tovább a koncepciót.



4. ábra. SatRep analízis 2008. november 18-án 06 UTC-kor. Forrás: SatRep honlap.

A SatRep 2008-tól már EUMETNET projektként működik 11 európai ország részvételével. Az OMSZ ugyan közvetlenül egyelőre nem vesz részt a fejlesztésben, a produktumok használatán keresztül azonban részese a projektnek.

Az **EUMETCAL** – European Meteorological Computer Assisted Learning – az európai virtuális meteorológiai oktatási rendszer kialakítására létrejött projekt. 2001-ben indult útjára az azt megelőző EuroMET nevű, hasonló témájú Európai Unió keretprogram projektből kiindulva. Jelenleg a 3. fázis van folyamatban (a 2. fázis 2004–2007-ig tartott), amelyben a 2012-ig tartó időszak során az európai szolgálatok meteorológiai training tevékenységének területén meglévő együttműködések további fejlesztése, az ismeretek, tapasztalatok cseréje, azok leghatékonyabb felhasználása a cél.



5. ábra. Részlet az Eumetcal virtuális könyvtárából. Forrás: EUMETCAL.

Az elmúlt évek során az EUMETCAL keretében egy hatalmas, folyamatosan bővülő virtuális könyvtár jött létre, amely az interneten keresztül elérhető módon, tematikusan rendszerezett oktatási anyagokat tartalmaz (lásd példaként az 5. ábrát). Emellett interaktív tanítási modulok érhetők el, továbbá például különböző meteorológiai tréningek, kurzusok szervezésére, virtuális lebonyolítására is van lehetőség.

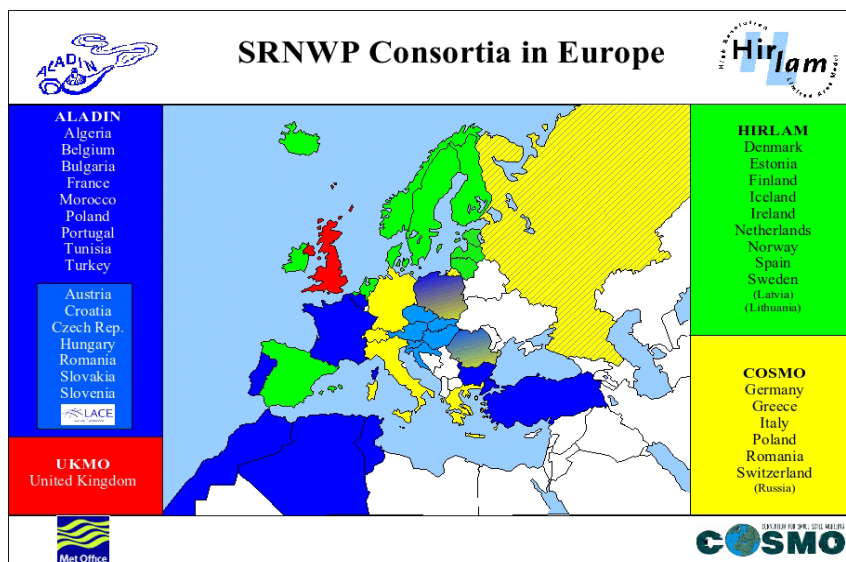
EUCOS – A mérések, megfigyelések, távérzékelte adatok nagyon fontos szereplői az időjárás előrejelzés folyamatának. A hagyományos prognóziskészítési módszerekben játszott szerepük mellett napjainkban már elsősorban a számszerű időjárás előrejelzési modellek adatasszimilációs rendszerei számára szolgáltatnak nélkülözhetetlen adat-tömeget. Nem véletlen tehát, hogy az EUMETNET is kiemelten kezeli a megfigyeléssel kapcsolatos programokat. A műholdas megfigyelések nem tartoznak a programok hatókörébe, ugyanis erre az EUMETSAT az illetékes.

Az EUCOS (EUMETNET Composite Observing System) program feladata a tagországok területén és annak környezetében a földbázisú megfigyelési rendszer optimális változatának megtervezése (különböző tanulmányokon keresztül), fokozatos kialakítása, valamint az így létrejövő kompozit megfigyelési rendszer (EUCOS) teljesítményének folyamatos elemzése. Az optimalizálás iránya elsődlegesen a szinoptikus skálájú előrejelzések minőségének javítása a költségek növelése nélkül.

Az EUCOS tervezési, elemzési fázisának (Implementation programme, 1999–2001) javaslatai alapján a kompozit megfigyelő rendszer operatív kialakulása az EUCOS első operatív programjának keretében történt meg (Operational programme–I, 2002–2006). A megfigyelési rendszer hatékonysági vizsgálataiban, a különböző megfigyelési szegmensek numerikus előrejelzésekre gyakorolt hatásainak elemzésében az OMSZ is tevékenyen részt vett (Observing System Experiment). Jelenleg már az operatív program 2. fázisa zajlik (2007–2011), aminek keretében a földbázisú megfigyelési rendszer további optimalizálása a cél.

SRNWP –Az SRNWP (Short Range Numerical Weather Prediction) az Európán belül működő rövidtávú, korlátos tartományú modellezéssel foglalkozó konzorciumok közötti szakmai együttműködés.

Az együttműködés alapvető célja az európai korlátos tartományú modellezés összefogása, a különböző LAM (Limited Area Modelling) konzorciumok közötti koordináció. A résztvevők a 6. ábrán látható módon az ALADIN, COSMO, HIRLAM és az RC LACE konzorcium, valamint az Angol Meteorológiai Szolgálat (Met Office). Az SRNWP együttműködés 1993-ban alakult meg, előzménye az 1979 óta meglévő (ma is aktív), hasonló funkciójú EWGLAM (European Working Group on Limited Area Modelling) munkacsoport volt.



6. ábra. Az SRNWP konzorcium résztvevői. Forrás: SRNWP honlap.

Az SRNWP konzorciumok közötti koordináció szervezése 2000-től EUMETNET-es program keretében működik (C-SRNWP megjelöléssel), amelynek felelőse a 2008–2011-es időszakra az OMSZ. A konzorciumok közötti koordináció a program keretében működő Szakértői Csoportok (Expert Team) munkáján keresztül valósul meg. Jelenleg 8 különböző Szakértői Csoport működik.

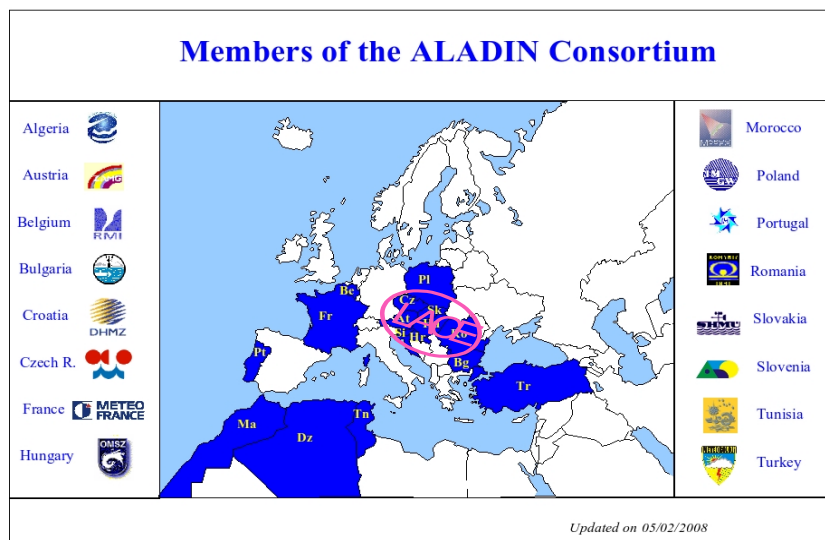
ALADIN / RC LACE

A 80-as évek végén végbement politikai változások tették először lehetővé a közép- és kelet-európai országok számára új típusú együttműködések kialakítását. Ennek egyik fontos állomása volt egy bécsi találkozó 1990-ben, ahol egy közép-európai, regionális, rövidtávú előrejelző központ kialakításának lehetőségeit keresték a résztvevő országok. Az RC LACE (Regional Co-operation for Limited Area modelling in Central Europe) ebből a kezdeményezésből fejlődött ki a találkozót követően eredetileg hat közép-európai ország, köztük Magyarország részvételével (lásd a 7. ábrán a lila ellipszissel jelölt országokat) a számszerű időjárás-előrejelző modellekkel kapcsolatos kutatási és operatív együttműködés céljából.

Az RC LACE együttműködés csíráit látva a Francia Meteorológiai Szolgálat (Meteo France), a francia állam pénzügyi támogatását is maga mögött tudva, időközben

javaslatot tett a közép-európai meteorológiai szolgálatok felé a Meteo France saját globális modelljének (ARPEGE) korlátos tartományú változatának kifejlesztését célzó együttműködésre.

A javaslatból aktív együttműködés lett, az ARPEGE modell LAM változatának kifejlesztése (a név röviddel az indulást követően ALADIN-ra változott) már 1991 őszén elkezdődött a franciaországi Toulouse-ban. A modell kifejlesztésén több ország kutatói dolgoztak, az időközben megalakuló RC LACE-szel is együttműködésben (közük éveken keresztül több OMSZ-os kolléga). Az ALADIN együttműködés a térség korlátos tartományú modellezésének első számú terepévé vált.



7. ábra. Az ALADIN konzorcium résztvevői (kék színezés), valamint az RCLACE országai (lila ellipszis). Forrás: ALADIN honlap.

Az ALADIN modell első kvázi-operatív változata 1994-re készült el, majd 1996-tól kezdődően egyre több tagországban kezdődött el a modell operatív futtatása. Magyarországon az ALADIN 1998-tól vált operatívvá. A modell azóta is napi rendszerességgel szolgáltat rövidtávú előrejelzési alapinformációt, a modell outputjai az OMSZ rövidtávú előrejelzési tevékenységének fő inputjai.

Az ALADIN fejlesztése az utóbbi években is folyamatos, az OMSZ modellezéssel foglalkozó osztályán évente több kolléga dolgozik ALADIN-os témájú projekteken. Az elmúlt néhány év kiemelkedő fejlesztései a háromdimenziós variációs adatasszimilációs séma operatív üzembe állítása (2005-től elsőként az OMSZ-ban), a rövidtávú EPS rendszer kifejlesztése, valamint az AROME, nem-hidrosztatikus modell fejlesztése.

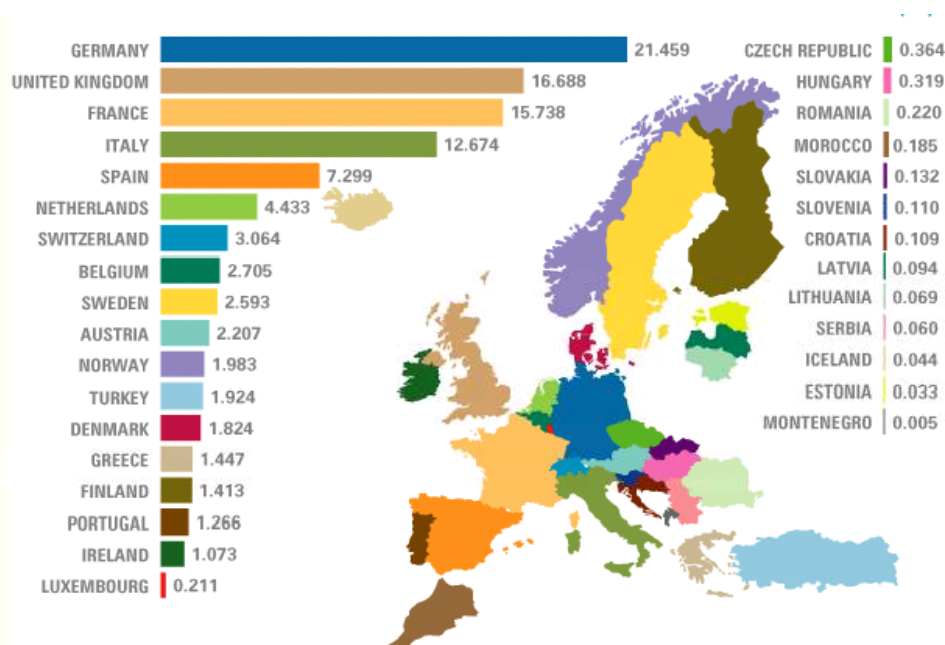
ECMWF

Az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecats) az EUMETSAT intézményéhez hasonló, független nemzetközi szervezet. Az ECMWF hivatalosan 1975 novemberében alakult meg egy több éves folyamat eredményeként, amelynek kezdetei még a 60-as évek végére nyúlnak vissza (részletekért az ECMWF 30-éves történetéről

2006-ban „Medium-Range Weather Prediction – The European Approach” címmel kiadott könyvet ajánljuk).

Az intézetnek 18 teljes jogú és 13 társult tagja van, Magyarország 1994-től társult tag. A szervezetet költségvetése legnagyobb részét a tagországok hozzájárulásaiból származik, amelyet a bruttó nemzeti jövedelem alapján arányosan határoznak meg (a társult tagok a teljes díj felét fizetik). A 8. ábrán a résztvevő országok láthatók a százalékos költségvetési hozzájárulásokkal. Döntéshozó testülete a Vezetői Tanács, amelynek a működését különböző bizottságok segítik. Jelenleg mintegy 230 fő áll alkalmazásban, az intézet a dolgozóit egykét kivételtől eltekintve a tagállamokból toborozza. Jelenleg az OMSZ két munkatársa dolgozik az ECMWF-ben.

Az előrejelző központ legfőbb feladata a középtávú numerikus előrejelzések fejlesztése és operatív előállítás. (Megjegyezzük, hogy ma már szezonális előrejelzések is készülnek.) Az ECMWF-nél az első operatív előrejelzés 1979 augusztusában készült. Az azóta eltelt időben napi rendszerességgel folyik a különböző, egyre jobb minőségű operatív produktumok előállítása és továbbítása a tagállamok felé. 1985-től a MARS (Meteorological Archival and Retrieval System) rendszer üzembe állításával a produktumok archiválása is megoldódott. A prognózisok előállítását lehetővé tevő szuper-számítógépes kapacitás egy részét a teljes jogú tagországok is használhatják saját kutatási céljaikra.



8. ábra. Az ECMWF teljes jogú és társult tagállamai a költségvetési hozzájárulások százalékos arányaival. Forrás: ECMWF.

Az ECMWF szintén fontos feladata továbbképzések tartása a tagországok számára a számszerű előrejelzések területén. Fejlesztéseit a tagországok érdekében, azok igényei szerint végzi. A fejlesztési folyamat egy kétoldalú információcsere eredményeként zajlik. Ez egyrészt az ECMWF-ben a tagországok képviselőivel megtartott találkozók, konferenciákat jelenti, másrészt minden második évben két ECMWF-es kolléga (egy-egy szakértő az operatív és a kutatási főosztályokról) szakmai jellegű látogatást tesz minden teljes jogú és társult tagországba.

Az ECMWF-ből származó modell produktumokat először a 80-as évek közepe táján kezdték el használni az OMSZ-ben. Sokáig csak néhány mező volt elérhető, és azok is csak GRID formátumban (gridpontok adatai felsorolva egyszerű szövegfájlban), amiket még kézzel kellett felírni térképekre, majd „kihúzni” az izovonalakat. Kezdetleges számítógépes megjelenítési lehetőség csak évek múlva jelent meg.

Az ECMWF-hez való csatlakozás igénye, az előrejelzési rendszer modernizációjának lehetőségét is magában hordozva, már a 90-es évek legelején felmerült. Hivatalos felvételi kérelmünk 1991 februárjában érkezett meg az ECMWF-be, *Mersich Iván* akkori elnök első intézkedéseinek egyikeként. A csatlakozásunk azonban politikai nehézségekbe ütközött, így csak néhány évvel később, és akkor is csak ún. társult tagként sikerült csatlakozni az ECMWF-hez. Magyarország mindvégig úttörő szerepet játszott a társult tagság rendszerének kialakításában, majd végül a kelet-közép európai országok közül elsőként 1994 júliusában lett tagja az ECMWF-nek. A teljes jogú tagság lehetősége várhatóan a következő 1–2 év során válik realitássá, amikor is az időközben ez irányban módosított alapszerződést az ECMWF tagországok mindegyike ratifikálja.

Az ECMWF-ből számszerű előrejelzési adatok operatíván 1995 elejétől érkeznek az OMSZ-be. A technikai rendszer hivatalos átadása 1995 áprilisában volt, egybekötve David Burrige akkori ECMWF igazgató látogatásával. Az ún. GRIB (GRIdded Binary) fájlformátum, amely a mai napig a rácsponti meteorológiai adatok egyik fő tárolási és továbbítási fájlformátuma, ekkortól van használatban az OMSZ-ban. Az OMSZ megjelenítő rendszerei által használt közös NetCDF (Network Common Data Form) formátummá való átalakítást már a kezdetektől egy szintén nemzetközi projekt keretében az egyesült államokbeli FSL-ből (Forecast System Laboratory) származó, és a szolgálat viszonyaira adaptált ún. „nimbus” rendszer végezte. Az OMSZ végül 2008-tól tért át az ún. „GRIB API” dekódoló szoftverre, amelyet az ECMWF-ben fejlesztettek ki.

Az operatív megjelenítő rendszer (HAWK = Hungarian Advanced Workstation) fejlesztése is OMSZ-FSL együttműködés keretében kezdődött 1993-ban. 1997-től már az ECMWF által fejlesztett, METVIEW nevet viselő meteorológiai megjelenítő szoftver (és a háttérben használt MAGICS grafikus rendszer) is elérhetővé vált az OMSZ-ben. Ezt a program-csomagot kutatási célokra használják, az operatív előrejelzés megjelenítési platformja a HAWK.

Az ECMWF-ből elérhető előrejelzési produktumokkal kapcsolatos fejlesztések az ezredfordulót követően felgyorsultak az OMSZ-ban. A különböző fejlesztéseket ekkortól kezdődően az előrejelzési kutatásokkal, fejlesztésekkel foglalkozó osztály keretén belül végzik. ECMWF-fel kapcsolatos fejlesztés például a saját előállításban készülő EPS meteogramok, fáklyák, a kárpát-medencei klaszterezés, valamint az ECMWF egyhavi és szezonális előrejelzéseinek felhasználása hosszú távú előrejelzési produktumok készítésében.

Az OMSZ és az ECMWF kapcsolatának elmélyítése céljából 2000-től kezdődően évente egy kolléga mehetett 3 hónapos tanulmányútra az ECMWF-be. 2000–2005-ig az operatív főosztály, majd 2006–2007-ben a kutatási főosztály fogadta a látogatókat. Emellett 2001-től megnyílt az út az ún. regisztrált felhasználók előtt. Ez kezdetben 3, ma már kb. 30 kollégát jelent. E program keretében lehetőség van az ECMWF tagországok számára fenntartott szerverén saját programok futtatására, illetve a MARS archívum közvetlen elérésére.

Az előbbiek mellett 2002 után lehetőség nyílt ECMWF-es állások megpályázására is. Az ECMWF-ben eddig 3 OMSZ-os kolléga dolgozott, vagy dolgozik jelenleg is állandó alkalmazásban.

Összefoglalás

Az elmúlt mintegy 2 évtized során az OMSZ időjárás-előrejelző tevékenysége forradalmi változáson ment keresztül. A változásban meghatározó szerepet játszottak a különböző nemzetközi együttműködések. A 90-es évek kezdetétől több, addig elérhetetlennek vélt nemzetközi együttműködéshez sikerült csatlakozni (ECMWF, EUMETSAT), valamint új együttműködések alapításában is sikerült részt venni (ALADIN, RC LACE). Az OMSZ aktív nemzetközi szereplő az időjárás előrejelzés témakörében, több projekt résztvevője, s ez irányú erőfeszítéseinket nemzetközileg is elismerik.

Köszönetnyilvánítás

Ez úton szeretnék köszönetet mondani a Meteorológiai Tudományos Napok keretében elhangzott előadás, valamint e cikk elkészítésében nyújtott segítségükért a következő kollégáimnak: Kertész Sándor és Radnóti Gábor (*Európai Középtávú Előrejelző Központ*); Duska Gizella, Homokiné Ujvári Katalin, Ihász István, Horányi András, Horváth Ákos, Gyúró György, Kolláth Kornél, Varga László (*OMSZ*); valamint Mersich Ivánnak az OMSZ volt elnökének.

Irodalomjegyzék

COST honlap: <http://www.cost.esf.org/>

ECOMET honlap: <http://www.ecomet.eu/>

EUMETSAT honlap: <http://www.eumetsat.int/>

EUMETNET honlap: <http://www.eumetnet.eu.org/>

SatRep honlap: <http://www.knmi.nl/satrep/>

EUMETCAL honlap: <http://www.eumetcal.org/>

EUCOS honlap: <http://www.eucos.net/>

SRNWP honlap: <http://srnwp.met.hu/>

ALADIN honlap: <http://www.cnrm.meteo.fr/aladin/>

RCLACE honlap: <http://www.rclace.eu/>

ECMWF honlap: <http://www.ecmwf.int/>

Austin Woods, 2006: Medium-Range Weather Prediction – The European Approach, *Kiadvány az ECMWF történetéről*, Megjelent az ECMWF gondozásában.

A számszerű és szinoptikus előrejelzések elméleti háttérének fejlődéséről

Práger Tamás^{1,2} és Reisz András^{2,1}

¹ELTE TTK, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék,
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.

²Országos Meteorológiai Szolgálat, 1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1.,
e-mail: prager.t@met.hu, enso@freemail.hu

Összefoglaló – Csaknem pontosan egy évszázaddal ezelőtt, 1904-ben tette közzé *Vilhelm Bjerknes* a számszerű előrejelzések készítésének lehetőségéről és szükségességéről írt tudománytörténeti jelentőségű tanulmányát; a szinoptikus alapokon nyugvó előrejelzések készítése pedig már mintegy 20–25 évvel azelőtt megkezdődött a világ akkor legfejlettebb országaiban. Azóta az előrejelzések módszertana és az ennek háttérében álló elméleti vagy dinamikus meteorológia olyan hatalmas lépésekkel haladt előre, hogy a meteorológiai előrejelzést, és a múlt század utolsó harmadától az éghajlati projekciók készítését joggal tekinthetjük az elmúlt 100 év egyik tudományos-innovációs sikertörténetének. Előadásunkban arra teszünk kísérletet, hogy – természetesen rendkívül vázlatos formában – áttekintsük az elméleti alapok fejlődésének elmúlt 100 éves történetét, azokat a mérföldköveket, amelyek e fejlődést fémjelezték. Mindközben hangsúlyt szeretnénk fektetni arra, hogy megmutassuk: az elméleti alapok csaknem teljesen azonosak a szinoptikus előrejelzési módszerek és a numerikus modellek (a számszerű előrejelzések készítésének eszközei) esetében; következésképpen a gyakorlatban is e módszerek együttes, szinergikus alkalmazása a természetes, sőt optimális megközelítés.

Az elméleti alapok között említést teszünk:

- a meteorológiai folyamatok kvázi-zárt, önszervező termo-hidrodinamikai rendszerként (ún. légköri mozgásrendszerként) való szemléletének kialakulásáról és fejlődéséről;
- a nagyságrendi analízis elmélet (a légköri folyamatok skálafüggő dinamikájának felismerése és elemzése) fejlődéséről;
- a légköri hullámelmélet (a légköri mozgások alapvetően hullámszerű jellegének, illetve hullámként való kezelhetőségének felismerése és e hullámok, illetve az őket létrehozó instabilitások dinamikai leírása) fejlődéséről;
- a légköri energetika (ezen belül a különböző skálájú mozgásrendszerek energetikai folyamatai megismerésének) fejlődéséről;
- a légköri káoszelmélet kialakulásáról és fejlődéséről, a káoszt jelenleg legjobban tükröző előrejelzés-együttesek (ensemble előrejelzések) kialakulásáig;
- a légkör állapotának a rendelkezésre álló mérési adatok alapján készített folytonos 3 és 4 dimenziós mezőként való megjelenítését szolgáló interpolációs, valamint a fejlettebb adatasszimilációs módszerek fejlődéséről;
- a nemlineáris dinamikai légkörmodellek (numerikus modellek) közelítő integrálási módszerei és a bennük használt ún. parametrizációs módszerek fejlődéséről;
- a szinoptikus előrejelzéseket megalapozó szinoptikus szemléleti mód, valamint az újabban kialakult szinoptikai-dinamikai elméletek fejlődéséről;
- végül a numerikus és a szinoptikus szemlélet optimális kombinálását lehetővé tevő modell-utófeldolgozási, illetve konceptuális modellezési módszerek fejlődéséről.

Előadásunkkal a hazai gyakorlatot részleteiben bemutató, ezután következő előadásokat kívánjuk történeti és nemzetközi kontextusba helyezni.

Az előadás ábrái megtalálhatók az OMSZ honlapján:

http://www.met.hu/omsz.php?almenu_id=omsz&pid=metnap34&pri=0&mpx=1

Az ALADIN numerikus előrejelző modell a rövidtávú előrejelzés szolgálatában

Kullmann László

Országos Meteorológiai Szolgálat, Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztály
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1.; e-mail:kullmann.l@met.hu

Összefoglaló – Az ALADIN egy spektrális, hidrosztatikus dinamikával rendelkező, korlátos tartományú modell. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál immár 10 éve fut operatívan, rövidtávú előrejelzést szolgáltatva az előrejelző szakembereknek. 2007 óta nem csupán a determinisztikus változata fut, hanem az ALADIN EPS rendszer is, amely különböző kezdeti feltételekből kiindulva több, különböző előrejelzést készít, információt adva ezáltal egy időjárási esemény bekövetkeztének valószínűségéről is.

A modell futtatást azonban nem csak az előrejelzők használják fel, hanem kimenete más modellek (például légszennyezettség terjedési modellek) számára is biztosítja a légköri kezdeti és határfeltételeket. Egy speciális beállítással a felszínközeli szélmező nagyfelbontású előrejelzésére is alkalmas, amelyet többek között szélérőművek hasznosítanak. Az ALADIN modell az előrejelzésre szánt konfigurációján kívül, számos más konfigurációval is rendelkezik. Jelen cikk szempontjából kiemelendő az érzékenységvizsgálat és az adatasszimiláció. Az érzékenységvizsgálattal megállapíthatjuk, hogy a modell egy adott területre és időpontra vonatkozó előrejelzése milyen mértékben függ a kezdeti feltételektől, illetve, hogy az előrejelzési tartomány melyik része és milyen változók okozzák az érzékenységet. Ennek segítségével eldönthető, hogy a pontosabb előrejelzés érdekében a tartomány mely területén szükséges pontosítani a kezdeti feltételt például célzott megfigyelések alkalmazásával. Az adatasszimiláció egy speciális beállításával olyan kezdeti mezőt állíthatunk elő, amely a lehető legközelebb lesz a megfigyelésekhez. Az eljárással diagnosztikai mezők (pl. CAPE, nedvesség konvergencia, 2 m-es hőmérsékleti mező) nagyfelbontású, pontos analizisét állíthatjuk elő, amely nowcasting célokra is felhasználható. A cikk röviden bemutatja az ALADIN modell főbb tulajdonságait, majd részletesen kitér a különböző, fent említett konfigurációk ismertetésére, illetve arra, hogy mi módon hasznosíthatóak ezek előrejelzési célokra.

Bevezetés

Napjainkban az időjárás előrejelzése már elképzelhetetlen numerikus modellek futtatása nélkül. A számítógép-kapacitás fejlődésének köszönhetően a numerikus modellek egyre részletesebb és pontosabb előrejelzéseket szolgáltatnak. Az alkalmazási területük tág, az ultrarövidtávú előrejelzéstől a klímamodellezésig különböző célokat szolgálnak. Az OMSZ-ban operatívan futtatott ALADIN modellt elsősorban rövidtávú előrejelzésekre használjuk.

Az ALADIN egy korlátos tartományú, spektrális numerikus előrejelző modell (Horányi *et. al.*, 2006). Az 1990-es évek elején fejlesztették ki a Météo-France-nál az ARPEGE globális modellből. Akkoriban a cél csupán a globális modell által előállított mezők nagyfelbontású dinamikai adaptációja volt. Ekkor az ALADIN még pusztán egy interpolációs (globálisról korlátos tartományra történő leképzés) és egy integrálási (hidro-termodinamikai egyenletrendszer numerikus megoldása) konfigurációból állt. Az évek során fokozatosan bővült a konfigurációk száma, amelyek a modellel végrehajtható különböző feladatokat jelentik. Kifejlesztésre kerültek a lokális méréseket tartalmazó kezdeti feltételek előállításához szükséges adatasszimilációs eljárások, az optimális interpoláció (OI), a 3 dimenziós variációs analízis (3d-var), majd ez utóbbi fejlettebb változata a 3d-FGAT (first guess at appropriate time). Az ARPEGE/IFS kódból adaptálták a modell tangens-lineáris és adjungált változatát, illetve a szinguláris vektorok előállítását.

sát szolgáló konfigurációt, amely egy lehetséges eljárás az ensemble előrejelzés kezdeti perturbációinak meghatározására.

Kezdetben az ALADIN modell csak hidrosztatikus dinamikával és a hatékonyság érdekében egy meglehetősen egyszerű fizikai parametrizációval rendelkezett. Később azonban egyre nagyobb hangsúlyt kapott a mezoskálájú folyamatok leírására; ezért fejlesztették ki az ALADIN nem-hidrosztatikus (NH) dinamikáját, amelynek alkalmazása elengedhetetlen a nagy felbontású futtatásoknál. A fizikai parametrizációk terén is jelentős fejlődés történt, amely két úton valósult meg. Egyrészt – az AROME projekt keretében – implementálták a Météo-France-nál kifejlesztett MESO-NH kutatói modell (*Lafore et al.*, 1998) fizikai parametrizációs csomagját. Másrészt kifejlesztésre került az ALARO-fizika néven ismert parametrizációs csomag (*Brozkova*, 2008), amely szintén a mezo-gamma skálán történő futtatást szolgálja.

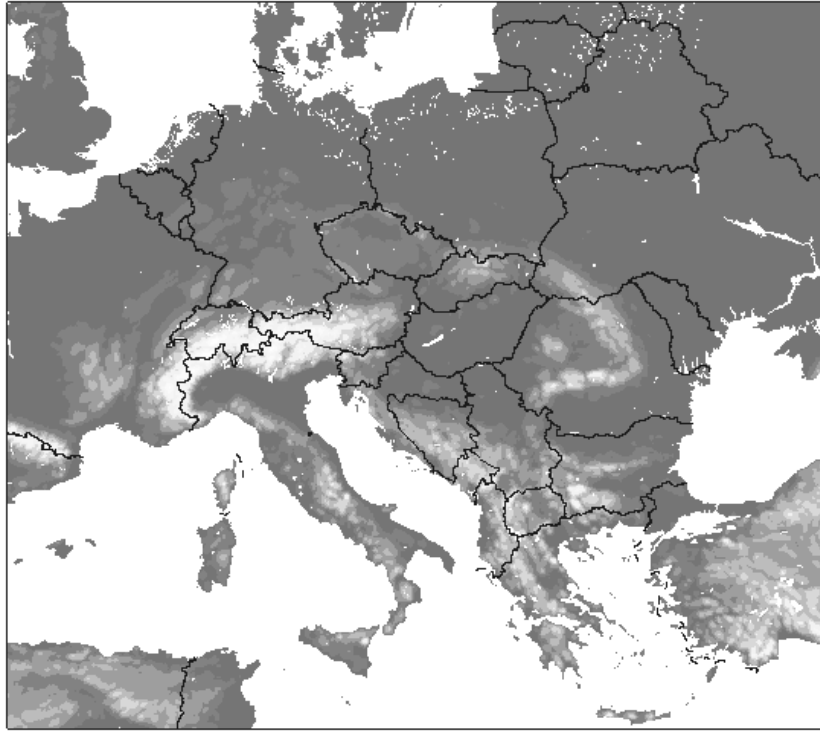
Napjainkban egyre fontosabb szerepet kap a klíma modellezése. Ehhez elsősorban globális modelleket használnak, amelyek felbontása azonban meglehetősen kicsi, 100 km-es nagyságrendbe esik. Ahhoz, hogy információt kapjunk a klíma lokális skálájú viselkedéséről, célszerű leiskáláznunk a globális előrejelzést egy korlátos tartományú modellel. Erre a célra fejlesztették ki az ALADIN/Climate modellt, amely elsősorban a fizikai parametrizációk tekintetében különbözik az operatív ALADIN modelltől.

A légkör kaotikus viselkedése miatt, mint ismeretes, egy kis kezdeti perturbáció exponenciálisan növekedhet az integrálás során. Ennek a problémának a leküzdését hivatott kezelni a valószínűségi előrejelzés (ensemble prediction system: EPS). Ennek során különböző, kis perturbációkkal megváltoztatott kezdeti állapotokból kiindulva egymással párhuzamosan több előrejelzést végzünk. Eredményül nem csupán egy légköri mezőt kapunk, hanem információt szerezhetünk bekövetkezésének valószínűségéről is. Napjainkban már az ALADIN modellt is használják EPS előrejelzésre.

A fentiek alapján látjuk tehát, hogy az ALADIN programrendszerén nem csupán egyetlen modellt értünk, hanem egy modell családot, amely különböző tér- és időskálán történő előrejelzést biztosít. A cikkben elsősorban a rövidtávú előrejelzést szolgáló ALADIN alkalmazásokkal foglalkozunk.

Az operatív alkalmazás közvetlen felhasználása

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál operatíván futtatjuk az ALADIN modellt mind determinisztikus, mind EPS előrejelzés céljából. A determinisztikus futtatás kezdeti feltételét lokális adatasszimilációval határozzuk meg. A kezdeti felszíni mező előállításához optimális interpolációt, míg a magas légköri mezőkhöz 3d-var-t használunk. A peremfeltételeket az ECMWF-ben futtatott IFS modell szolgáltatja. Naponta négy alkalommal fut a modell (0, 6, 12, 18 UTC-kor), 48 órás előrejelzést szolgáltatva. A modell integrálási tartománya hozzávetőlegesen Európa méretű (*1. ábra*), 8 km horizontális felbontással, vertikálisan 49 modellszintet használ. Az EPS rendszer 11 tagból áll, amelyek közül az egyik a kontroll (perturbálatlan) tag. A perturbált kezdeti- és peremfeltételeket az ARPEGE EPS rendszere (PEARP) adja (tehát a perturbációkat nem lokálisan állítjuk elő, hanem a globális EPS rendszert skálázzuk le). A PEARP kezdeti perturbációit a szinguláris vektorok módszerével származtatják.



1. ábra. Az operatív ALADIN modell integrálási tartománya.

Az ALADIN EPS-hez használt tartomány mérete nagyjából megegyezik a determinisztikus modellével, de felbontása kisebb, csupán 12 km, és a vertikális szintek száma is kevesebb, 46. Naponta egyszer fut, 18 UTC-kor, 60 órás előrejelzést végezve.

A determinisztikus ALADIN modell előrejelzését ezenkívül felhasználjuk a PEPS (Poor man's Ensemble Prediction System) rendszerhez is. Ez egy multi-modell EPS rendszer, ami azt jelenti, hogy az EPS tagokat a különböző országok meteorológiai szolgálatainál lokálisan futtatott modellek előrejelzéseiből teszik össze, és ebből számolják a valószínűségi mezőket. Mivel az egyes modellek integrálási tartománya nem egyezik meg, ezért a különböző országok területére vonatkozó EPS elemek száma is eltér egymástól. Magyarország területére körülbelül 15 tag jut. A PEPS rendszerből naponta 4 alkalommal, 0, 6, 12 és 18 UTC-kor készül előrejelzés. Az OMSZ-ban lokálisan futtatott modellek mezőit utófeldolgozás után a HAWK rendszerben jelenítjük meg, hogy az előrejelzők számára elérhető legyen. Az EPS rendszer esetében a különböző tagokat és ezen kívül a mezők valószínűségeit is megjelenítjük. A PEPS rendszer valószínűségi mezőit szintén megkapják a szinoptikus szakemberek.

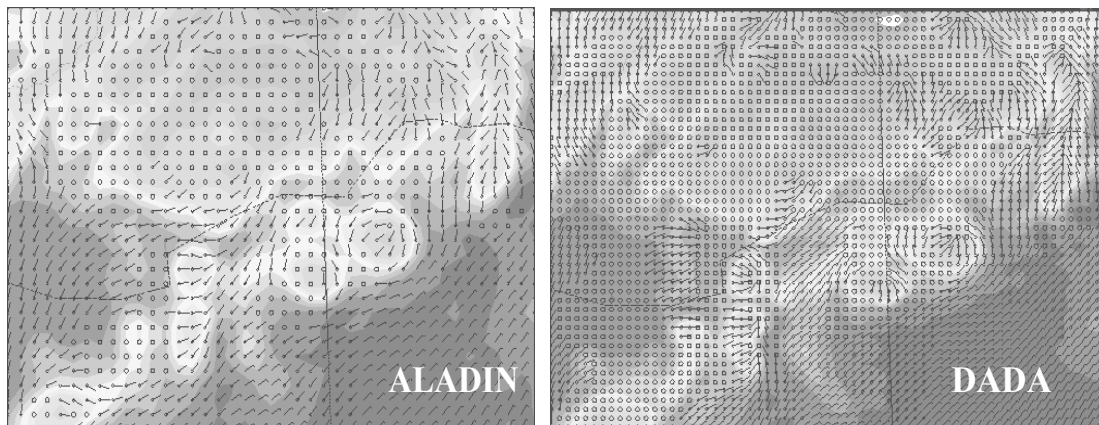
Az operatív ALADIN modell előrejelzése nem csupán a szinoptikus számára készül. Futtatásával lehetőség van más numerikus modellek meghajtására is. Példa erre a Rodos (Real time Online Decision Support: *Mikkelsen et. al.*, 1997) légszennyezettség terjedést számító modell. Ahhoz, hogy le lehessen írni a szennyező anyag terjedését, ismerni kell a légköri áramlásokat. Ezt az ALADIN modell segítségével határozzuk meg. Az ALADIN előrejelzéséből származó mezőket órás időbeli felbontásban utófeldolgozásnak vetjük alá (a mezőket rácspont-térbe transzformáljuk), majd olyan formátumba konvertáljuk, amelyet a Rodos modell már képes beolvasni.

Egy másik példa a Météo-France-ban kifejlesztett felszíni parametrizációs modell, a SURFEX (*Noilhan és Planton*, 1989; *Masson*, 2000), futtatása. A SURFEX mo-

dell fejlettebb, mint a rövidtávú numerikus időjárás-előrejelzési modellekben általában alkalmazott felszíni sémák. Képes szimulálni többek között a városok illetve a tavak hatását, továbbá modellezni tudja a fotoszintézis folyamatát és ezáltal a növényzet növekedését. A SURFEX futtatásához szükség van a felszín és a „légköri kényszerek” (felszín feletti levegő hőmérséklete, nedvessége, szél, sugárzás, csapadék, stb.) ismeretére. A kényszereket az ALADIN modell legalsó modellszintjének a mezőiből, illetve a csapadék- és sugárzási fluxusokból származtatjuk. A SURFEX modell egyik lehetséges alkalmazása, amikor az ALADIN integrálási tartományánál kisebb tartományon, de nagyobb felbontáson akarjuk futtatni a modellt, hogy pontosabb felszíni mezőket kapjunk valamely kiválasztott területre.

Az OMSZ több szélerőműtől is megrendelést kap a felszínközeli szél pontos előrejelzésére. Nyilvánvalóan a szélmező pontos leírásához szükségünk van a domborzat nagy felbontású ismeretére. Azonban a jelenlegi 8 km-es felbontáson túl már nem lehet növelni a modell felbontását sem az ebből fakadó számítási igény növekedése miatt, de elméleti megfontolásokból sem. Ekkor ugyanis már az úgynevezett „szürke zónába” kerülünk, amelynél egyrészt már megkérdőjelezhető a hidrosztatikai közelítés érvényessége, másrészt a konvektív folyamatokat részben már explicit módon írja le a dinamika, ugyanakkor parametrizáljuk is azokat, tehát kétszer vesszük figyelembe.

A nagy felbontású, felszínközeli szél előrejelzésére ezért egy speciális eljárást dolgoztak ki az ALADIN-ban, (Žagar és Rakovec, 1999), amely a dinamikai adaptáción alapszik. Első lépésként interpoláljuk a modell mezőit egy kisebb, de nagyobb horizontális felbontású (5 km) tartományra. Az interpoláció által meghatározott kezdeti mezőből kiindulva futtatunk egy fél órás adiabatikus integrálást. Az integrálásra azért van szükség, mivel az interpoláció önmagában még nem ad többlet információt a rendszernek. Körülbelül fél óra szükséges, hogy a szél adaptálódjon az új domborzathoz. Az integrálás során a fizikai parametrizációk közül csak a gravitációs hullám ellenállást és a vertikális turbulenciát kapcsoljuk be, hiszen csupán azon folyamatokat akarjuk figyelembe venni, amelyek elsődlegesen befolyásolják a momentum-egyenletet. A gyakorlatban negyed órás frekvenciával készítjük el a nagy felbontású szél dinamikai adaptációját. A 2. ábrán egy példát láthatunk az ALADIN és a nagyfelbontású felszínközeli szél előrejelzésére szolgáló eljárás szélmezőire. Az ábra jól illusztrálja, hogy a felszínközeli szél előrejelzése pontosabban alkalmazkodik a nagy felbontású domborzathoz.



2. ábra. Az ALADIN modell (balra) és a nagy felbontású, felszínközeli szél előrejelzésére szolgáló eljárás (jobbra) által előrejelzett szélmezők.

Diagnosztikai analízis

Veszélyes időjárási jelenségek előrejelzésére szolgál a Nowcasting-módszer. Ennek lényege, hogy egy pontos, a valós légköri állapothoz minél közelebb lévő kezdeti mezőből kiindulva nagy felbontású, ultrarövidtávú előrejelzést készítenek, amely segítségével felismerhető az előrejelző szakember számára a veszélyt hordozó időjárási jelenség, például egy heves konvektív folyamat kialakulása. Az előrejelzést megnehezíti a numerikus modelleknél gyakran fellépő spin-up probléma, amely azt jelenti, hogy az előrejelzés első néhány órájában a modell csapadék előrejelzése pontatlan. Egy másik problémát jelent a gyakori (óránkénti) analízis készítése. Az analízis előállítása egyrészt számításigényes folyamat, másrészt a pontos kezdeti állapothoz a lehető legtöbb megfigyelés ismeretére van szükség, ezért az analízis mező esetleg csak jóval az analízis időpontja után készül el.

A fent említett problémák ismeretében az ALADIN modellben egy kompromisszumos megoldást dolgoztak ki, az úgynevezett Diagpack eljárást (Horányi és Jerman, 2001). Azért beszélünk kompromisszumból, mivel nem történik ultra-rövidtávú előrejelzés, ugyanakkor gyakori (óránkénti) és a valós légköri állapothoz közeli analízis mezőt előállít. Az eljárás az optimális interpoláció módszerén alapszik. Az optimális interpoláció során az analízist az alábbi összefüggés határozza meg.

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{B}\mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}^b) \quad (1)$$

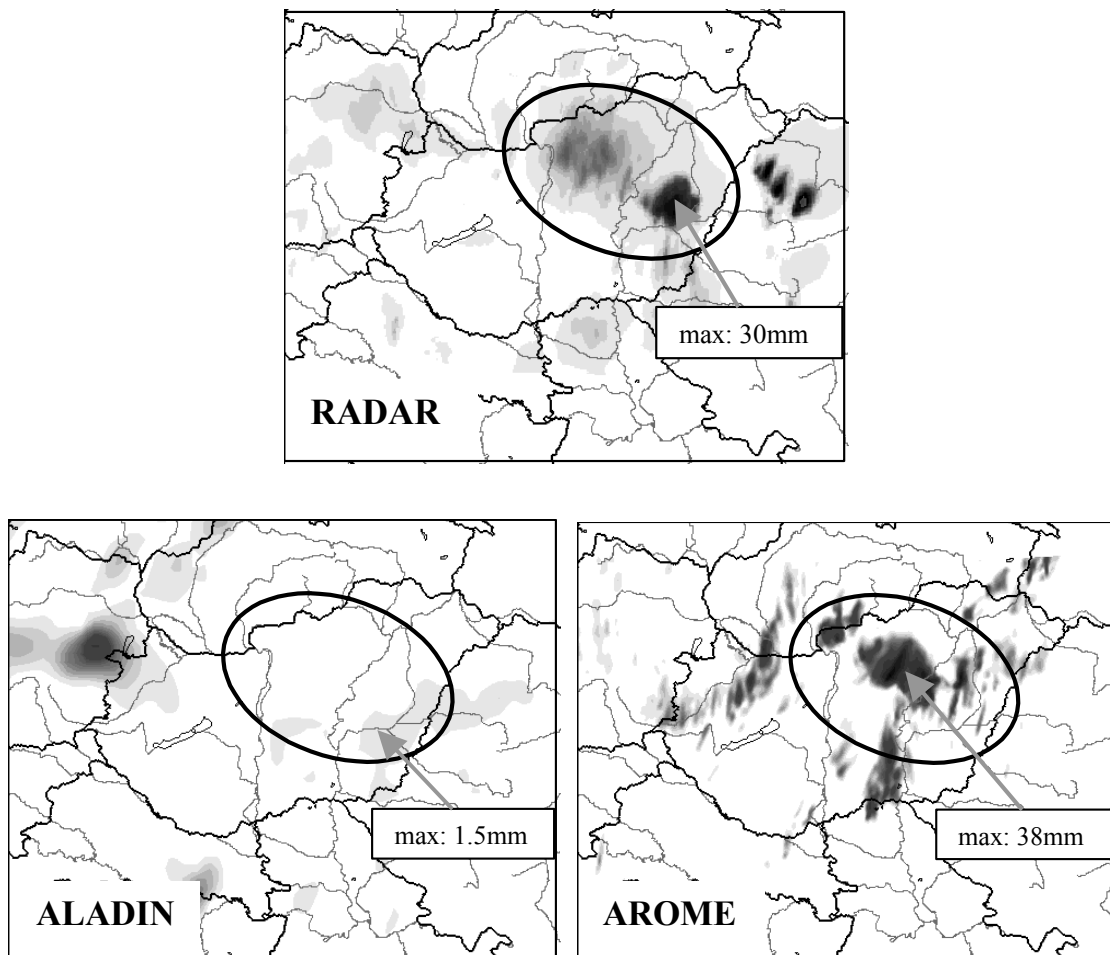
A fenti egyenletben \mathbf{x}^b a háttérmező, \mathbf{x}^a az analízis-mező, és \mathbf{y} a megfigyelési mezőt jelöli. A \mathbf{H} lineáris megfigyelési operátor segítségével térhetünk át a modell állapotteréből a megfigyelések állapotterébe. A háttérmezőre azért van szükségünk, mivel egyrészt a megfigyelések is hibával terhelték, másrészt számuk sokkal kisebb, mint a rácspontok száma. A háttérmező általában egy korábbi időpontból kiinduló, az analízis időpontjára vonatkozó numerikus modell előrejelzés. A \mathbf{B} és \mathbf{R} mátrix a háttérmező és a megfigyelési mező súlyát jelöli. Ezeket statisztikai módszerekkel határozzák meg az előrejelzési és a megfigyelési hibák figyelembe vételével. Azonban a diagnosztikai analízis szempontjából fontos, hogy az analízis mező közel legyen a megfigyelésekhez, ezért a Diagpack-nál a háttérmező súlyát mesterségesen lecsökkentik. Az így keletkezett analízis nem alkalmazható numerikus modell kezdeti feltételeként, mivel dinamikai inkonzisztenciát tartalmazhat, de a jelen eljárásban ez nem jelent gondot, hiszen nem cél numerikus modell futtatása az analízisből.

A Diagpack eljárás synop megfigyeléseket asszimilál és a felszín közeli mezők: T 2 m, RH 2 m, U 10 m, analízisét készíti el. Ezen kívül a konvektív helyzetek meghatározása céljából fontos diagnosztikai mezők: CAPE (konvektív hasznosítható potenciális energia) és a MOCON (nedvesség konvergencia) analízisét is előállítja.

Ultrarövidtávú előrejelzés

Mint említettük, a Diagpack eljárás csupán egy kompromisszumos megoldás a veszélyes időjárási jelenségek időben való felismerésére. A diagnosztikai mezők ugyan segítséget nyújthatnak egy konvektív folyamat felismerésében és rövidtávú előrejelzésében, de nem elegendőek a meghatározásához. Előfordulhat, hogy nem alakul ki konvekció,

noha nagy a CAPE és MOCON értéke, de az is megtörténhet, hogy a konvektív terület advektálódik az idővel, így az esemény nem ott következik be, ahol azt a Diagpack eljárás megjósolta.



3. ábra. Példa az AROME modell előrejelzésére. Az ábrán 2008. 05. 20. 06 UTC-s futás 10 órás előrejelzésének egy órás akkumulált csapadékösszege látható. Felül: radar (1 órás összeg), balra: ALADIN, jobbra: AROME.

Ahhoz, hogy pontosabb előrejelzést készíthessünk, numerikus modell alkalmazására van szükség. Ebből a célból fejlesztették ki az AROME modellt (Seity *et al.*, 2005), amely az ALADIN modell nagy felbontású, nem-hidrosztatikus verziója. A nem-hidrosztatikus dinamika azt jelenti, hogy a vertikális sebesség is prognosztikai változó, mivel ezen a felbontáson már nem tartható az a feltételezés, hogy a vertikális gyorsulás elhanyagolható a gravitációs gyorsuláshoz képest. Az AROME modell a nem-hidrosztatikus (NH) dinamikán kívül igen fejlett fizikai parametrizációs csomaggal rendelkezik, amely, mint említettük, a MESO-NH kutatói modellből származik. A felszíni folyamatokat a már korábban említett SURFEX modell segítségével számolja, de ebben az esetben kétirányú csatolással, tehát a felszíni fluxusok visszahatnak a magas légköri mezőkre. A mikrofizikai parametrizáció 6 prognosztikai változót tartalmaz, és az ezek között lezajló folyamatok részletes leírását is magába foglalja (Pinty és Jabouille, 1998). A szubgrid skálájú turbulens áramlás parametrizációjára az 1 dimenzi-

ós CBR (*Cuxart et al.*, 2000) sémát használja. A sekély konvekcióra a Kain és Fritsch sémáját alkalmazza (*Kain és Fritsch*, 1990), míg a mély-konvekciós folyamatokat nem parametrizálja, mivel feltételezhető, hogy ennél a felbontásnál (tipikusan 2,5 km horizontális felbontáson futtatják) a NH dinamika és a mikrofizika explicit képes kezelni azt.

Az AROME modellt folyamatosan fejlesztik, a Météo-France-nál már 2008 vége óta operatívan futtatják. Az OMSZ-ban 2009-ben tervezzük az operatív alkalmazását. Az AROME modell számos esetben bizonyította, hogy képes előrejelezni a kis skálájú, veszélyes időjárást okozó folyamatokat. Egy példát láthatunk erre a 3. ábrán, amely az ALADIN és az AROME modell 10 órás előrejelzésének óránkénti csapadékösszegeit hasonlítja össze. Az AROME modell sokkal pontosabban jelezte előre a radar képen is látható heves zivatar, a 30 mm-t is meghaladó csapadékkal, mint a hidrosztatikus feltételezéssel futtatott ALADIN modell.

Érzékenységvizsgálat és célzott megfigyelések

Egy modell előrejelzésének a pontosságát több tényező befolyásolja: az alkalmazott dinamika és parametrizációk, a numerikus közelítések, illetve a kezdeti- és határfeltételek pontossága. Ebben a fejezetben a modellnek a kezdeti állapotra vonatkozó érzékenységgel foglalkozunk (*Soci et al.*, 2003; *Steib*, 2003).

Tekintsünk az előrejelzés t_2 végállapotában egy kiválasztott horizontális tartományt (X), amelyen a J diagnosztikus függvényt definiáljuk. J a légkör állapotvektorainak a függvénye. (A J függvényt többféleképpen is megadhatjuk. Mivel a különböző mezők nagyságrendje eltér egymástól, így célszerű az energia-norma alkalmazása.) Egy, a kezdeti állapotban keletkező, $\delta\mathbf{x}$ perturbáció megváltoztatja a végállapotot, és ezáltal a végállapotban definiált J függvényt. Mivel a J függvényt az integrálási tartomány egy korlátos területén definiáltuk, ezért a kezdeti állapot különböző területein fellépő perturbációk nyilván nem ugyanakkora hatással lesznek a J függvényre. Lesznek olyan tartományok, amelyek alig vannak hatással rá, míg más tartományok hatása nagyobb. Az érzékenységvizsgálat során arra a kérdésre keressük a választ, hogy melyik az a tartomány a kezdeti t_1 időpontban, ahol a végállapotban definiált J diagnosztikai függvényre legnagyobb hatást gyakorló perturbációk vannak.

A kezdeti $\delta\mathbf{x}$ perturbáció hatására a végállapotban bekövetkező változás $\delta\mathbf{y}$ lesz, tehát a diagnosztikai függvény megváltozása az alábbi alakban írható:

$$\delta J = J(\mathbf{y} + \delta\mathbf{y}) - J(\mathbf{y}) = \frac{dJ(\mathbf{y})}{d\mathbf{y}} \delta\mathbf{y} = \langle \nabla_{t_2} J, \delta\mathbf{y} \rangle_Y. \quad (2)$$

Az érzékenységet a gradiens-mező értéke, $\nabla_{t_2} J$, határozza meg. Mivel bennünket a kezdeti állapotra vonatkozó érzékenység érdekel, a végállapotbeli gradiensből, $\nabla_{t_2} J$, meg kell határozni a kezdeti állapotban felvett értékét, $\nabla_{t_1} J$, amely az adjungált modell futtatásával lehetséges.

Amennyiben a kezdeti perturbáció, $\delta\mathbf{x}$, kicsi, azzal a feltételezéssel élhetünk, hogy a perturbációk időbeli fejlődése leírható a tangens-lineáris modellel, tehát

$$\delta\mathbf{y} = \mathbf{L}\delta\mathbf{x},$$

ahol \mathbf{L} a tangens-lineáris operátor amely az \mathbf{M} nem-lineáris modelloperátor elsőfokú Taylor-polinomja.

Az adjungált operátort a skaláris szorzat segítségével definiálhatjuk. Amennyiben $\mathbf{L}: X \rightarrow Y$ egy lineáris operátor, amely az X és az Y Hilbert-terek közt képez le, és $\langle \cdot, \cdot \rangle_X$, $\langle \cdot, \cdot \rangle_Y$ skaláris szorzatok az adott tereken, akkor $\mathbf{L}^*: Y \rightarrow X$ lineáris operátor az \mathbf{L} adjungáltja, ha teljesül, hogy:

$$\langle \mathbf{L}\mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle_Y = \langle \mathbf{x}, \mathbf{L}^*\mathbf{y} \rangle_X . \quad (3)$$

A fentiek alapján a kezdeti állapotban érvényes gradiens a végállapotbeli értékből az (2), és (3) egyenletek segítségével számolható:

$$\delta J = \langle \nabla_{t_2} J, \delta \mathbf{y} \rangle_Y = \langle \nabla_{t_2} J, \mathbf{L} \delta \mathbf{x} \rangle_Y = \langle \mathbf{L}^* \nabla_{t_2} J, \delta \mathbf{x} \rangle_X = \langle \nabla_{t_1} J, \delta \mathbf{x} \rangle_X , \quad (4)$$

amelyből:

$$\nabla_{t_1} J = \mathbf{L}^* \nabla_{t_2} J . \quad (5)$$

Tehát a kezdeti feltételekre való érzékenységet (a gradienseket) az (5) egyenlet alapján kapjuk meg az adjungált modell futtatásának segítségével. A gradienst perturbációvá alakíthatjuk, amelyből aztán megállapíthatjuk, hogy melyik az a tartomány a kezdeti időpontban, ahol a perturbációk a legnagyobb hatást gyakorolnak a J diagnosztikai függvényre.

A fenti vizsgálatot célzott megfigyelések alkalmazására lehet használni (*Baker és Daley, 2000*). Tegyük fel, hogy a modellt t_0 időpontban indítottuk, és a t_2 időpontra egy bizonytalan vagy különösen veszélyes időjárási helyzetet jelez előre. Pontosítani szeretnénk az előrejelzésen, hogy meggyőződjünk, valóban bekövetkezik-e az esemény. Jelöljön t_1 egy, a jelenleginél későbbi, de t_2 -nél korábbi időpontot. Erre vonatkozóan az érzékenységvizsgálat segítségével megállapíthatjuk, hogy melyik lesz az integrálási tartománynak az a része t_1 -ben, amelyre a legérzékenyebb a végállapot. Hogy pontosítsunk az előrejelzésen, célzott megfigyeléseket helyezünk el ezen a tartományon, majd új analízist készítünk a többlet megfigyelés figyelembevételével.

Összefoglalás

A cikkben áttekintettük néhány, az ALADIN modell segítségével elvégezhető alkalmazást, amely a rövidtávú előrejelzést szolgálja. Az OMSZ-ban operatív módon futtatjuk a korlátos tartományú determinisztikus és ensemble előrejelzéseket, amelyek az előrejelző szakemberek számára nyújtanak segítséget a rövidtávú prognózis elkészítésében. Ugyanakkor az operatív futtatást felhasználjuk más numerikus modellek (például légszennyezettség terjedést számító modell, felszíni modell) „meghajtására” is, légköri kényszereket szolgáltatva azoknak. Végül láttuk, hogy a modell egy speciális beállítással pontosítani lehet a felszínközeli szél előrejelzését, amelyet elsősorban szélerőművek számára szolgáltatunk.

A fent említett jelenlegi operatív alkalmazásokon kívül az ALADIN modellt egyéb célokra is felhasználhatjuk. Az adatasszimilációs eljárásának egy speciális beállításával olyan diagnosztikai analízist állíthatunk elő, amely segítségünkre lehet, hogy időben előrejelzzük egy esetleges veszélyes időjárási jelenség bekövetkeztét. Az ALADIN nem-hidrosztatikus verziójával (AROME modell) ultrarövidtávú előrejelzést készíthetünk, amely a diagnosztikai analízisnél pontosabb előrejelzést ad.

Végül érdekességként bemutattunk, hogy az ALADIN modell használatával érzékenységvizsgálatot hajthatunk végre, amelynek segítségével lehetőség nyílik célzott megfigyelések alkalmazására annak érdekében, hogy pontosítsuk a kezdeti feltételeket, és ezáltal pontosabb előrejelzést kapjunk.

Irodalomjegyzék

- Baker, N.L. and Daley, R., 2000: Observation and background adjoint sensitivity in the adaptive observation-targeting problem, *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 126, 1431–1454.
- Brozkova, R., 2008: ALARO physics; development of 3MT, *EWGLAM meeting, Madrid*
http://srnwp.met.hu/Annual_Meetings/2008/download/oct7/afternoon/ALARO_3MT_EWGLAM_brozkova.pdf
- Cuxart, J., Bougeault, P. and Redelsperger, J.L., 2000: A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations, *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 126, 1–30.
- Horányi, A., Kertész, S., Kullmann, L. and Radnóti, G., 2006: The ARPEGE/ALADIN mesoscale numerical modeling system and its application at the Hungarian meteorological Service, *Időjárás* 110(3–4), 203–227.
- Horányi A. and Jerman J., 2001: Canari-Diagpack. ALATNET Seminar on Data Assimilation, Gourdon/France
<http://www.cnrm.meteo.fr/gmapdoc/meshtml/JJ/siframes.html>
- Kain, J.S., and Fritsch, J.M., 1990: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterizations, *J. Atmos. Sci.* 47, 2784–2802.
- Lafore, J.P., Stein, J., Asencio, N., Bougeault, P., Ducrocq, V., Duron, J., Fischer, C., Hereil, P., Mascart, P., Pinty, J.P., Redelsperger, J.L., Richard, E. and Vil-Guerau de Arellano, J., 1998: The Meso-NH Atmospheric Simulation System, I, Adiabatic formulation and control simulations, *Ann. Geophys.* 16, 90–109.
- Masson, V., 2000: A Physically-Based Scheme for the Urban Energy Budget in Atmospheric Models, *Boundary Layer Meteorology*, 94, 357–397.
- Mikkelsen, T., Thykier-Nielsen, S., Astrup, P., Santabarbara, J.M., Sorensen, J.H., Rasmussen, A., Robertson, L., Ullerstig, A., Deme, S., Martens, R., Bartzis, J. G. and Pasler-Sauer, J., 1997: MET-RODOS: A comprehensive atmospheric dispersion module, *Radiation Protection Dosimetry* 73, 45–56.
- Noilhan, J. and Planton, S., 1989: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models, *Mon. Wea. Rev.* 117, 536–549.
- Pinty, J.-P. and Jabouille, P., 1998: A mixed-phase cloud parameterization for use in mesoscale non-hydrostatic model: simulations of a squall line and of orographic precipitations, *Proceedings of Conf. of Cloud Physics, Everett, Washington, (USA), Amer. Meteor. Soc.*, 217–220.

- Seity, J., Malardel, S. and Hello, G., 2005: The AROME prototype: Technical documentation, CY29T2.
http://www.cnrm.meteo.fr/aladin/aladin2/prototypeAROME_29t2.pdf
- Soci, C., Horányi, A. and Fischer, C., 2003: Preliminary results of high resolution sensitivity studies using the adjoint of the ALADIN mesoscale numerical weather prediction model, *Időjárás*, 107, 49–65.
- Steib R., 2003: Kezdeti feltételekre vonatkozó mezoskálájú érzékenységvizsgálatok az ALADIN modell adjungált változatának segítségével, *Diplomamunka, ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék*.
- Žagar, M. and Rakovec, J., 1999: Small-scale surface wind prediction using dynamic adaptation, *Tellus 51A*, 489–504.

Veszélyes időjárási jelenségek előrejelzése (NOWCASTING)

**Horváth Ákos¹, Geresdi István², Németh Péter¹,
Ács Ferenc³ és Seres András Tamás⁴**

¹Országos Meteorológiai Szolgálat, Siófoki Viharjelző Observatórium
8600 Siófok, Vitorlás u. 27., e-mail: horvath.a@met.hu

²Pécsi Tudományegyetem, Környezettudományi Intézet, Talajtani és Klimatológiai Tanszék
7626 Pécs, Ifjúság útja 6., e-mail: geresdi@gamma.ttk.pte.hu

³ELTE TTK, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest,
Pázmány Péter sétány 1/A., e-mail: acs@elte.hu

⁴Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálat, Budapest

Összefoglaló – Az ultrarövidtávú előrejelzés (NOWCASTING) feladata, hogy a következő néhány órára előre, adott földrajzi helyre pontosan megmondja, hogy milyen lesz az időjárás, kell-e számítani valamilyen veszélyes légköri jelenség kialakulására. A meteorológia felelősége ezen a téren a legnagyobb; egy sikertelen előrejelzés, vagy elmaradt riasztás milliós veszteséget vagy akár emberéleteket is követelhet. A veszélyes légköri jelenségek legtöbbször a legbizonytalanabb időjárási helyzetekben jelennek meg, ezért előrejelzésükben meghatározó szerepe van a minél nagyobb térbeli és időbeli felbontású méréseknek és a mérésekből gyors feldolgozással készített előrejelzéseknek, az ún. lineáris módszereknek. A lineáris módszerek feladata a veszélyes légköri objektumok feltérképezése és áthelyeződésük kiszámítása, majd ezekből előrejelzések készítése.

A veszélyes légköri objektumokat, mindenek előtt a konvektív rendszereket a gyors fejlődés és áthelyeződés jellemzi; leírásukhoz a nem lineáris, dinamikai alapú modellek alkalmazására is szükség van. Az ilyen célra használt nagy felbontású, nem-hidrosztatikus és fejlett felhőfizikával rendelkező eljárások rendkívül számításgényesek, ráadásul különleges asszimilációs technikát igényel a markáns légköri objektumok modellbe történő „bevitele”. A numerikus modellek sokszor alkalmasabbak a 4–6 óránál távolabbi, mint a következő 0–3 órára történő előrejelzésre. A NOWCASTING technikák egyik fő feladata, hogy a lineáris és a dinamikai közelítést összhangba hozza. A veszélyes időjárást okozó légköri objektumok között meghatározók a konvektív folyamatok.

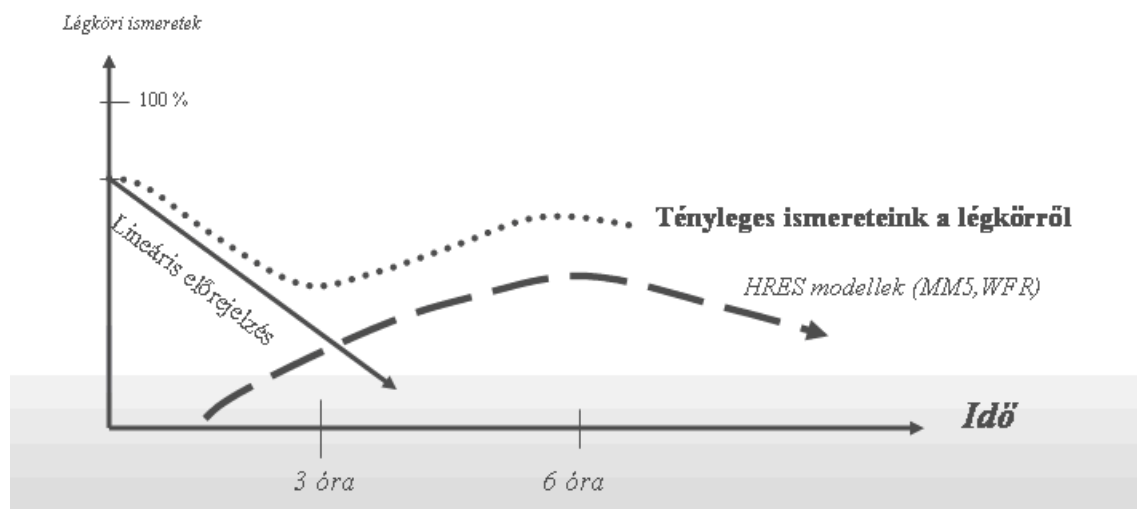
Az elmúlt években a Jedlik Ányos Pályázat során sikerült feltérképezni a hirtelen lefolyású árvizeket okozó zivatar rendszerek (zivatar vonalak) szerkezetét, a pusztító szélviharokat okozó rendszerek (squall line-ok) szerkezetét, illetve az MM5 numerikus modell segítségével sikerült modelleznünk mezo-ciklonális folyamatokat, szupercellákat. A pályázati munka során továbbfejlesztettük a fenti objektumok felismerését és előrejelzését szolgáló objektív eljárásokat, amelyek a jövőben a hazai ultrarövidtávú előrejelzést szolgálhatják.

A veszélyjelző rendszer elvi alapjai

Az ultrarövidtávú veszélyjelző vagy nowcasting rendszereknek 1–3 órára előre riasztást, 3–12 órára előre pedig figyelmeztetést kell kiadnia. A probléma megoldása során a légköri folyamatok nem lineáris voltából adódó problémával, az ún. „nowcasting szakadékkal” szembesülünk. Tegyük fel, hogy a fejlett mérési és megfigyelési technika minden elemét felhasználva (automata nagy felbontású mérőhálózat, műhold, radar, windprofiler rendszerek, stb.) megfelelő objektív analízis technikával képet tudunk alkotni a légkör pillanatnyi állapotáról. Ha több időpontban is rendelkezésünkre állnak objektív analízisek, akkor azok összehasonlításával egyfajta lineáris előrejelzést készíthetünk. A lineáris előrejelzések alapja, hogy meghatározzuk a légköri folyamatok tendenciáit illetve analizáljuk a markáns időjárási objektumokat mint például a zivatar cellákat, vagy csapadék rendszereket. Az ilyen típusú eljárásoknak legfőbb előnyük, hogy

jórészt közvetlenül a megfigyelésekre és mérésekre támaszkodnak, nincs szükség az állapothatározók simítására és inicializációra. Ugyancsak előny, hogy az ilyen eljárások nem kívánnak jelentősebb számítási kapacitást és gyorsan lefuttathatóak. A légköri folyamatok esetében azonban a lineáris közelítés legfeljebb 1–2 óráig alkalmazható, ezután az objektumok fejlődésének mértéke már meghaladja az advekciót illetve a lineáris közelítéssel leírt változásokat. Különösen igaz ez a gyorsan fejlődő konvektív rendszerekre, azaz a zivatarokra. A nem lineáris folyamatok leírása csak komplex hidrodinamikai modellekkel lehetséges. Itt a számítási igény jóval nagyobb, továbbá a modellnek is szüksége van arra, hogy felvegye a légköri folyamatok ritmusát (kitermelje a kezdeti értékekben nem szereplő vagy az inicializáció során kiszűrt légköri rendszereket), tehát a numerikus előrejelzések inkább csak az indítást követő 3–6 óra múlva alkalmasak mezoskálájú előrejelzések készítésére. Lesz tehát egy időszak, a 2–4 órás előrejelzési tartomány, amelyben a lineáris előrejelzések már nem, a hidrodinamikai előrejelzések pedig még nem tekinthetők pontosnak, és ezt az előrejelzési szakaszt nevezzük nowcasting szakadéknak (1. ábra).

A NOWCASTING szakadék



1. ábra. A nowcasting szakadék.

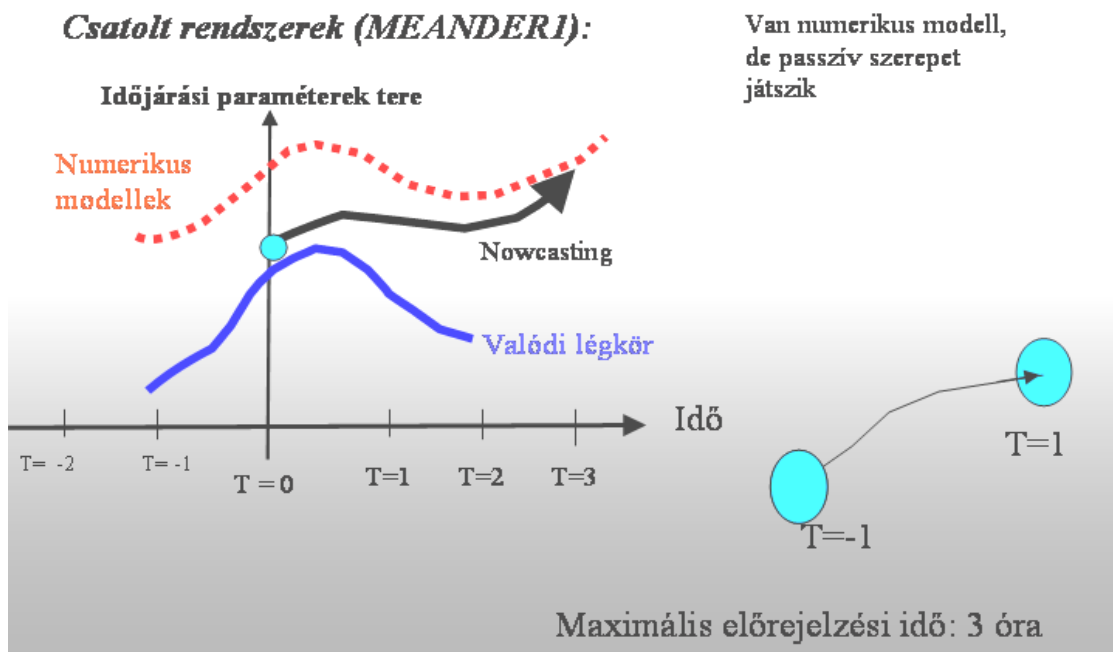
Az OMSZ által kifejlesztett nowcasting rendszer, a MEANDER feladata, hogy a nowcasting szakadék okozta nehézségeket áthidalva 1–3 órára előre olyan pontosságú előrejelzést készítsen, amely felhasználható valós idejű riasztások kiadására. A feladat megoldása több szegmensből tevődik össze.

Az első szegmens a légkördinamikai modell alkalmazása: egy olyan, fejlett légkörfizikai parametrizációval rendelkező, stabil dinamikájú numerikus modell, amely alkalmas a konvektív folyamatok leírására, azaz a nem hidrosztatikus konvektív folyamatok közvetlen kezelésére. Erre a célra az USA Légkörkutató Központjában kifejlesztett MM5 modellt alkalmaztuk.

A második szegmens a speciális lineáris előrejelzést készítő rendszer. Ez a rendszer valamennyi real-time mérés felhasználásával, valamint a numerikus modell analízis idejére vonatkozó előrejelzéséből, mint first guess mezőből objektív analízist készít. Az objektív analízis mezőiből több származtatott paramétert is meghatároz (például az ana-

lízis mező minden rácspontjára egy szinoptikus jelenidőt) és meghatározza a meteorológiai objektumok áthelyeződését leíró vektorteret. Mivel a lineáris előrejelzés érvényessége 1 órán túl már erősen csökken, ezért feltételezzük, hogy a +3 órás előrejelzés akkor a legjobb, ha azt a numerikus modelltől vesszük. Így az alapparaméterek a kezdeti időszakban az objektív analízis értékeivel lesznek egyenlők, majd fokozatosan simulnak a háttér modell által számított mezőhöz (2. ábra). A meteorológiai objektumok áthelyeződését leíró vektorokat az így kapott simuló paraméterekből számítjuk ki. A MEANDER rendszer meghatározza az időjárási objektumokat, amelyek legtöbbször a radar mérésekhez köthető csapadék rendszerek. Ezeket a mozgásvektorok segítségével advektálja és az előrejelzett időpontokban minden rácspontban újraszámolja a származtatott paramétereket, így például a rácspont időjárását leíró jelenidőt is.

A nowcasting rendszerek működési elve



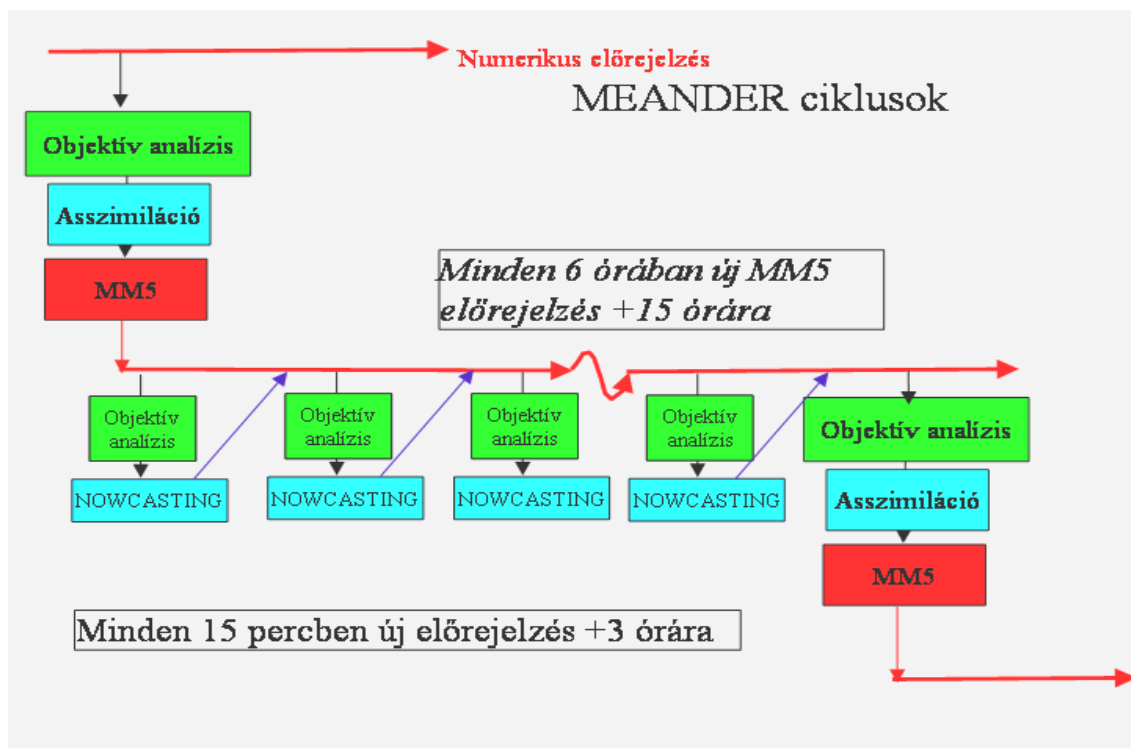
2. ábra. A nowcasting rendszer működési elve.

A veszélyjelző rendszer meteorológiai háttere

A nowcasting rendszer háttér információit biztosító numerikus modell az MM5 modell. A MEANDER rendszer kiszolgálására jelenleg az MM5 modell napi négy alkalommal fut: 00, 06, 12 és 18 UTC-kor. Az ECMWF modell analízisét és előrejelzéseit, továbbá a TEMP és SYNOP információkat használja fel a kezdeti és oldalsó peremfeltételek biztosítására. A modell által készített előrejelzési mezők felhasználhatóak az objektív analízis készítésénél a háttér adatok (first guess) biztosítására, továbbá a lineáris szegmens alap-paramétereinek a fentiek szerinti simítására.

A lineáris szegmens egyrészt elkészíti az objektív analízist egy nagy felbontású (1,5 km) rácsra. Ehhez felhasználja a radar mérések és műhold mérések eredményeit amelyeket az eltérő vetületről a rácsra interpolál. Az alapvető információkat a radar adatok biztosítják, azonban az MSG és a SAF-NOWCASTING információk felhasználásával verifikáljuk a radar méréseket: ahol nincs összhangban a radar és a műhold megfigyelés, ott módosítjuk a radar mezőt a gyakran jelentkező zajok kiszűrésére. Ugyancsak rácpontokra kerülnek a felszíni megfigyelések (QLC illetve SYNOP adatbázisból) és ezeket Cressman-asszimilációval összesimítjük az MM5 háttér adatokkal. (A numerikus modellek újabb generációjánál, a WRF modellnél 3d-var eljárást is alkalmazunk, egyelőre kísérleti jelleggel). Az így kapott alapparamétereket még módosítjuk a műhold-radar adatokkal úgy, hogy a radar által csapadékosnak tekintett területek termodinamikailag konzisztensek legyenek az asszimilált paraméterekkel.

Az alpparaméterek kiszámítása után következik a származtatott paraméterek számolása. Ez a paraméterek széles skáláját jelenti, egydimenziós felhőmodellek, turbulens modellek, légköroptikai modellek segítségével. Ilyen paraméter a látástávolság, a legnagyobb vertikális sebesség, a csapadék halmazállapot, jégméret, stb. Ugyancsak itt történik az áthelyeződés vektorok meghatározása. Két típusú áthelyeződés vektort lehet alkalmazni: a konvektív csapadékre és a sztratiform csapadékre. A kettő alkalmazását az adott objektum radar reflektivitás erőssége dönti el úgy, hogy 40 dBz fölött konvektívnek, 40 dBz alatt stratiformnak tekintjük a rendszert.



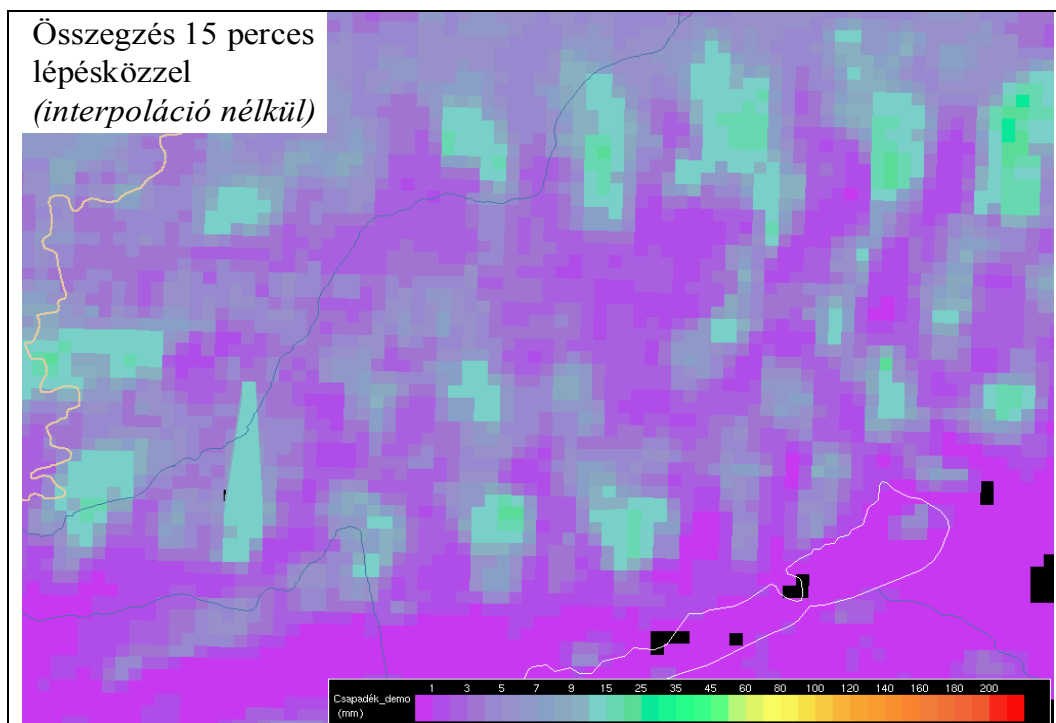
3. ábra. A nowcasting rendszer működésének folyamatábrája.

Az áthelyeződési vektorok ismeretében végrehajthatjuk az objektumok advekciónját 3 órára előre, majd minden egyes időlépcsőben (amely a gyakorlatban

15 perc) újraszámoljuk az előrejelzett alapparamétereiből a származtatott paramétereket illetve a jelenidő paraméterét. A rendszer folyamatát a 3. ábra mutatja.

Konvektív csapadékbecslés radar mérésekkel

A nowcasting egyik legfontosabb feladata a lehullott csapadék becslése és az ehhez kapcsolódó gyors lefolyású árvizek előrejelzése. Az alábbiakban az OMSZ-ban kifejlesztett radar mérésekre alapuló eljárást részletesebben is bemutatjuk.



4. ábra. Radarból számolt órás csapadékösszeg 15 perces lépésközzel.

Az elsődleges radar információkból, azaz a hidrometeorok radarhullám visszaverő képességét jellemző ún. *reflektivitási tényező*ből csupán a pillanatnyi csapadék intenzitásra következtethetünk (mm/h). A hosszabb időintervallum alatt (pl.: 1, 3, 6, 12, 24 óra alatt) lehullott csapadék mennyiségére (mm) a csapadék intenzitás időbeli összegzésével, integrálásával juthatunk. A radar mérések természetéből adódóan az intenzitás értékek csak diszkrét időpontokban, a hazai gyakorlatban 15 percenként, állnak rendelkezésre. Az intenzitás numerikus összegzése a diszkretizációból eredően, szükségképpen bizonyos hibával terhelt. A hiba nagysága nagymértékben függ a csapadérendszer: (i) időbeli fejlődésének ütemétől, (ii) térbeli tagoltságától, valamint (iii) térbeli mozgásának sebességétől. Különösen nagy összegzési hibák adódhatnak az olyan, gyorsan mozgó konvektív rendszerek esetében, amelyeknél a csapadék celláknak a diszkretizációs időlépcső alatt történő térbeli elmozdulása, áthelyeződése meghaladja a cellák karakterisztikus átmérőjét. A „hiba” a csapadékösszeg mezőnek fizikailag teljesen indokolatlan és valótlan „bordázott” térszerkezetében nyilvánul meg (4. ábra). Az említett hiba eliminálásának, vagy legalábbis jelentős mértékű csökkentésének egyik

lehetséges módja az, hogy az összegzés során először meghatározzuk a csapadékrendszer áthelyeződési sebességét, majd ez alapján, kvázi-Lagrange megközelítést alkalmazva, figyelembe vesszük az áthelyeződő rendszernek a diszkretizációs időlépcső alatt történő időbeli megváltozását.

A csapadékrendszer áthelyeződési vektorterének meghatározása

Az áthelyeződési vektortér meghatározási módszerét az OMSZ radarhálózata által 15 percenként produkált, országos kompozit radarképekre dolgoztuk ki. A téglalap alakú kompozit radarkép 250 x 400 db, 2 x 2 km²-es elemi területre (radarpixelre) vonatkozóan tartalmazza a radar mérések elsődleges eredményét, az ún. reflektivitási tényezőt, dBZ egységben.

A vektortér előállítása korrelációs technikával történik, amelynek során két, egymást követő radarképet használunk (T1, T2). Keressük azt az áthelyeződési vektorteret, amellyel a T1 képet a térben áthelyezve, az áthelyezett (T1') kép a T2 képpel maximális korrelációt mutat.

A radarképeket 24 x 41 db, 18 x 18 km²-es (9 x 9 pixel), négyzet alakú részképre, ún. „alapnégyzetre” bontjuk. Minden egyes alapnégyzetre külön-külön, „saját” áthelyeződési vektort határozzunk meg, amelyet formálisan a négyzet középpontjához rendelünk hozzá. Így tehát, az alapnégyzet oldalhosszúsága (18 km) adja meg a vektortér fizikai térbeli felbontását.

Egy a T2 képen kijelölt (rögzített) alapnégyzethez tartozó vektort első lépésben úgy határozzuk meg, hogy a T1 képen az alapnégyzettel azonos méretű, ún. kereső négyzetet mozgatunk. A mozgatás pixel méretű lépésekkel történik, mind észak-déli, mind pedig kelet-nyugati irányban. A kereső négyzet középpontja 62 x 62 km² (31 x 31 pixel) nagyságú területet fésül át. A kereső négyzet minden egyes pozíciójához kiszámítjuk a T1 radarképre mutató kereső négyzet területén, illetve a T2 radarképre mutató alapnégyzet területén található reflektivitás értékek közötti korreláció értékét. A legnagyobb korrelációt adó keresőnégyzetnek az alapnégyzethez viszonyított relatív pozíciója adja az áthelyeződési vektornak az *egyik* becsült értékét.

A korrelációs eljárás, minthogy nem közvetlen fizikai összefüggéseket alkalmaz, nem ad *garantáltan* helyes eredményt, hanem esetenként tetszőlegesen nagy hibát produkálhat. A hibák elkerülése érdekében két szinten megvalósított szűréssel élünk. A szűrés első szintjét még magába a korreláció-maximum keresés folyamatába építettük be. Az elgondolás lényege az, hogy a korreláció-maximum keresését három különböző területű (*léptékű*) kereső négyzettel valósítjuk meg, majd a kapott három áthelyeződési vektort összehasonlítjuk. Ha legalább két vektor vektori különbsége egy általunk előírt küszöb értéket nem halad meg, akkor a két – *vagy ha a küszöb feltétel mind a három vektor-pár kombinációra teljesül, akkor mind a három* – vektor alkalmasan súlyozott átlaga lesz az alapnégyzetre meghatározott áthelyeződési vektor. Egyébként az alapnégyzethez „adathiányt” rendelünk.

Az első, legkisebb térskála a fent bemutatott, egy alapnégyzetnyi területtel való keresés. A második lépték esetében úgy járunk el, hogy a kijelölt alapnégyzet körül, a kijelölt alapnégyzetet középen tartalmazó, 3 x 3 db alapnégyzetet magában foglaló *nagy négyzetet* veszünk fel a T2 radarképen. A T1 képen úgyszintén 3 x 3 alapnégyzetnyi *nagy kereső négyzetet* mozgatunk. A már említettekhez hasonló módon: a maximális korrelációt adó nagy kereső négyzet relatív pozíciója adja az áthelyeződési vektor *má-*

sodik becslését. A *harmadik vektor* előállításához pedig még nagyobb, 5 x 5 alpnégyzetnyi területekkel operálunk.

Mindegyik léptéken történő számításra igaz, hogy (i) csak azokat a pixel-párokat vonjuk be a korrelációs számításba, amelyeknél legalább az egyik pixel reflektivitása eléri a 7 dBZ-t; (ii) az esetszámra léptéktől függő alsó limitet alkalmazunk.

A fenti összetett eljárás eredményeképpen általában az alpnégyzeteknek csak egy részére kapunk áthelyeződési vektort, a többire pedig nem. A vektorok száma alapvetően a csapadékrendszer kiterjedésétől, a csapadékkal fedett összterület nagyságától függ.

A hibaszűrés második szintje az áthelyeződési vektorok térbeli és időbeli konzisztenciájának ellenőrzésén alapul. Az alkalmazott módszer a windprofiler technikában kiterjedten használt, ún. „konszenzus” módszer adaptációja. Ennek alap gondolata az, hogy egy alpnégyzet áthelyeződési vektorát akkor fogadjuk el érvényesnek, ha a vektor a térbeli és időbeli környezetében lévő többi áthelyeződési vektor többségétől (több mint felétől) adott küszöbértéknél kisebb mértékben tér el. Az általunk figyelembe vett térbeli környezet: 5x5 alpnégyzet; az időbeli környezet pedig: a megelőző két időlépcsőben meghatározott (konszenzus) szüretlen vektorok, 5x5-ös térkörnyezetben.

A konszenzus szűrőn átment „*valódi*” vektorok alapján, a vektorral nem rendelkező alpnégyzetek mindegyikére, a valódi vektorok távolságával exponenciálisan csökkenő súlyozással, „*extrapolált*” áthelyeződési vektort állítunk elő. Ez a művelet abból a törekvésünkből következik, amely szerint a radarkép teljes egészére, azaz végeredményben minden pixelére kiterjedően szeretnénk áthelyeződést számítani. A valódi vektoroktól esetlegesen túl nagy távolságra lévő extrapolált vektorok esetében joggal vetődhet fel a kérdés, hogy az extrapoláció elfogadható-e? Felfogásunk szerint, ha egy extrapolált vektor közelében nincs valódi vektor, akkor vélhetően az extrapolált vektor közelében/környezetében nincs szignifikáns méretű csapadékos terület – *mert ha lenne, akkor az produkálna egy valódi vektort az extrapolált vektor közelében*. Más szavakkal: lehet, hogy a nagy távolságra extrapolált áthelyeződési vektor hibás, de ott valószínűleg nincs is mit áthelyezni. Az extrapolált vektorokra a csapadékszónák peremterületeinél van érdemben szükség, mert ott a korrelációs eljárás nem minden esetben szolgáltat valódi vektort, viszont a kis távolságra történő extrapoláció még reális eredményeket nyújt, amelyekkel a peremterületek áthelyeződése elfogadható módon számítható.

Az alpnégyzetek középpontjaiból álló négyzetrács minden pontjában van tehát valódi, vagy extrapolált áthelyeződési vektor. A rács négyzeteinek minden egyes belső pixelére áthelyeződési vektort interpolálunk, a csúcsponti értékekből lineárisan. Így végeredményül – az alpnégyzetek rendszerével lefedett területre – radarpixel felbontásban folytonos áthelyeződési vektormezőhöz jutunk.

Az alpnégyzetek hálózatát (24 x 41 db) úgy definiáltuk, hogy a körülöttük mozgatott kereső négyzetek minden kereső pozícióban a kompozit radarkép (250 x 400 pixel) belsejében maradjanak; következésképpen az alpnégyzetek hálózata nem fedi le a teljes kompozit radarképet, a kép szélein 17 pixel széles, lefedetlen „csíkok” maradtak. A teljesség érdekében a szélek pixeleit feltöltjük a legközelebb eső, vektorral rendelkező pixel értékével.

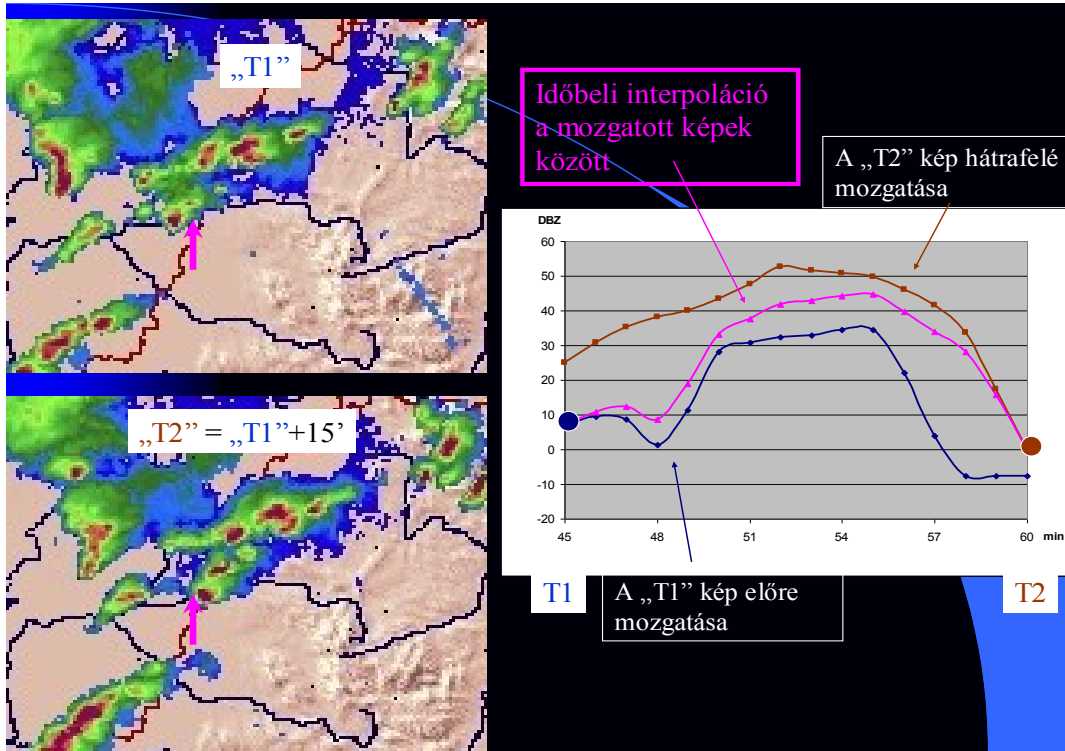
Interpolált radarképek előállítása

Két egymás után mért radarkép között időben interpolált radarképeket konstruálunk az áthelyeződési vektortér segítségével. Az alkalmazott eljárást az 5. ábra segítségével mutatjuk be. Az ábra bal felső részén egy nyugatról kelet felé mozgó csapadék rendszernek a T1 időpontban mért radarképét látjuk. Az ábra bal alsó része pedig a 15 perccel később, T2 időpontban mért radarképet mutatja. Mind a két képen a lila nyilak, egy a demonstráció számára kiválasztott radarpixelre mutatnak. A „T1” képen a pixeltől nyugatra egy nagy reflektivitású cellát látunk. A „T2” képen a cella a vizsgált pixeltől már keletre található. A T1, T2 mérési időpontok között a cella áthaladt a pixel fölött. Célunk az, hogy reprodukáljuk a pixel fölött a reflektivitás időbeli menetét a (T1, T2) időintervallumban. Ennek érdekében a következőképpen járunk el: (i) a pixelre meghatározott áthelyeződési vektorral előre mozgatjuk a „T1” képet, (*kék görbe az 1. ábra grafikonján*), illetve (ii) hátra felé mozgatjuk a „T2” képet (*barna görbe*). A két görbe nem feltétlenül fedi egymást, ami a csapadékrendszer (cella) időbeli fejlődésének megnyilvánulása. A „T1” kép mozgatásával nyert görbe mérésből származó, „pontos” értékkel kezdődik a T1 időpontban. A T1 időponttól távolodva megbízhatósága egyre csökken. A „T2” kép mozgatásával nyert görbe viszont a T2 időpontban tartalmaz mérésből származó „pontos” értéket, amelynek megbízhatósága a T1 időpont felé haladva csökken. Időbeli interpolációs sémánk lényege az, hogy (iii) a T1-beli pontos értékből a T2-beli pontos értékbe történő időbeli átmenetet a két féle mozgatásból származó görbék közötti időarányos, lineáris interpolációval közelítjük (*lila görbe*). Fontos, hogy ezzel az eljárással az időbeli fejlődést a rendszerrel együtt mozgó koordináta-rendszerben írjuk le.

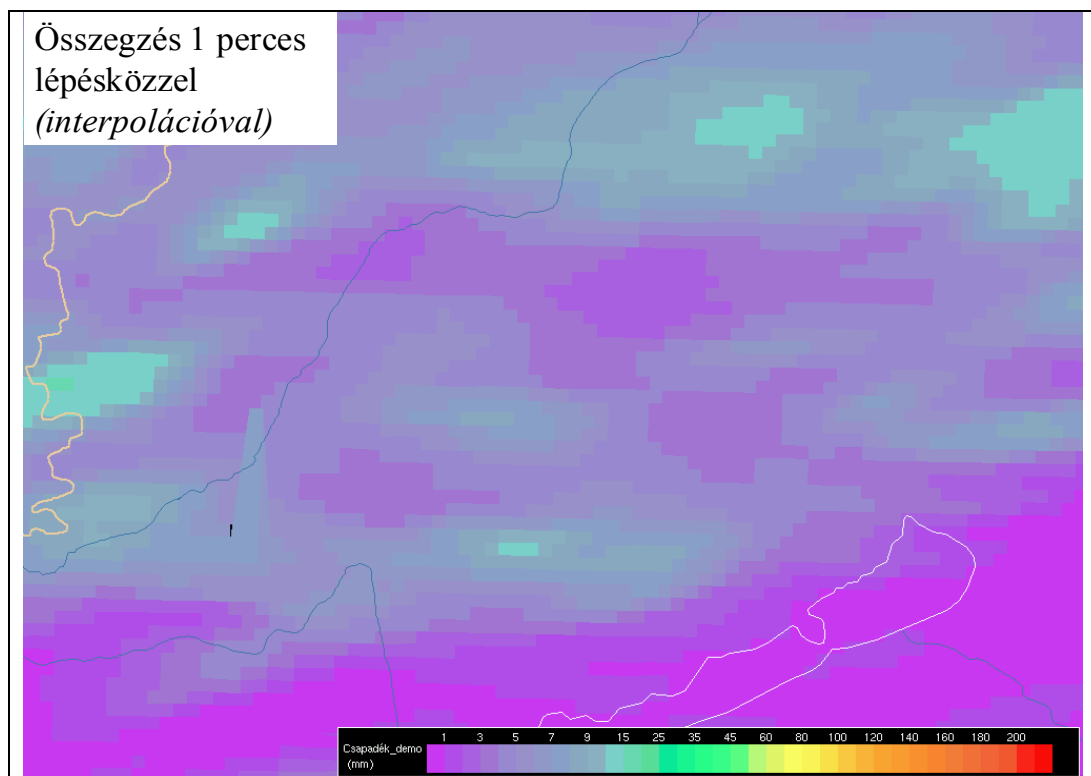
A bemutatott módon, a (T1, T2) időintervallumra vonatkozóan, minden egyes radarpixelre megszerkeszthetjük a reflektivitás interpolált időbeli menetét – elvileg tetszőlegesen finom időbeli felbontással. (Tapasztalatunk szerint azonban, adott radarpixel méret mellett (2 km), 1 percnél finomabb lépésközre a gyakorlatban nincs szükség.) *Végeredményben tehát a 15 percenkénti radar mérések között interpolált radarképeket konstruálunk, amely konstrukció során a csapadék rendszernek mind a térbeli áthelyeződését, mind pedig – lineáris közelítésben – az időbeli fejlődését figyelembe vesszük.*

Eredmények

Az interpolált radarképek felhasználása a csapadékösszeg képzésében látványos javulást hozott. A 4. ábra egy gyorsan mozgó, konvektív rendszer a 24 órás csapadékösszeg térképét mutatja a Dunántúl egy részére, hagyományos – azaz interpolációt nem alkalmazó – 15 perces lépésközzel történő összegzés alapján. Különösen a kép felső részén megfigyelhető, erőteljes bordázott térszerkezet annak következménye, hogy ott, egy kb. 10–15 km átmérőjű intenzív csapadékot adó cella haladt keleti irányba mintegy 80 km/h sebességgel. Ami azt jelenti, hogy 15 perc alatt kb. 20 km-t, azaz átmérőjének csaknem kétszeresét tette meg. A hagyományos összegzés pillanatfelvételszerűen jeleníti meg a cella 15 percenkénti helyzetét, miközben a köztes területekre irreálisan kevés csapadékot ad.



5. ábra. Radarképek interpolációja (részletes magyarázat a szövegben).



6. ábra. Radar mérésekből számolt órás csapadékösszeg 1 perces lépésközzel.

Az 1 perces lépésközzel előállított interpolált radarképek alapján történő összegzés viszont (6. ábra) fizikailag reális, folyamatos csapadékeloszlást produkál. Az összegzést egyébként több, különböző lépésközzel (1, 2, 3, 5 perc) is elvégeztük. A két percnél nagyobb lépésköz alkalmazása esetén a bordázottság még megfigyelhető volt. Gyakorlati alkalmazásra ezért az 1 perces lépésközzel történő interpolációt, illetve összegzést javasoljuk.

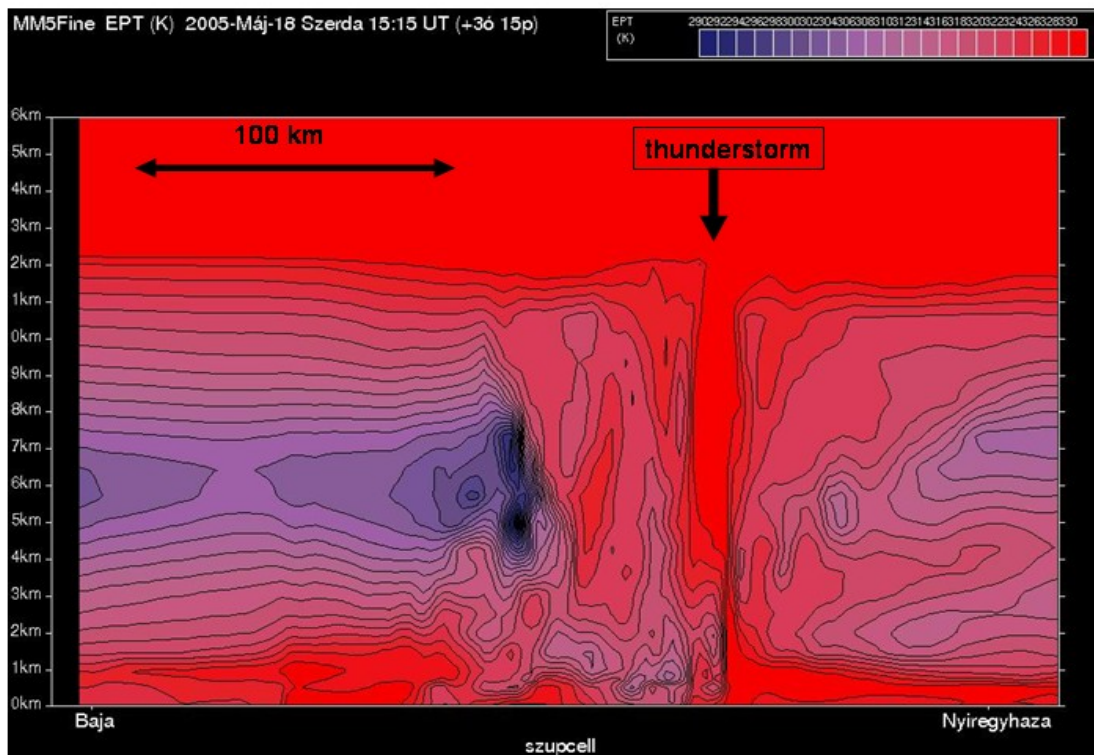
Tesztelés

A módszer kritikus pontja az áthelyeződési vektortérnek az alapnégyzet-hálózatra történő számítása kapcsán alkalmazott hibaszűrési eljárások hatékonysága. A 2007. 04. 26. – 08. 31. időszakra előállítottuk az alapnégyzeti vektorokat minden egyes 15 perces időintervallumra. Vizuális módon ellenőriztük a vektorterek térbeli és időbeli konzisztenciáját, folytonosságát. A vektorterek kevesebb, mint 1 százalékánál találtunk hibás vektor(oka)t, szinte minden esetben a kompozit radarkép széleinek közelében. Ez arra utal, hogy a későbbiekben szigorítanunk kell a peremterületeken a hibaszűrést.

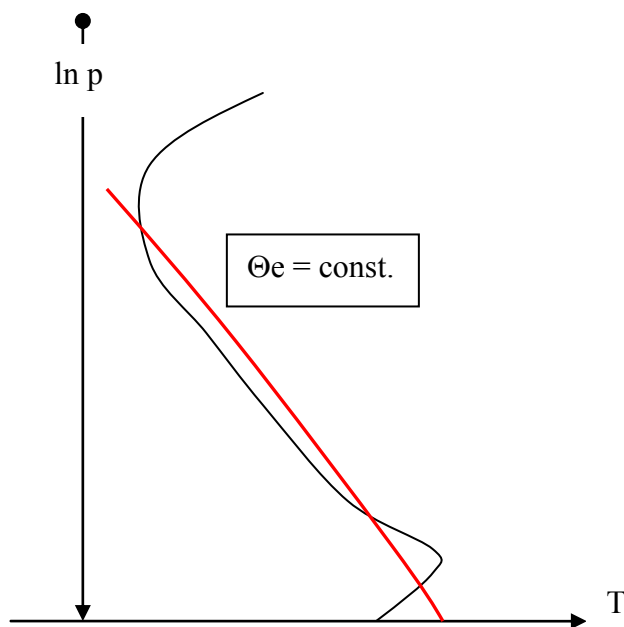
Radar mérések asszimilációja a numerikus modellekbe, a konvektív rendszerek követésére

A zivatarok térbeli eloszlását a radar mérések felhasználásával lehet legjobban követni. A fentiekben láthattuk, hogy a zivatarok áthelyeződését lineárisan is előrejelezhetjük a mozgásvektorok segítségével. Megjegyezzük azonban, hogy a konvektív rendszerek gyors fejlődése és leépülése miatt az ilyen jellegű prognózisok ritkán használhatóak 1–2 óránál tovább. A dinamikai alapú modellek esetén (esetünkben az MM5 modellnél) nagyon határozottan ki kell emelnünk a konvektív rendszereket a kezdeti feltételekben, hogy a modell valóban ott és akkor szimulálja a jelenséget, ahol az a valóságban is megjelenik. Erre a célra dolgoztuk ki a konvektív behatási módszert, amelynek lényege, hogy a numerikus modellek kezdeti mezőiben erős anomáliákat teszünk oda, ahol a radar mérések alapján a zivatarok kialakultak. Az ilyen trigger hatásoktól azt várjuk, hogy a modell gyorsan „kitermeli” a zivatart és annak fejlődése, áthelyeződése immár dinamikai alapon előrejelezhető. Az alábbiakban ezt a módszert ismertetjük röviden.

A konvektív behatási módszer lényege, hogy léteznek olyan állapothatározók, amelyek a konvektív folyamatokra nézve konzervatív mennyiségek. Ilyen az ekvivalens potenciális hőmérséklet (\square_e). Ha a numerikus modell mezőjében erős zivatarok jelennek meg, akkor a \square_e mező vertikális metszetében jól láthatóvá válik a zivatar, ahol az ekvivalens potenciális hőmérséklet vertikális irányban nem, vagy csak alig változik (7. ábra). Ezt kihasználva megkeressük azokat a területeket, ahol a radar mérések alapján erős zivatarok vannak és ott kiszámoljuk az alsó 1000 m átlagos ekvivalens potenciális hőmérsékletét. Az így kapott értéket vertikális profil szerint konstansnak véve, továbbá a zivatarban a légoszlop nedvességét telítettnek feltételezve könnyen visszszámolhatunk egy új, $T(p)$ profilt, amely a zivatar belsejére jellemző és eltér a környezet hőmérsékletétől (8. ábra).



7. ábra. Az ekvivalens potenciális hőmérséklet vertikális metszete az MM5 modellben.



8. ábra. A konstans ekvivalens potenciális hőmérséklettel számított profil (piros vonal) és az eredeti légkör profilja (fekete vonal).

Az így kapott profilok egyfajta meleg nedves légbuborékokként jelennek meg az objektív analízisben lehetővé téve a modellnek, hogy mint egy kiváltó (trigger) hatást figyelembe véve a megfelelő helyen és a megfelelő időben szimulálja a zivatarokat. Természetesen figyelembe kell venni, hogy az ilyen meglehetősen durva behatások eredményeként gyakran nem kívánatos hullámok jelennek meg a modellben amelyeket kezelni kell.

A konvektív behatási módszer alkalmazási területe elsősorban a nowcasting. Az időben sűrűn előálló objektív analízisek és radar mérések segítségével készült perturbált mezőket bevihetjük a numerikus modellbe például analízis nudging felhasználásával és a modellszámítások már légkördinamikai alapon adhatnak előrejelzést a heves zivatarok vonulására, fejlődésére.

A veszélyjelző rendszer számítástechnikai megvalósítása

A veszélyjelző rendszer (MM5 és MEANDER) az OMSZ ALTX-3700b számítógépén működik. A multiprocesszes képességek kihasználásához törekedtünk arra, hogy amelyek programoknál ez lehetséges volt, a párhuzamosított programozási technikát valósítsuk meg, amelyhez az MPI (Message Passing Interface) eszközrendszerét alkalmaztuk, amivel a számítás időt akár két nagyságrenddel is csökkenteni tudtuk. Az input/output állományokat lehetőleg netCDF formátumban kezeljük. Az MM5 program napi négy alkalommal fut, a MEANDER rendszer pedig minden órában.

Az MM5 rendszer lépései az alábbiak:

- ECMWF transzformáció MM5 Lambert-térképvetületi koordináta-rendszerbe.
- Megfigyelések és az ECMWF asszimilációja.
- Radar adatok asszimilációja.
- Input adatok modell sigma-rendszerbe transzformálása és az inicializáció elvégzése – a légoszlop szerinti integrált divergencia eltüntetése.
- Modell futtatás (időbeli integrálás).
- Modell vetületből szférikus és nyomási vetületbe történő visszatranszformálás.
- Az adatok hozzáférhetővé tétele a MEANDER rendszer számára.

Az MM5 előrejelzés futási ideje +36 órára 300 x 250 horizontális és 32 vertikális szintre 90 processzoron kb. 1,5 óra gépidőt kíván.

A MEANDER rendszer lépései az alábbiak:

- MM5 előrejelzett mezők és felszíni megfigyelések asszimilációja.
- Radar és műhold adatok rácspontokra transzformálása és konzisztenssé tétele.
- Származtatott paraméterek számolása.
- Analízis: a jelen idő számítása.
- Analízis és MM5 előrejelzett alap paraméterek simítása +3 órára előre.
- Áthelyeződés vektorok számítása.
- Meteorológiai objektumok (csapadékrendszerek) advekcója.
- Előrejelzett származtatott paraméterek számítása.
- Riasztó-szegmensek futtatása.

A MEANDER-MM5 rendszer időjárási veszélyjelzései és azok gyakorlati felhasználása.

A veszélyjelző rendszer outputjai segítségével viszonylag egyszerűen generálhatunk riasztásokat, figyelmeztető jelzéseket adott helyre és adott időre. A legegyszerűbb módszer, ha a veszélyesnek ítélt paraméter értékhatárait megadjuk és ez alapján készítünk riasztást (pl. a hőmérséklet vagy a szél értéke egy adott rácsponton eléri-e a kritikus határt, vagy a jelenidő paramétere felvesz-e bizonyos értékeket, stb.). Ugyancsak lehetőség van területek, pl. magyarországi régiók kijelölésére és azok figyelésére.

A rendszerhez tetszőleges olyan szegmens kapcsolható, amelynek a bemenő adatai meteorológiai paraméterek, így a hidrológiai szegmens alkalmas arra, hogy megvizsgáljuk, okozhatnak-e hirtelen árvizeket a meteorológiai paraméterek egy meghatározott területeken.

A rendszer felhasználói mindenek előtt a riasztással foglalkozó meteorológusok, de az adatokat már jelenleg is használják az útfenntartó szervezetek és a katasztrófa elhárító szervek.

Összefoglalás

Az elmúlt négy év intenzív fejlesztéseinek köszönhetően az Országos Meteorológiai Szolgálatnál operatívan működik egy veszélyes időjárást előrejelző és riasztó rendszer. A rendszer a megfigyelések, mérések és ECMWF analízisek felhasználásával ultrarövidtávú előrejelzéseket és riasztásokat tud készíteni. A rendszer lineáris szegmense az advekción és a lineáris tendenciák felhasználásával készíti el az előrejelzéseket, amelyek az idő haladtával fokozatosan belesimulnak a nagy felbontású numerikus modellek mezőibe. Az így készített alapparaméterek felhasználásával számos származtatott mezőt lehet előállítani, lehetővé téve a legkülönbözőbb jelenségekre történő veszélyjelzések automatikus generálását. A kifejlesztett eljárások nem csak szűken vett meteorológiai alkalmazásokat jelentenek, de pl. a konvektív csapadékok becslése lehetővé teszi a hirtelen kitörő árvizek előrejelzését, azokra történő riasztásokat.

A fentiekben leírt fejlesztések az NKFP3-00022/2005 Jedlik Ányos pályázat támogatásával történtek.

Közép- és hosszútávú előrejelzési modell-produktumok és alkalmazási lehetőségeik

Ihász István

Országos Meteorológiai Szolgálat, Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztály
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1., e-mail: ihasz.i@met.hu

Összefoglaló – Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál a közép- és hosszútávú előrejelzések döntően az Európai Középtávú Előrejelző Központ (ECMWF = European Centre for Medium Range Weather Forecasts) modell produktumaira épülnek. A dolgozatban rövid áttekintést adunk az elmúlt öt évben történt ECMWF-beli és OMSZ-beli operatív célú fejlesztésekről. Ezen belül bemutatjuk az ensemble reforecast előrejelzések kalibrációs célú használatát célzó vizsgálatokat és azok eredményeit. Végül a legfrissebb havi és évszakos előrejelzések bemutatásán keresztül a hosszabb távú előrejelezhetőség kérdéseit tekintjük át.

Bevezetés

Az Európai Középtávú Előrejelző Központ (közismert angol rövidítése ECMWF = European Centre for Medium Range Weather Forecasts) 18 európai ország összefogásaként 1973-ban readingi (Nagy-Britannia) székhellyel alakult meg. Jelenleg Ausztria, Belgium, Dánia, Egyesült Királyság, Finnország, Franciaország, Görögország, Hollandia, Írország, Luxemburg, Németország, Norvégia, Olaszország, Portugália, Spanyolország, Svájc, Svédország és Törökország *teljes jogú tagja* a szervezetnek, a tagok száma várhatóan a következő években dinamikusan növekedni fog. Az ECMWF-hez ún. *együttműködő tagországgént* – időrendben – a 70-es évek végén Izland, majd a 90-es évek közepétől elsőként Magyarország, majd Horvátország, Szlovénia, a Cseh Köztársaság, Szerbia, Románia, Észtország, Litvánia, Marokkó, Montenegró, Szlovákia és Lettország csatlakozott.

ECMWF-beli és OMSZ-beli operatív célú fejlesztések 2004 és 2008 között

Az ECMWF harminc éves történetéről, benne magyar vonatkozásokkal *Woods* (2005) könyvében olvashatunk. Az ensemble előrejelzés elméleti háttéréről a 2002. évi Meteorológiai Tudományos Napokon *Götz* (2002) tartott színvonalas előadást, emellett *Götz* (2001) monográfiája ad komplett összefoglalót.

A legutóbbi hasonló témájú 2003-as Meteorológiai Tudományos Napokon bemutatott állapothoz (*Ihász*, 2003) képest az eltelt időszakban történt ECMWF-beli, s az ehhez kapcsolódó hazai fejlesztéseket az *I.* és a *II. táblázat* tartalmazza. A főbb eredményeket a következőképpen jellemezhetjük: 2006. február óta a determinisztikus modell horizontális térbeli felbontása 25 km, s a modell 91 vertikális szintet tartalmaz, az ensemble modell felbontása jelenleg 50 km-es és 62 vertikális szintet tartalmaz (*Untch et al.*, 2006). 2006. november végén került operatív bevezetésre az ún. VarEPS rendszer (VARIABLE Resolution Ensemble Prediction System – Változó felbontású ensemble előrejelzési rendszer). Az ensemble előrejelzés naponta kétszer már 15 napra készül, és csak a 10. napon változik a modell térbeli felbontása (*Buizza, et al.*, 2006).

	ECMWF	OMSZ EÉFO/NMO ECMWF projekt-beli fejlesztések	OMSZ EÉFO/NMO egyéb ECMWF vonatkozó fejlesztések
2004	Korai riasztó-rendszer (Early delivery system) (kb. 3,5–4 órás időelőny) évszakos előrejelzés rendszeres futtatása	Speciális produktumok: napfénytartam és globálsugárzás	HAWK-2 determinisztikus meteogram
2005	Havi előrejelzés rendszeres futtatása Háromóránkénti EPS diagramok előállítása +168 óráig	Pseudo TEMP További EPS fáklya típusok előállítása	OVYSIS web alapú objektív verifikációs rendszer
2006	Modell fejlesztés: Determinisztikus modell: T799L91 EPS modell T399L62 Naponkénti +48 óráig terjedő ismételt előrejelzés (reforecast) futtatás a kontroll modell alapján 30 éves időszakokra /1971–2000/ Modell fejlesztés: 15 napos ún. VarEPS modell	Havonkénti anomália térképek előállítása az évszakos előrejelzésből Egyesített 100 tagú fáklya	---

I. táblázat. A 2004 és 2006 közötti ECMWF- és OMSZ-beli operatív célú fejlesztések. (OMSZ EÉFO/NMO – OMSZ Előrejelzési és éghajlati Főosztály / Numerikus Modellezési Osztály.)

2007-ben került operatív bevezetésre az ECMWF System-3 évszakos előrejelzési modell. 2008. márciusától kezdve a 15 napos VarEPS előrejelzési rendszer hetente egyszer (csütörtökönként) – a 15. napon térbeli felbontás változással – tovább fut a 32. napig; ennek eredményeként kiváltottuk a korábbi havi előrejelzéseket. Szintén 2008. március közepe óta hetente egyszer – csütörtökönként – 5 EPS tagú reforecast előrejelzés készül az elmúlt 18 évre visszamenően. Adott hétre vonatkozó modellklímát a tárgy hét körüli plusz mínusz két hetes időszakból származó 5 heti reforecast előrejelzésből számíthatjuk ki (Hagedorn, 2008). A reforecast előrejelzések sikeresen felhasználhatók az EPS előrejelzések kalibrációjára. 2008. őszétől az ALADIN/HU korlátos tartományú modell ECMWF határfeltételekkel fut, így Magyarország az ALADIN országok közül elsőként használja operatíván az ECMWF peremfeltételeket.

	ECMWF	OMSZ EÉFO/NMO ECMWF projekt-beli fejlesztések	OMSZ EÉFO/NMO egyéb ECMWF vonatkozó fejlesztések
2007	Modell fejlesztés: évszakos előrejelzés: SYSTEM-3	VarEPS 15 napos EPS fájlja illetve meteogram EPS kalibráció a naponkénti reforecast előrejelzések felhasználásával	HAWK-2: VarEPS mezők
2008	Egyesített VarEPS és havi előrejelző rendszer Hetenként egyszer, csütörtökönként, 5 tagú EPS reforecast előrejelzés készítése az elmúlt 18 évre	+8 nap körüli Kárpát-medence középpontú clusterezés az OMSZ 10 napos előrejelzés kiadvány megújítása valószínűségi hőmérséklet és csapadék információkkal EPS kalibráció VarEPS és havi előrejelzésre futtatott reforecast előrejelzések felhasználásával	ALADIN/HU futtatás ECMWF peremfeltételekkel

II. táblázat. A 2007 és 2008 közötti ECMWF-beli és OMSZ-beli operatív célú fejlesztések.

Az ensemble előrejelzések kalibrációja

A modell előrejelzések – több forrásból eredően és természetes módon – számos hibával rendelkeznek. Az előrejelzési produktumok utófeldolgozási módszerekkel eredményesen javíthatók. Az ensemble kalibráció az utófeldolgozási módszerek családjába tartozik. Az ensemble kalibráció megvalósítására több lehetőség is adódik, a legegyszerűbb a szisztematikus hiba kiküszöbölését szolgáló ún. „átlagos hiba korrekció” vagy angol szakkifejezéssel „bias correction”. A kalibrációs módszerek széles családja az ún. empirikus eloszlás függvény kalibrálásához kapcsolódik, mely során az aktuális előrejelzett EPS eloszlást a modellklíma eloszlás függvényéhez, valamint a megfigyelési eloszlás függvényéhez hasonlítjuk.

A modellklíma előállításának több módja lehetséges, az egyik módszer szerint egy bizonyos időszakra vonatkozó múltbeli ensemble előrejelzések felhasználásával állítják elő a modellklímát, viszont ennek hátránya, hogy a modellklíma nincs teljes összhangban az aktuális modellverzióval. A jelzett probléma kiküszöbölésére szokták alkalmazni az ún. reforecast előrejelzések előállítását, amikor az operatíván futó modellverzióval újra futtatják a múltbeli analíziseket.

Az ECMWF-ben 2006. február vége és 2008. március vége közötti időszakban az ún. Extreme Forecast Index előállítás számára szükséges modellklímát az 1971 és 2000 közötti időszak minden egyes naptári napjára lefuttatott ún. kontroll modell reforecast előrejelzéssel állították elő. 2008. március közepe óta viszont hetente **egyszer** csütörtökönként készül 5 EPS tagú reforecast előrejelzés az elmúlt 18 évre – azaz jelenleg az 1990–2007-es időszakra – visszamenően. Adott hétre vonatkozó modell-klímát a hét körüli plusz mínusz két hetes időszakból származó 5 heti reforecast előrejelzésből számítjuk ki, azaz összesen 450 darab múltbeli reforecast előrejelzés felhasználásával készül az eloszlás függvény.

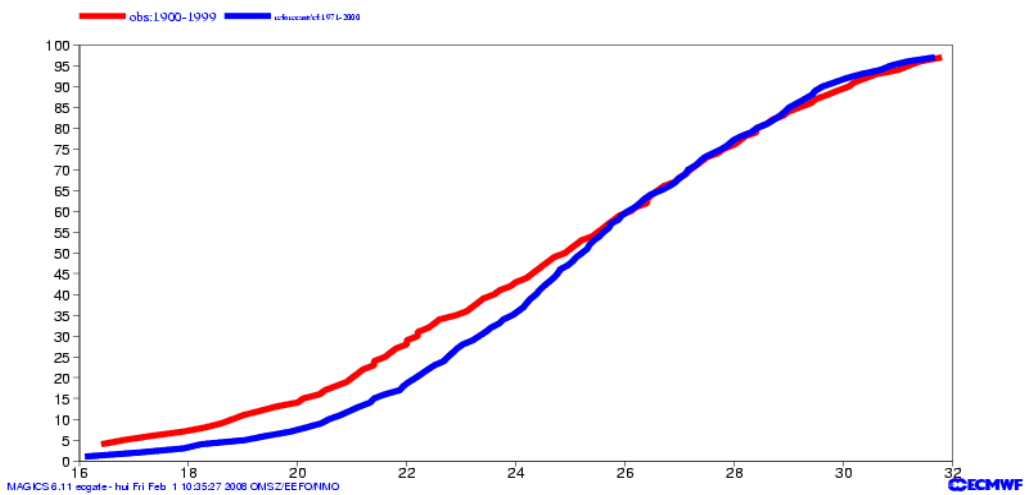
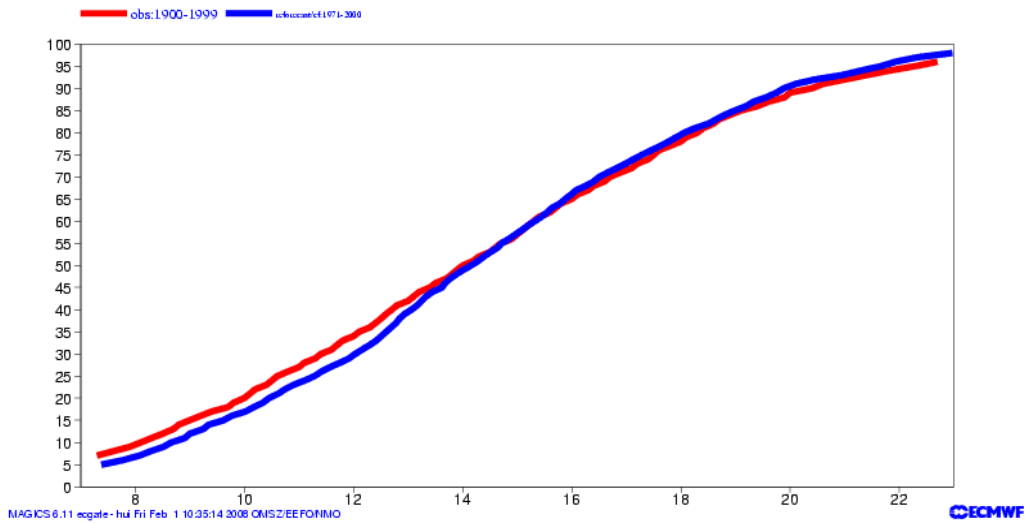
Az OMSZ Távközlési és Informatikai Főosztály Szoftverfejlesztési Osztály rendelkezésünkre bocsátotta a hazai meteorológiai állomások általunk kiválasztott paramétereinek havonkénti eloszlás függvényeit mind az 1971–2000-es mind az 1991–2007-es időszakra. A modell klíma eloszlás függvényeket az ECMWF MARS adatbázisából származó reforecast előrejelzésekből állítottuk elő.

Vizsgálataink első fázisában az akkor rendelkezésre álló 1971–2000-es +48 órás kontroll reforecast előrejelzésekre alapozott kalibrációs módszert fejlesztettünk ki (*Ihász és Mile, 2008*). A rövid előrejelzési időlépcső miatt csak rövidtávú (24–48 óra) és korai középtávú (48–120 óra) előrejelzések kalibrációját tűzhattük ki célul. Az *1. ábra* a vizsgált meteorológiai állomásokat mutatja.

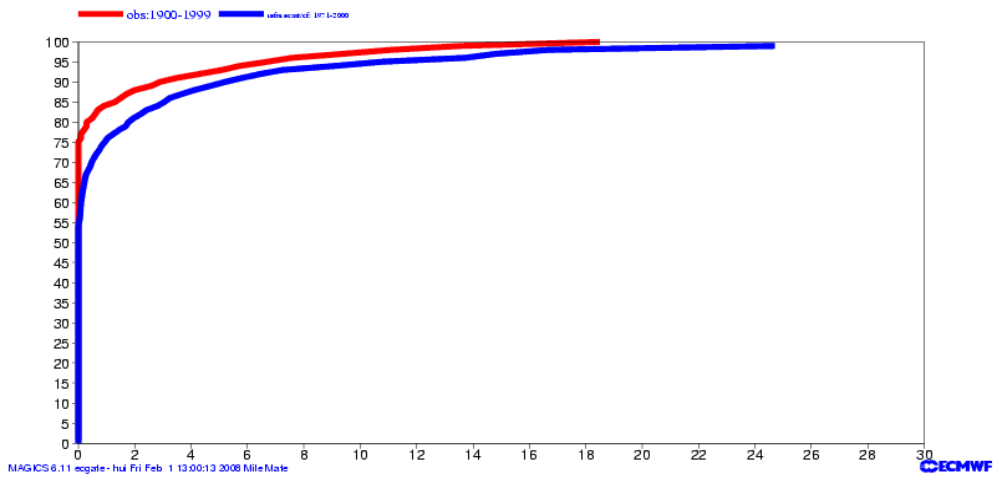


1. ábra. A kalibrációhoz kiválasztott 10 magyarországi szinoptikus állomás.

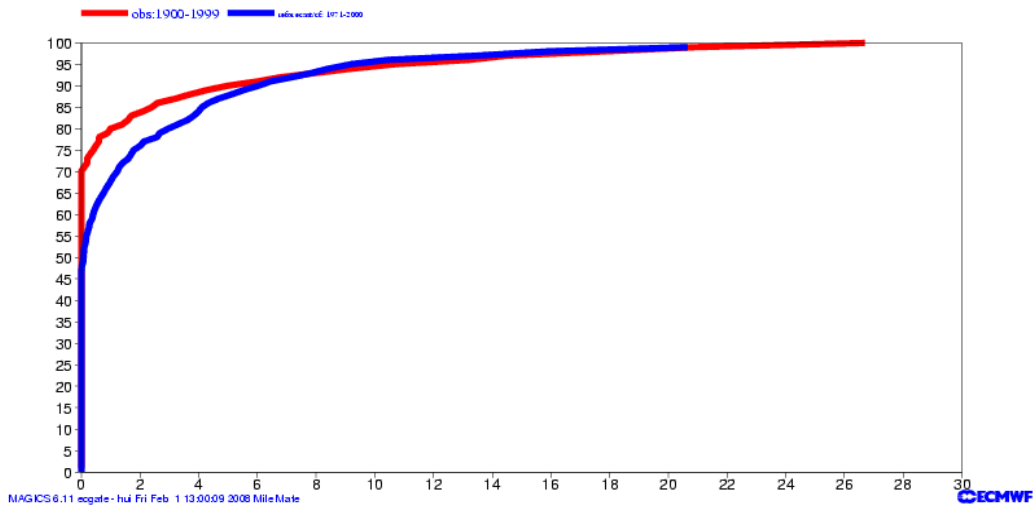
A 12 UTC-s hőmérsékletre valamint a 24 órás csapadékösszegre vonatkozó januári és júliusi budapesti havi eloszlás függvényeket a *2. és 3. ábra* mutatja.



2. ábra. 12 UTC-s 2 m-es hőmérséklet havi eloszlás függvényei Budapestre, piros: megfigyelési, kék: reforecast (fent január, lent július).

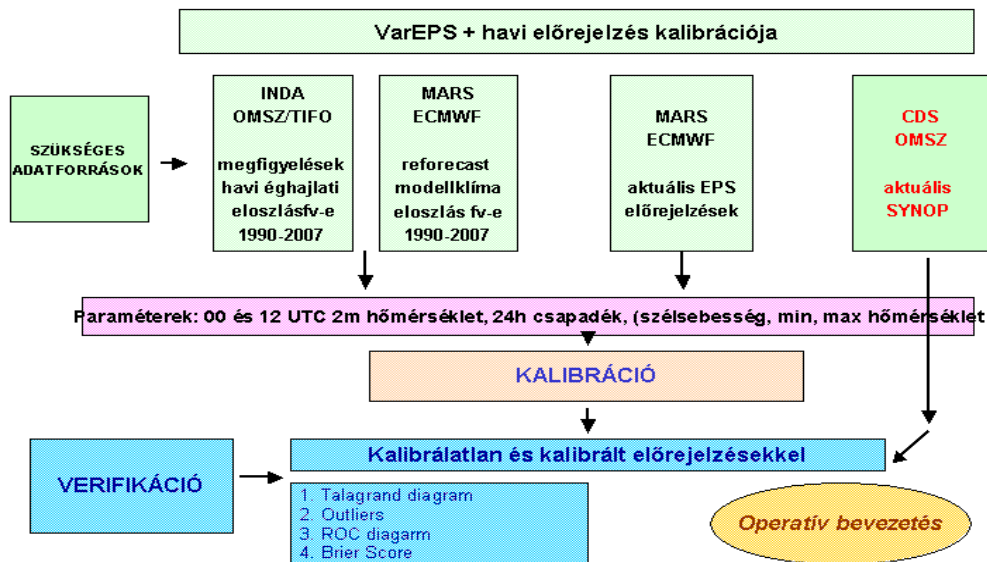


3.a ábra. A 24 órás csapadékösszeg havi eloszlás függvénye Budapestre, januárra, piros: megfigyelési kék: reforecast.



3.b ábra. A 24 órás csapadékösszeg havi eloszlás függvénye Budapestre júliusban, piros: megfigyelési, kék: reforecast.

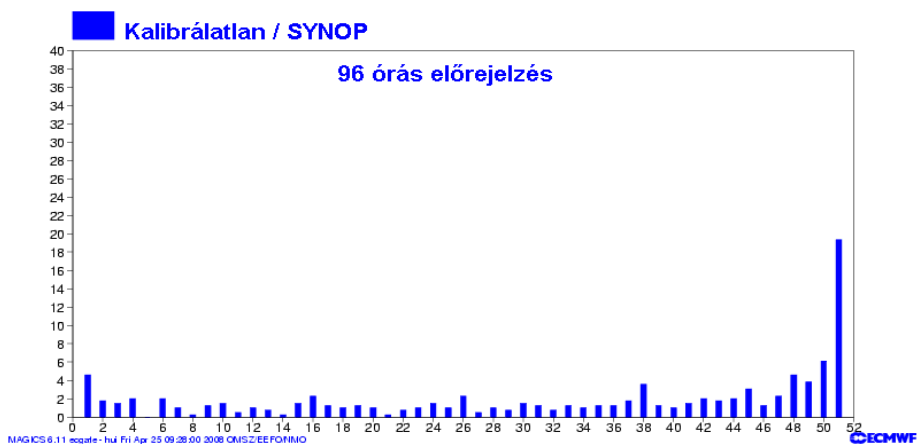
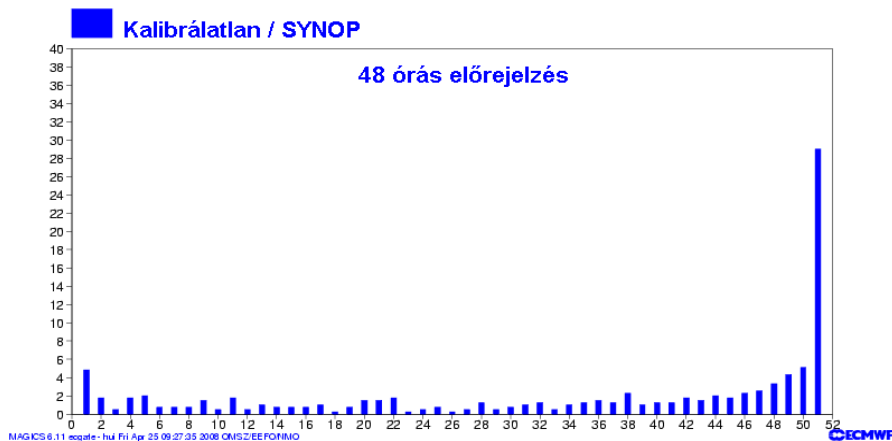
A 4. ábra mutatja az EPS kalibráció, illetve a kalibrálatlan és a kalibrált előrejelzések verifikációjának a folyamatábráját a VarEPS reforecast előrejelzések esetében. A VarEPS reforecast előrejelzések kalibrációja során a megfigyelési és modell klíma időszak hossza egységesen 18 év (1990–2007), míg a +48 órás kontroll modell klíma használata során 30 év (1971–2000) a folyamat egésze azonban sok szempontból nagyon hasonló.



4. ábra. A kalibráció és a verifikáció folyamatábrája.

Az EPS előrejelzések verifikációjára nagyon sokrétű verifikációs eszköztár áll rendelkezésünkre (Persson, 2000). Vizsgálatainkban a Talagrand-diagramot, a ROC-

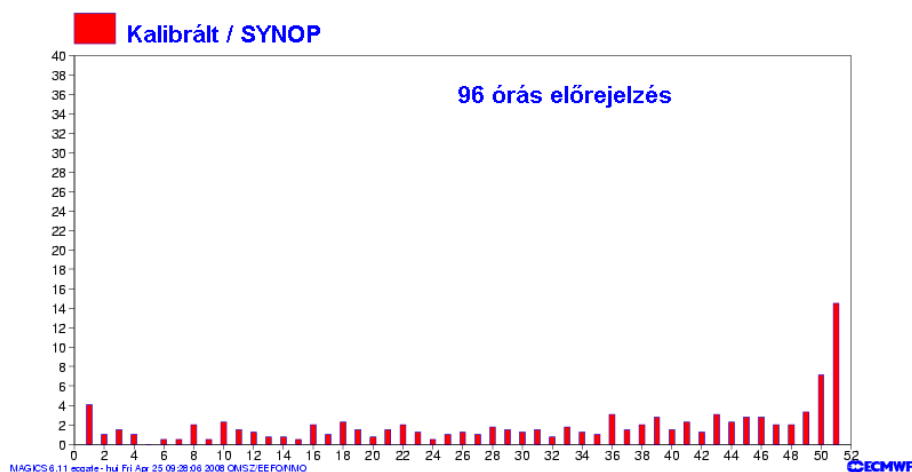
diagramot, a Brier Score-t, valamint az EPS terjedelmén túlnyúló ún. outliers arányt használtuk. A kalibrálatlan és kalibrált Talagrand-diagramot az 5. és a 6. ábra mutatja. Jól látszik, hogy a kalibrálás jelentős mértékben javítja a beválást (Ihász, 2007; Ihász és Mile, 2008).



5. ábra. Kalibrálatlan EPS Talagrand-diagram Budapestre (48 órás és 96 órás előrejelzés).

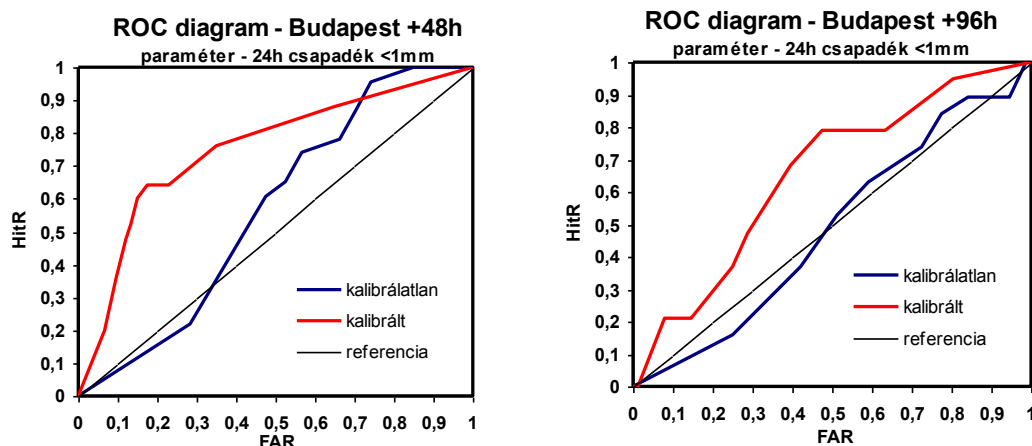


6.a ábra. Kalibrálatlan EPS Talagrand-diagramok – Budapest (48 órás előrejelzés).



6.b. ábra. Kalibrálatlan EPS Talagrand-diagramok – Budapest (96 órás előrejelzés).

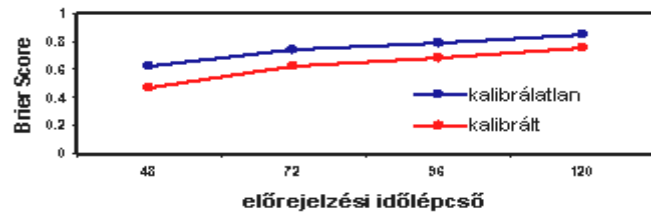
A 7. ábrán a Budapestre vonatkozó 24 órás csapadék ROC diagram látható, észrevehetjük, hogy a kalibráció nagymértékben tudta csökkenteni a téves riasztások arányát ezzel javítva az előrejelzés beválásán. Ez várható volt, mivel a csapadék eloszlás függvényeken is megfigyelhetjük (3. ábra), hogy a megfigyelési klíma sokkal nagyobb valószínűségi küszöb felett vesz fel nem nulla értéket.



7. ábra. 24 órás csapadékösszeg – ROC diagram kalibrált EPS 1 mm-es csapadékküszöb Budapest (48 és 96 órás időlépcsőkkel.)

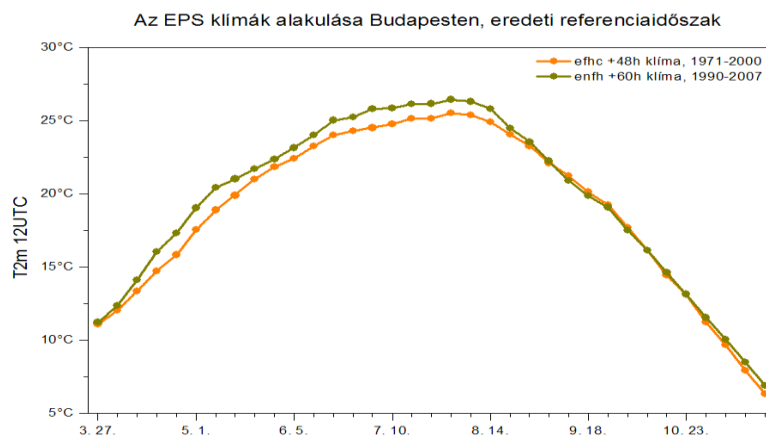
A 8. ábrán láthatók a Budapestre vonatkozó Brier Score értékek az időlépcső függvényében. Megfigyelhető, hogy a kalibráció csökkentette a Brier Score értékeit. Egyes időlépcsőkben igen jelentős, akár 0,15 értékű javulás is megfigyelhető. Amint már említettük az ECMWF-ben 2008. március közepe óta hetente egyszer csütörtökönként készül 5 EPS tagú reforecast előrejelzés az elmúlt 18 évre – az 1990–2007-es időszakra – visszamenően. Adott hétre vonatkozó modellklímát a hét körüli plusz mínusz két hetes időszakból származó 5 heti reforecast előrejelzésből számítjuk ki. 2008 tavaszán és nyarán elvégeztük az új modellklíma használatát biztosító fejlesztéseket (Üveges, 2008).

Részletesen vizsgáltuk a régi és az új modellklíma közötti hasonlóságokat és különbségeket (9. ábra). Megállapítható, hogy az 1991–2007 időszakban tavasszal és nyáron mind a modell klíma, mind a megfigyelési klíma szerint észrevehetően melegebb, míg ősszel gyakorlatilag nincsen különbség.

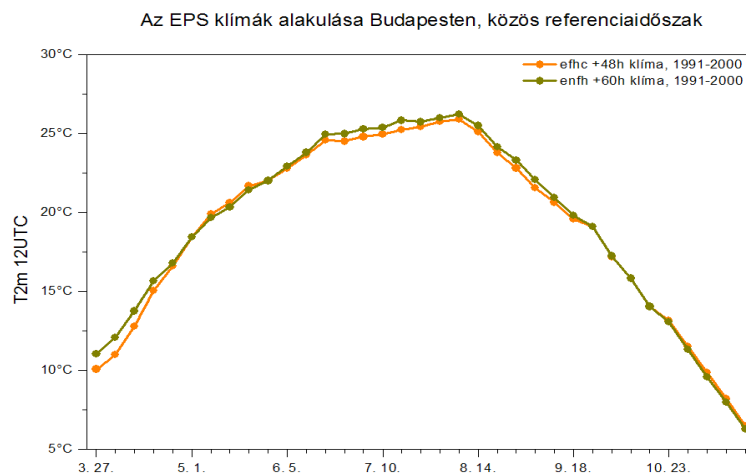


8. ábra. 24 órás csapadékösszeg – Brier Score – kalibrált (piros) és kalibrálatlan (kék) EPS előrejelzésre. Budapest (48, 72, 96, 120 órás időtáv).

A két modell klíma által lefedett közös időszakban, az 1991–2000-es intervallumban a két modell klíma gyakorlatilag megegyezik (10. ábra).

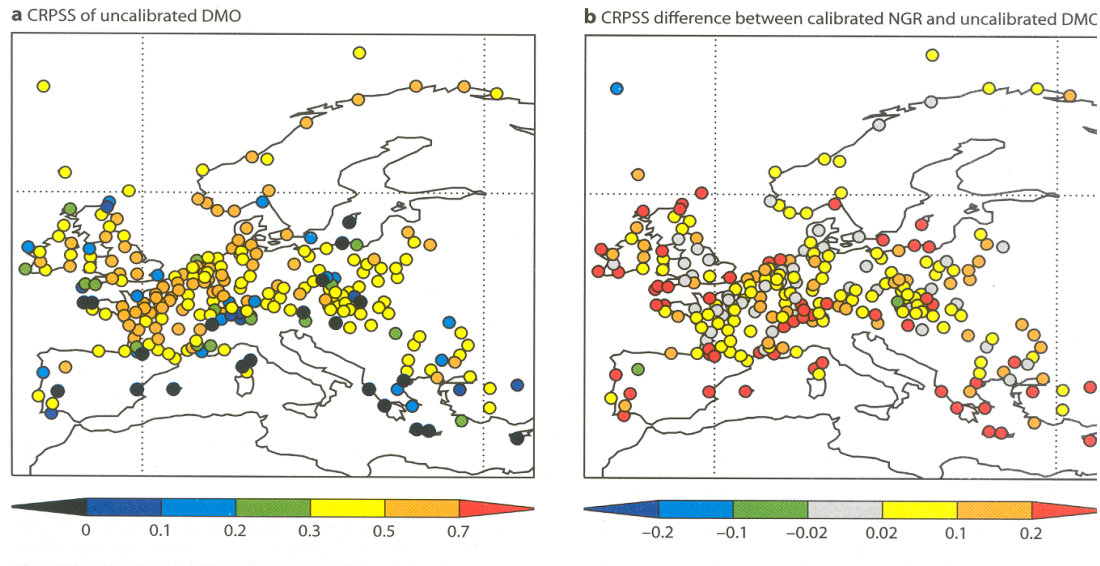


9. ábra. A budapesti rácspont hőmérsékleti értékei az eredeti modell klíma időszakokban (1971–2000 illetve 1990–2007).

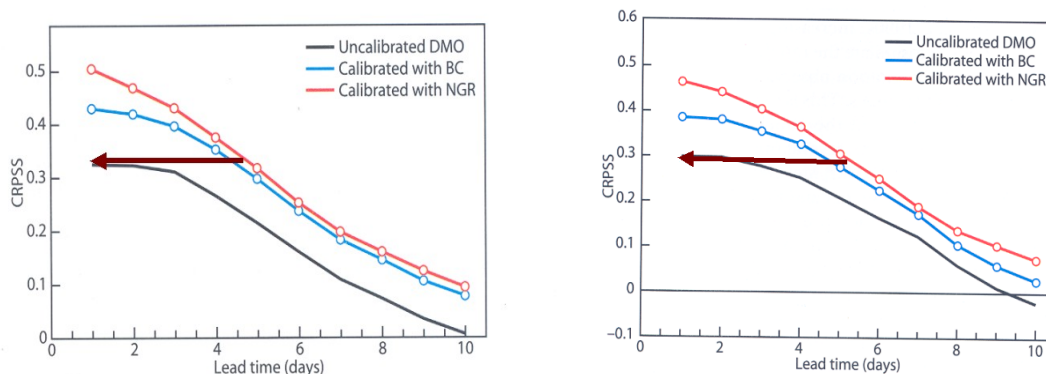


10. ábra. A budapesti rácspont hőmérsékleti értékei a közös modell klíma időszakban (1991–2000).

Az ECMWF egyik legfrissebb kiadványában egy rövid összefoglaló mutatja be az ECMWF reforecast előrejelzésekre alapozott EPS kalibráció használatát (Hagedorn, 2008). A tanulmányban két független időszakban (2005. szeptember – december illetve 2008. április – június) vizsgálták meg két különböző kalibrációs módszer használhatóságát a 2 m-es hőmérséklet esetében 250 európai állomásra (11. ábra).



11. ábra. A verifikáció során kapott Continuous Ranked Probability Skill Score értékek a 2 m-es hőmérsékletre a 2005. szeptember 1. november 30. közötti időszakra 250 európai állomásra. A baloldali ábrán a kalibrálatlan értékek, a jobboldali ábrán a kalibrált és a kalibrálatlan értékek közötti különbség látszik (Hagedorn, 2008).

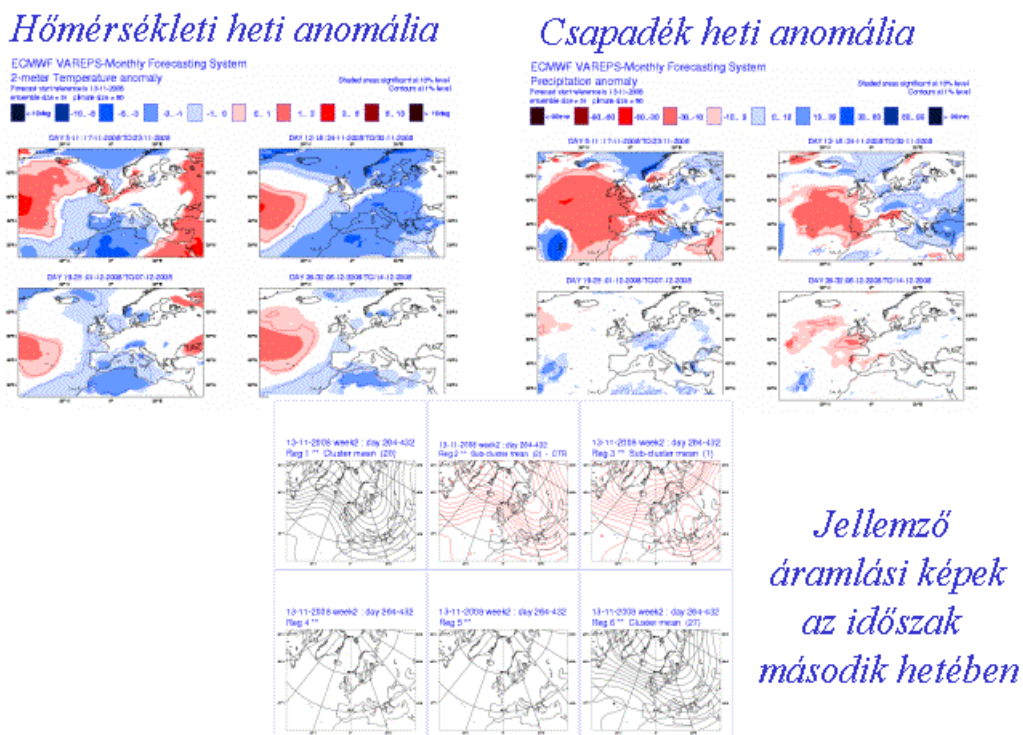


12. ábra. A verifikáció során kapott Continuous Ranked Probability Skill Score (CRPS) értékek az előrejelzési időlépcső függvényében a 2 m-es hőmérsékletre a kalibrálatlan, a szisztematikusan hibával kalibrált, valamint a nem homogén gaussi regressziós technikával kalibrált esetben. A baloldali ábrán a 2005. szeptember 1. november 30. közötti időszak adatai alapján, a jobb oldali ábrán a 2008. április 1. és június 30. közötti időszak adatai alapján kiszámított CRPS értékek látszanak 250 európai állomásra (Hagedorn, 2008).

Az egyszerűbb kalibrációs technika alkalmazása esetében csak a modell szisztematikus hibájával kalibráltak, míg a bonyolultabb kalibrációs eljárás során az eloszlás függvény sajátosságait figyelembe vevő ún. nem homogén gaussi regressziós módszert alkalmaztak. Eredményeik szerint mindkét időszakban a javulás nagyobb része a szisztematikus hiba kiküszöböléséből adódik, de további javulás is elérhető a bonyolultabb eljárás alkalmazásával (12. ábra).

ECMWF havi előrejelzések

Az ECMWF-ben havi előrejelzések 2002 óta készülnek, eleinte kéthetenként, majd 2004-től már hetente, 2005-től pedig már a tájékoztatási rendszer részeként. Több éven keresztül tartó fejlesztő munka eredményeként 2008. március közepétől egyesítésre került a 2006. november végén operatív bevezetésre került 15 napos VarEPS rendszer és a 32 napos havi előrejelzés (Vitart, et. al, 2008). Ugyanakkor került operatív bevezetésre a kalibrációs célú szintén 32 napos reforecast előrejelzés is (Hagedorn, 2008).

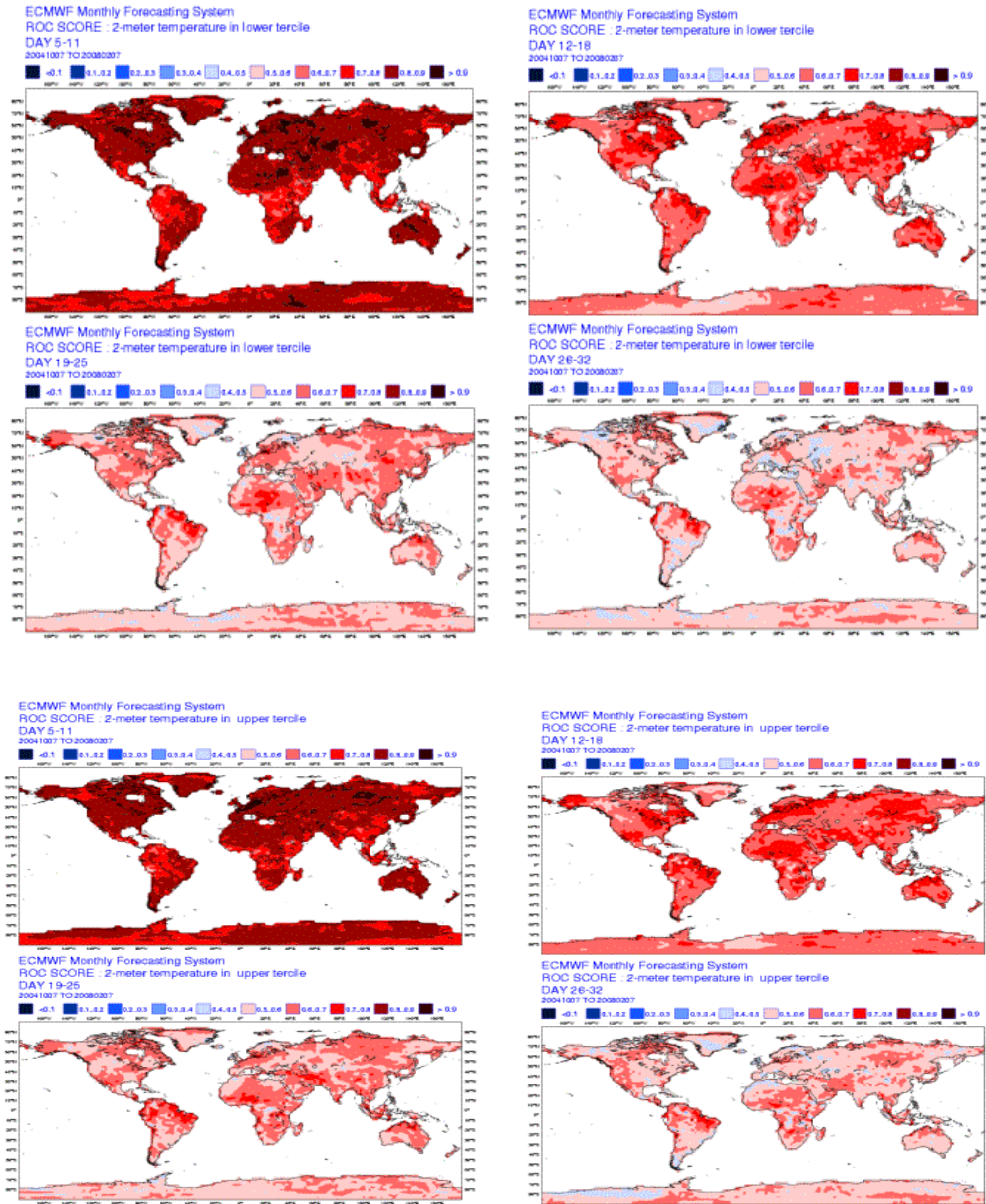


13. ábra. A 2008. november 13-án készült havi előrejelzés heti bontású hőmérséklet és csapadék anomália térképei, valamint a 2. hétre clusterezéssel kapott jellemző áramlási képek.

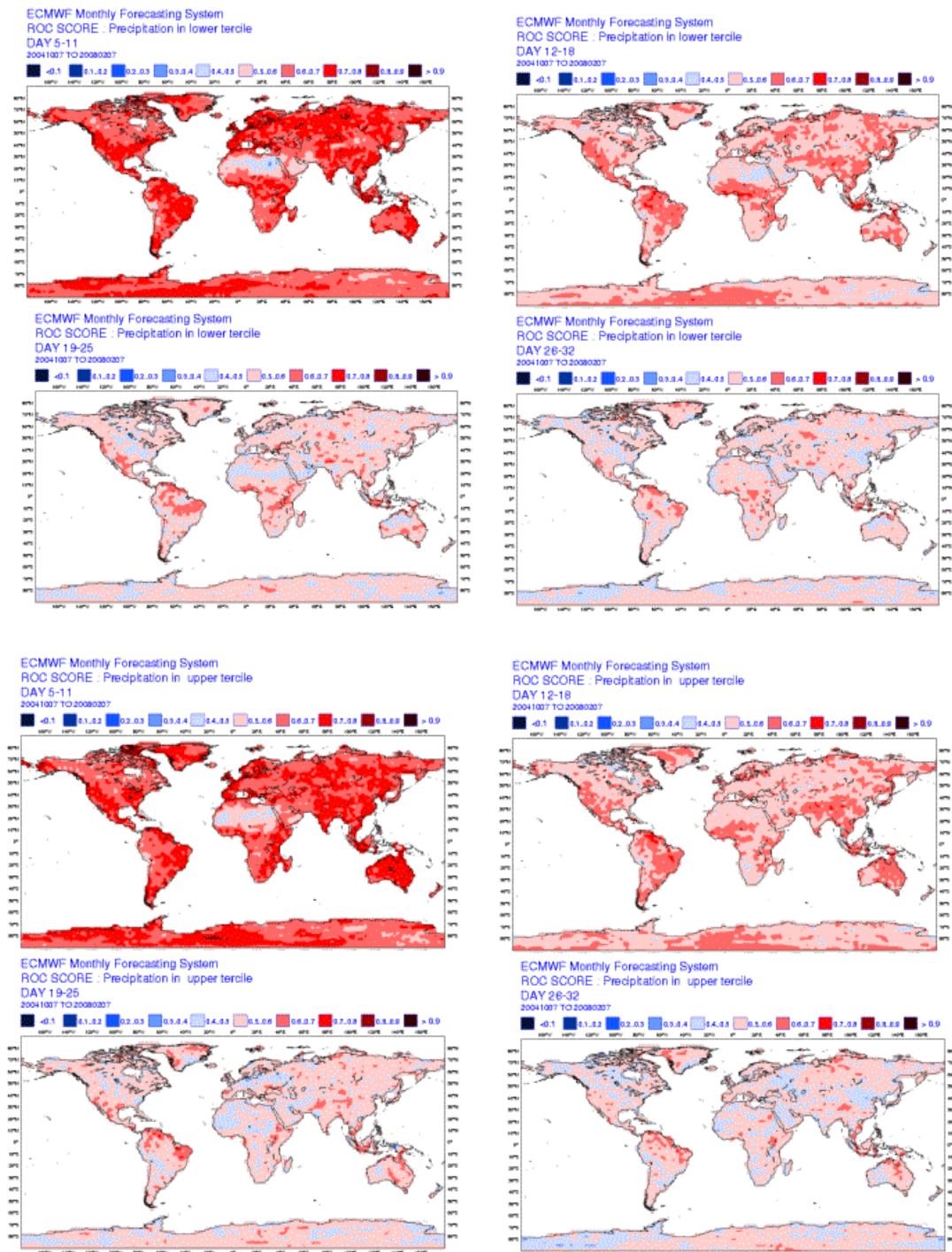
A havi előrejelzés időskáláján célszerű napi időbeli bontású mezők helyett már 5–7 napos időintervallumra átlagolt mezőket néznünk, mivel körülbelül a 10. naptól kezdődően a napi bontású előrejelzés beválása már nem éri el a kívánt szintet, viszont a hosszabb időszakokra átlagolt mezők, tendenciák még rendelkeznek kellő információ tar-

talommal. A 13. ábra mutatja a legfrissebb, 2008. november 13-án készült havi előrejelzésből készített heti bontású 2 m-es hőmérséklet és csapadék anomália térképeket, valamint a 2. hétre vonatkozó – clusterezéssel kapott – jellemző áramlási mezőket.

Az ECMWF-ben megvizsgálták a 2004 és 2008 közötti időszakban készült összes havi előrejelzés bevalását három kategóriára bontva az előrejelzéseket attól függően, hogy a prognózis az alsó, középső illetve a felső tercilisbe esik-e. A 14. ábra a 2 m-es hőmérséklet heti átlagaira vonatkozó heti bontású előrejelzések alapján készített Anomaly Correlation Coefficient (ACC) verifikációs mérőszám térbeli jellemzőit mutatja be az alsó és a felső tercilis esetében.



14. ábra. A 2 m-es hőmérséklet esetében a heti bontású előrejelzések bevalását mutató anomália korrelációs együttható térképek. A bal oldali ábrák az alsó, a jobb oldaliak a felső tercilisre vonatkoznak.



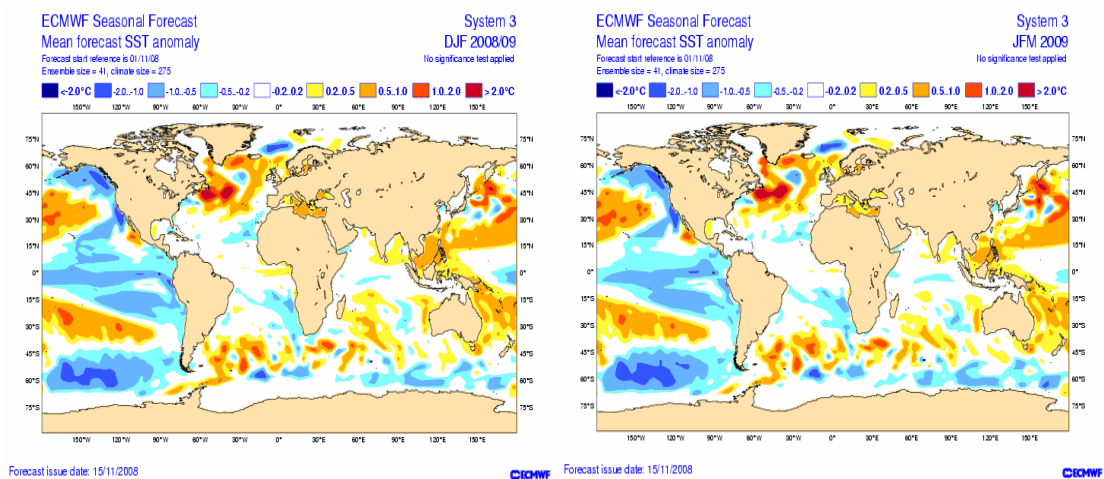
15. ábra. A csapadék esetében a heti bontású előrejelzések beválását mutató anomália korrelációs együttható térképek. A bal oldali térképek az alsó, a jobb oldali térképek a felső tercilisre vonatkoznak.

Jól látszik, hogy az első hétre a mérsékelt övben kifejezetten jó prognózisok készülhetnek, míg a trópusi övben ehhez képest valamivel szerényebb a beválás, a helyzet a 3. és 4. hétre megfordul. A harmadik-negyedik hét körül kapott verifikációs eredmények összhangban vannak az évszakos előrejelzések verifikációja során kapott tapasztalatok-

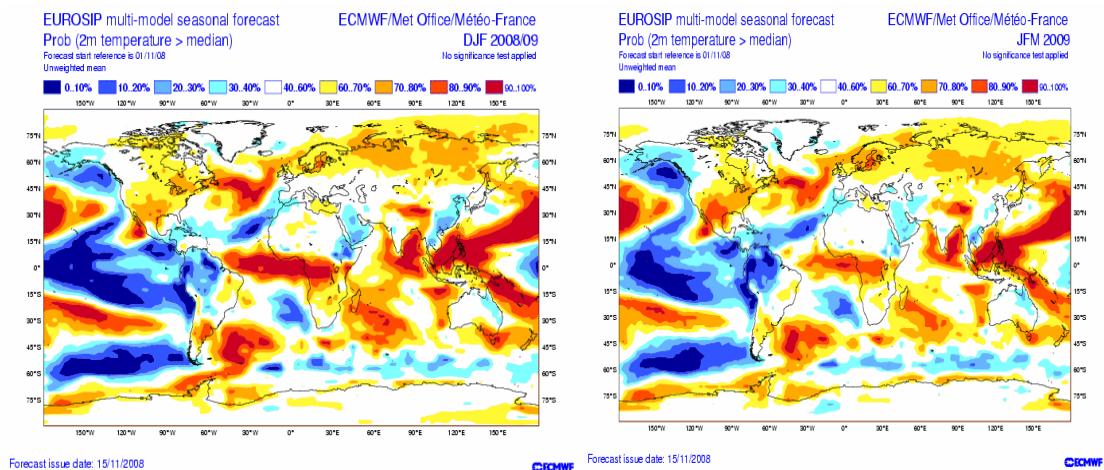
kal, azaz hosszabb időszakra /több hétre, több hónapra/ szóló prognózisok jobbak a trópusi területeken, mint a mérsékelt övben. A 15. ábra a heti csapadékátlagra vonatkozó heti bontású előrejelzésekre vonatkozó ACC verifikációs mérőszám térbeli jellemzőit mutatja az alsó és a felső tercilis esetében.

ECMWF évszakos előrejelzések

Az ECMWF-ben az 1990-es évek közepén kezdődött az évszakos előrejelzési modell kifejlesztése. Az évszakos előrejelzési modell két fő komponensből áll. Az óceáni modellből és a légköri modellből, melyek között egy csatolás biztosítja a kapcsolatot. Az évszakos előrejelzési modell 50 tagú ensemble-t tartalmaz.



16. ábra. A 2008. november 15-én készült tengerfelszín hőmérséklet anomália előrejelzések a 2008. december–2009. február, valamint a 2009. január–március időszakra.

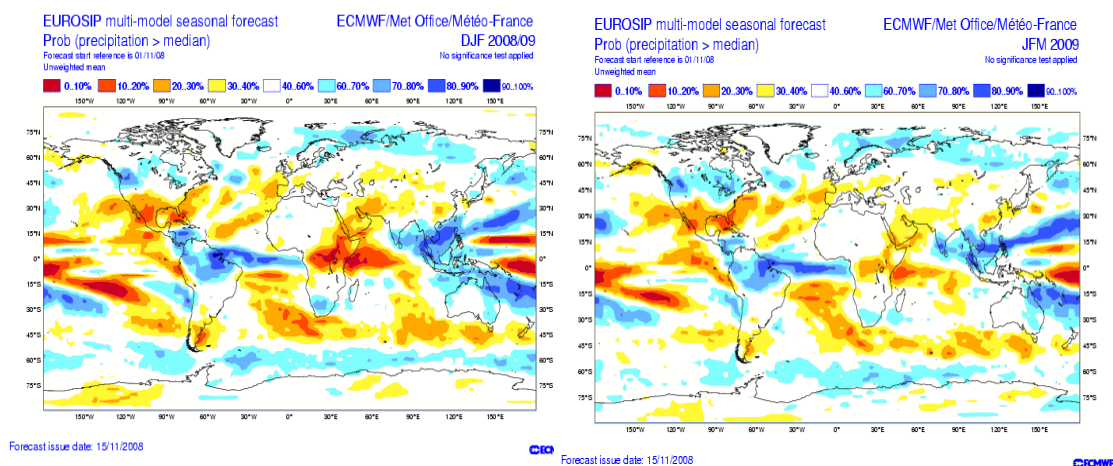


17. ábra. Az EUROSIP multimodell alapján 2008. november 15-én készült 2 m-es hőmérséklet anomália előrejelzések a 2008. december – 2009. február valamint a 2009. január – március időszakra.

A kvázi-operatív kísérleti futtatás 1998. közepén valósult meg, s 2004-től az évszakos előrejelzések már a tájékoztatási rendszerben is elérhetők (*Anderson et al., 2007; Molteni et al., 2007*). Az OMSZ-ban az ún. hat havi előrejelzés 2004-től szintén az ECMWF évszakos előrejelzésre épül.

A 2000-es évek elején kezdődött az ún. DEMETER EU projekt, melynek keretében három ensemble évszakos előrejelzési modellt (az ECMWF modell mellett a francia és az angol meteorológiai szolgálat modelljét) együttesen futtatják. Jelenleg a project EUROSIP néven fut, a verifikációs eredmények alapján a multimodell évszakos előrejelzés jobb beválású, mint bármely egyedi modell, így a gyakorlatban célszerű a multimodell előrejelzéseket használni.

A multimodell produktumok szintén elérhetők az ECMWF MARS rendszerből. Az előrejelzések minden hónap 15-én állnak a felhasználók rendelkezésére. Az évszakos előrejelzések minősége jelentős mértékben függ a tengerfelszín hőmérséklet anomália előrejelzés sikerességétől. A 2008. november 15-én futtatott előrejelzés alapján készült tengerfelszín hőmérséklet anomália előrejelzéseket a 16. ábra mutatja. A 17. és 18. ábra az EUROSIP multimodellrel készült három hónapra átlagolt hőmérséklet és csapadék anomália valószínűség térképeket mutatja.



18. ábra. Az EUROSIP multimodell alapján 2008. november 15-én készült csapadék összeg anomália előrejelzések a 2008. december – 2009. február, valamint a 2009. január – március időszakra.

Összefoglalás

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál az Európai Középtávú Előrejelző Központ modell produktumait széleskörűen használjuk. A dolgozatban rövid áttekintést adtunk az elmúlt öt évben történt ECMWF-beli és OMSZ-beli operatív célú fejlesztésekről. Ezen belül bemutattuk az ensemble reforecast előrejelzések kalibrációs célú használatát célzó vizsgálatokat és azok eredményeit. Végül a legfrissebb havi és évszakos előrejelzések bemutatásán keresztül a hosszabb távú előrejelezhetőség kérdéseit tekintettük át.

Irodalomjegyzék

- Anderson, D., Stockdale, T., Balmaseda, M., Ferranti, L., Vitart, F., Molteni, F., Doblas-Reyes, F., Mogensen, K. and Vidard, A., 2007: Seasonal Forecast System 3, *ECMWF Newsletter* **110**, 19–25.
- Buizza, R., Bidlot, J-R., Wedi, N., Fuentes, M., Hamrud, Holt, G., Palmer, T. and Vitart, R., 2006: The ECMWF Variable Resolution Ensemble System (VAREPS), *ECMWF Newsletter* **108**, 14–20.
- Götz G., 2001: Káosz és prognosztika, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest.
- Götz G., 2002: Az ensemble előrejelzések, 28. *Meteorológiai Tudományos Napok: A meteorológiai előrejelzések és alkalmazásai* (Szerkesztette Weidinger T.), Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 7–22.
- Hagedorn, R., 2008: Using the ECMWF reforecast dataset to calibrate EPS forecasts, *ECMWF Newsletter* **117**, 8–13.
- Ihász I., 2003: Operatív középtávú időjárás előrejelző modellezés az ECMWF-ben, 29. *Meteorológiai Tudományos Napok: Az időjárás numerikus előrejelzése* (Szerkesztette Weidinger T.), Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 119–128.
- Ihász, I., 2007: Experiences using VarEPS products at the Hungarian Meteorological Service, *Proceedings of the Eleventh ECMWF Workshop on Meteorological Operational Systems*, Reading UK, 14-18 November 2007, 130–135.
- Ihász, I. and Mile, M., 2008: Calibration of ECMWF ensemble precipitation forecasts for hydrological purposes at the Hungarian Meteorological Service, *Proceedings of the XXIV Conference of the Danubian Countries. 2–4 June 2008*, Bled, Slovenia.
- Molteni, F., Ferranti, L., Balmesada, M., Stockdale, T. and Vitart, F., 2007: New web products for the ECMWF Seasonal Forecast System-3, *ECMWF Newsletter* **111**, 28–33.
- Simmons, A., Uppala, S., Dee, D. and Kobayashi, S., 2007: ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards, *ECMWF Newsletter* **110**, 25–35.
- Persson, A., 2000: User Guide to ECMWF forecasts products, *Meteorological Bulletin* **3.2**, ECMWF Reading, UK.
- Untch, A., Miller, M., Hortal, M., Buizza, R. and Janssen J., 2006: Towards a global meso-scale model: The high-resolution system T799L321 and L399L62, *ECMWF Newsletter* **108**, 6–13.
- Üveges Z., 2008: Az ECMWF havi előrejelzések kalibrációja. *Tudományos Diákköri Dolgozat*, Budapest ELTE TTK.
- Vitart, F., Bonet, A., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bidlot, J-R., Buizza, R., Fuentes, M., Hofstadler, A., Molteni F. and Palmer T., 2008: Merging VarEPS with the monthly forecasting system: a first step towards seamless prediction, *ECMWF Newsletter* **115**, 35–44.
- Woods, A., 2005: *Medium-Range Weather Prediction - the European Approach*, Berlin, Springer.

A rövid -és a középtávú időjárás előrejelzés gyakorlati módszertana

Bonta Imre

Országos Meteorológiai Szolgálat, Időjárás Előrejelző Osztály
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1., e-mail: bonta.i@met.hu

Összefoglaló – A cikkben áttekintjük a rövid- (12–48 óráig szóló) és a középtávú előrejelzések (48 órától 10 napig szóló) módszereit. Ezek közül ma már nyilván a numerikus modelleken alapuló eljárások a legfontosabbak, amelyeknek szerepe különösen a középtávú előrejelzéseknél döntő. A hagyományos szinoptikus módszerek a „Bergeni Iskola” által kidolgozott elméletre alapozva az aktuális helyzetből következtetnek a várható időjárásra. E módszertan jelentősége ugyan mára már csökkent, de bizonyos időjárási helyzetekben továbbra is fontos. A cikkben ezért is foglalkozunk olyan szinoptikus klimatológiai feldolgozásokkal, amelyek ma is hasznosak a gyakorlatban, különösen, ha azokat modelleredményekkel kombináljuk.

Az a megállapítás, hogy a meteorológiai előrejelzések bevétele évről évre javul, ma már közhelynek számít. A bevételek javulása döntő mértékben az egyre megbízhatóbb modellekre köszönhető. A sikeres előrejelzésekben az említettek kivételével azonban más tényezők is szerepet játszanak. A technika fejlődése és a meteorológus szakemberek fejlesztése révén az elmúlt évtizedekben az előrejelző munka jelentős részét sikerült automatizálni, amely több szempontból is pozitívan hat az előrejelzések minőségére, bevételeire. Mindenekelőtt azért, mert ezáltal lényegesen több ideje és energiája marad a meteorológusnak a tényleges szakmai munkára. Fontos szempont az is, hogy a megjelenítő rendszerek fejlesztésével lényegesen több és a korábbiaknál összetettebb mezők, ábrák segítik a légkörben lejátszódó és a modellek által prognosztizált folyamatok megértését. Az anyag végén, esettanulmányon keresztül mutatom be, hogy az ensemble előrejelzéseknél, amelyek elsősorban a középtávú hoztak új szemléletet a prognózisokban, milyen új produktumokat használunk, és ezek hogyan segítik az előrejelzési munkát.

A meteorológiai előrejelzések módszerei

A meteorológiai előrejelzési módszerek alapvetően az alábbi négy csoportba oszthatók:

- hagyományos (szinoptikus) módszerek,
- szinoptikus klimatológiai kutatások és az ehhez kapcsolódó döntési eljárások alkalmazása,
- távérzékelési eszközökkel történő prognózis készítés,
- számítógépes előrejelzésekkel történő prognózisok.

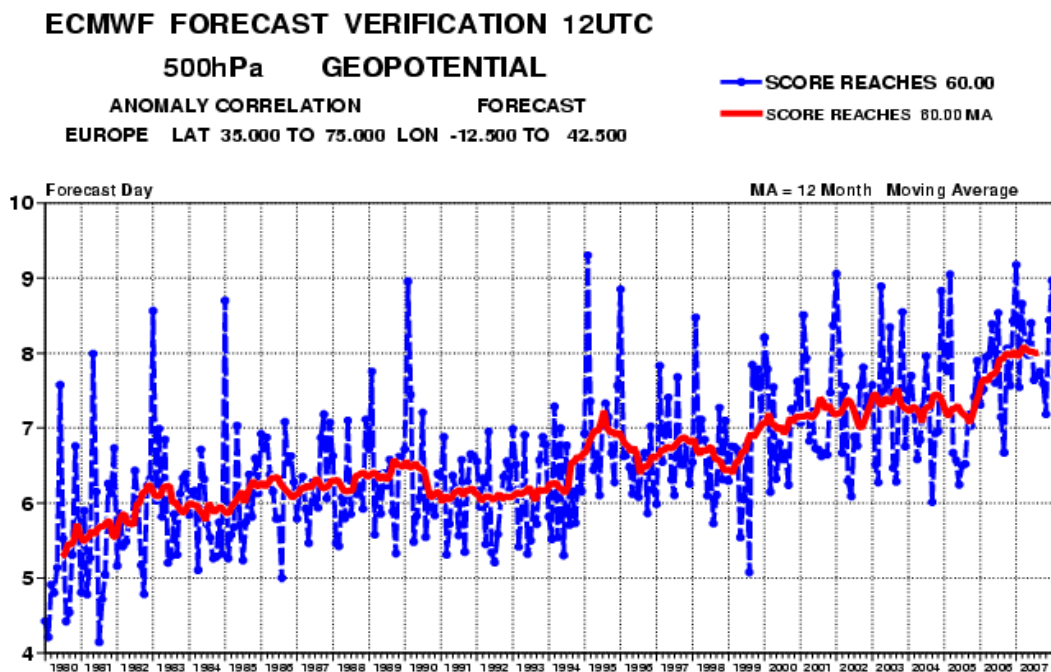
Ezek közül az első a legrégebbi, a „Bergeni Iskola” elmélete alapján az 1920-as évek elején született, ezért ennek majd évszázados a múltja. A távérzékelési eszközökkel és a számítógépes előrejelzésekkel történő prognózisok az elmúlt évtizedekben váltak fontossá. Mára a számítógépes előrejelzéseken alapuló prognózis készítés a középtávú előrejelzéseknél szinte egyeduralgódóvá vált; a távérzékelési eszközök pedig a nowcasting előrejelzéseknél játszanak meghatározó szerepet.

Számítógépes előrejelzések

Az elmúlt évtizedekben a számítógépes előrejelzések elengedhetetlen eszközeivé váltak a prognózisok készítésének. Miközben ultrarövidtávú a távérzékelési eszközöknek, rövidtávú pedig a hagyományos szinoptikus módszereknek a numerikus modellek mel-

lett mind a mai napig fontos a szerepük van, addig a középtávú előrejelzéseknél a „tisztán” számítógépes előrejelzésekkel készülő prognózisok gyakorlatilag egyed-uralkodóvá váltak.

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alapvetően két modellt használunk. Az Európai Középtávú Előrejelző Központ modelljét az ECMWF modellt, és az OMSZ épületében futtatott ALADIN modellt. Ma a világban csak a legfejlettebb és legnagyobb országok képesek fejleszteni és futtatni az ECMWF-hez hasonló globális modellt. Ezek közül hosszú évek verifikálása alapján az általunk is használt, de az interneten szabadon nem hozzáférhető ECMWF modell a legjobb. Az ECMWF determinisztikus változatának a térbeli felbontása jelenleg 25 km; a modell naponta kétszer fut, és 91 vertikális szinttel rendelkezik. Az ALADIN modellt több európai ország együttműködésével fejlesztették ki a 90-es évek közepén. Ma már Franciaország, Portugália és Belgium mellett a legtöbb környező ország is ezt a modellt használja, illetve fejleszti. Az ALADIN modell hazai változata naponta négyszer fut, 48–54 óráig szóló előrejelzést ad. Horizontális felbontása 8 km. 49 vertikális szintet tartalmaz. Az ECMWF és az ALADIN modell mellett kiegészítésként építünk a Német Meteorológiai Szolgálat (DWD) modelljére és az interneten mindenki számára szabadon hozzáférhető GFS és MM5 modellre is.



1.ábra. Az ECMWF modell beválásának a javulása 1980-tól 2007-ig.

A modellek beválása az elmúlt időszakban folyamatosan javult, de a javulás nem volt töretlen, ahogy az az *1. ábrán* megfigyelhető: az ábra szerint az ECMWF modell beválásában az elmúlt 25 évben még 12 havi mozgó átlaggörbén is megfigyelhetők visszaesések. Az ábráról egyébként az olvasható le, hogy hányadik nap következik be az 500 hPa-on 60 gpm-et elérő hiba: a 80-as évek elején ez a 4. napon, míg napjainkban a 8. nap környékén következik be. Tehát ma a 8. napra ugyanolyan jó minőségű prognózist tudunk adni, mint 25 évvel ezelőtt a negyedik napra.

Ami a különböző globális modellek összehasonlítását illeti, minden verifikálás szerint az ECMWF modell már évek óta a legmegbízhatóbb modell, de ez nem zárja ki azt, hogy egyes esetekben más modell bevétele legyen a jobb.

Távérzékelési eszközökkel történő prognózis készítés

A távérzékelési eszközök (radar, műhold, illetve a villám lokalizációs rendszerek adatai) a hagyományos földi óránkénti szinop és a 6–12 óránkénti rádiószondás megfigyelések mellett ma már elengedhetetlen eszközei az előrejelzéseknek. Közvetlenül alapvetően a nowcasting (0–3 órára szóló) előrejelzéseknél van szerepük azáltal, hogy időben és térben kvázi folytonos információkat szolgáltatnak az aktuális időjárási helyzetről. Segítségükkel meglehetősen finom térbeli felbontásban nyomon követhető az időjárási objektumok mozgása és fejlődése, és olyan speciális információkat szolgáltatnak, mint pl. a műholdnál a felhőzet jellege vagy radarnál a csapadékintenzitás. Az alábbiakban összefoglaljuk, hogy ezen eszközöknek milyen a térbeli és időbeli felbontása:

	Térbeli felbontás	Időbeli felbontás
radar	ált. 0,5– 1 km	15 perc
műhold	3–4 km	15 perc
villám	1–2 km	1–2 perc

Hagyományos, (szinoptikus) módszerek

A hagyományos szinoptikus módszereken a megfigyelések és a rádiószondás mérések (felszállások, topográfiai térképek) kiértékelését, illetve a talajtérképeken analizált időjárási objektumok (ciklonok, anticiklonok, frontok, mezoléptékű képződmények) nyomon követését és kiértékelését értjük. A frontokat a talajtérképeken a nyomás-tendencia, a szélirány, a szélesebesség, a harmatpont és a felhőzet jellegének a megváltozása alapján, a topográfia térképeken pedig az 1950-es évektől kezdve elterjedten alkalmazott „nagy hőmérsékleti kontraszt sávja” (850 hPa) alapján különíthetjük el. (Megjegyezzük, hogy a frontok helyzetét természetesen az előbbi szempontok mellett műholdképekből nyerhető információk alapján is meghatározzák.)

Az alábbiakban tekintsük végig, hogy a topográfiai térképeken (500 hPa, 700 hPa, 850 hPa és 925 hPa) melyek a megfigyelhető legfontosabb objektumok, folyamatok. Mindegyik térképen érdemes meghatározni a térségünkben lévő izopihszák konfigurációját, a hőmérsékleti és a nedvességi advekción, valamint az erős konvergencia helyét. Az 500 hPa-os topográfia térképen elkülöníthetők a Rossby-hullámok (teknő, gerinc), valamint a jet-zónához kapcsolódóan a nagy szélesebességű zónákat. A nagy magassági szél alatt általában nagy a vertikális szélnyírás, ami kedvez a csapadék kialakulásának, illetve a talajközeli szellőkések előfordulásának (a magasból lekeveredhet a szél). A 700 hPa-os szintnek a vezetőáramlás meghatározásában és a nedvességmező elemzésében van kitüntetett szerepe. A 850 hPa-os topográfia térképeken a frontanalízis szempontjából fontos a nagy hőmérsékleti kontraszt zónájának a kijelölése, a konvergencia területek megadása, és különösen a nyári félévben, a hőmérséklet (T_{850}) értéke, amelyből a napi maximum hőmérsékletre lehet következtetni. A felszállásoknál elsősorban a labilitási viszonyokat, az inverziókat és a szélnyírás helyét értékeljük ki.

A szinoptikus léptékű objektumok mellett egyre nagyobb figyelmet szentelünk a különböző mezoléptékű rendszereknek, mint a konvergencia vonalaknak, az instabilitási vonalaknak és az MKK-nak (mezoléptékű konvektív komplexum). A konvergencia vonalak (amelyek lehetnek sebességi, iránymenti vagy mindkettő egyszerre) elsősorban a lokális és a mezoléptékű csapadékrendszerek kialakulása szempontjából fontosak. Az instabilitási vonalak erős magassági áramlásban, a ciklon meleg szektorában éles konvergencia vonalként jelentkeznek, a talaj közelében pedig átmeneti erős nyomásemelkedést okoznak. Az instabilitási vonalak mentén vonalba rendezett heves zivatarok fordulnak elő. Ritkán az is előfordul, hogy az instabilitási vonal szárazon vonul át viharos szél kíséretében. Az MKK fogalmát (az 1980-as évektől) az USA-ban kezdték alkalmazni, majd a hazai gyakorlatban (*Bodolainé és Tünczer* munkássága révén) is meghonosodott. Ez egy többnyire ellipszis alakú, ún. nagy mezo-skálájú, akár több száz km átmérőjű zivataros tömb, amely gyakran perzisztens. Felismerése az infraképek alapján történik bizonyos küszöbérték és méret megadásával (*Maddox*, 1980).

Szinoptikus klimatológiai vizsgálatok, döntési eljárások

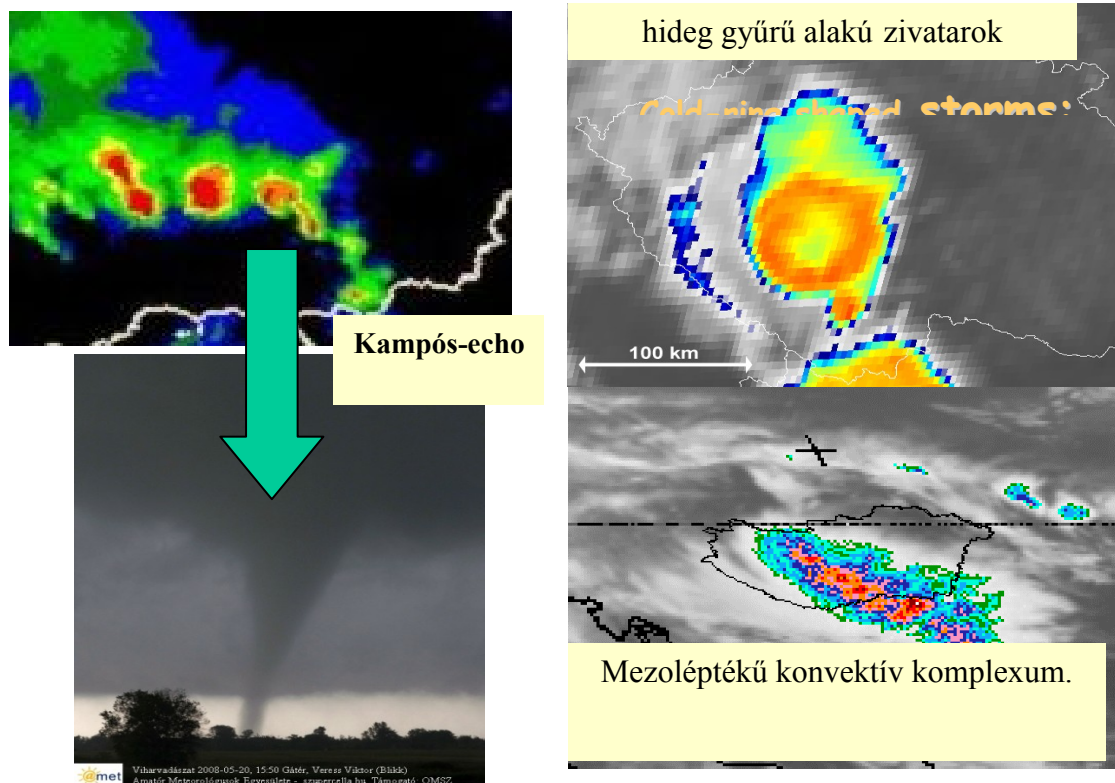
A hazai szinoptikus klimatológiai vizsgálatok és döntési eljárások ismertetése előtt meg kell említenünk, hogy ezeket minden országnak saját magának kell elvégeznie. A szinoptikus-klimatológiai sajátosságok rögzítésének és továbbadásának legegyszerűbb formája az, amikor a szinoptikusok a hosszú évek szolgálata alapján tapasztalatokat szereznek (pl. déli szélre Sopron érzékeny, az északkeleti országgrészben a hidegpárna csak erős hidegfrontok esetén szakad fel, stb.), és ezeket egymásnak szóban átadják. A szóbeli közlésnél hasznosabb, ha ezeket különböző tanulmányokban rögzítik. A szakma szempontjából a részletes, évtizedekre visszatekintő statisztika elvégzése, és ez alapján döntési eljárások kidolgozása a legcélravezetőbb. Ilyenkor leggyakrabban azt vizsgáljuk meg, hogy valamilyen (veszélyes) időjárási jelenség milyen szinoptikus helyzetekben fordul elő leggyakrabban. Ezek meglehetősen munkaigényes vizsgálatok, de a vizsgálatokra alapozva az esettanulmányoknál megbízhatóbb következtetések vonhatók le! Erre példa a balatoni viharjelzésnél évek óta használt összefüggés, amely kapcsolat teremt a Sopron-Budapest légnyomás gradiens és a Balatonnál előforduló maximális szellőkések között. A másik példa, amikor egy hosszabb statisztika alapján a csapadék halmazállapot-változása és az 1300 m-es RT 850/1000 között találunk kapcsolatot: az 1300 m jól elválasztja a folyékony és a szilárd csapadékot (*Hirsch*, 2000).

A meteorológiai előrejelzéseknél használt módszerek egymásra hatása

A fentiekben felsorolt előrejelzési módszerek egymásra is hatnak, és ha különböző mértékben is, de mindegyikük hasznosul a különböző időtávú prognózisoknál. Korábban már említettünk néhány példát arra, hogy a műholdképek hogyan hasznosíthatók a hagyományos frontanalíziseknél. A 2. ábrán olyan eseteket szemléltetünk, amelyek meggyőzően bizonyítják, hogy a műholdas, illetve a radar információk jelentősen hozzájárulhatnak az analízisek sikeréhez, illetve a különböző meteorológiai objektumok felismeréséhez és pontosabb leírásához (*Putsay*, 2006). Az ábrán a műhold- és a radarképek segítségével olyan speciális alakzatok határozhatók meg (pl. MKK – Mezoléptékű

Konvektív Komplexum, vagy az ún. hideg gyűrű alakzatok), melyekhez különösen intenzív zivatarok, illetve heves csapadéktermékenység, vagy a kampós echo esetében, labilis légrétegződés mellett akár tornádó is kapcsolódhat.

Ebbe a sorba tartozik az a viszonylag új gyakorlat is, amely a francia *P. Santurette* nevéhez fűződik (*Santurette és Joly, 2002*). Ennek lényege, hogy a műholdas vízgőz felvételek alapján azonosítják a nagy potenciális örvényességgel (PV), illetve annak megváltozásával jellemzett területeket (3. ábra), és ezeket a talajszinoptikus térképeken a hagyományos frontanalízissel együtt ábrázolják. Ezeknek a területeknek a meghatározása azért lehet fontos, mert a dinamikus tropopauza ugrásszerű csökkenése következtében a térségben lekeveredik a nagy PV-vel rendelkező levegő, amely a peremciklonok aktivizálódását okozhatja.

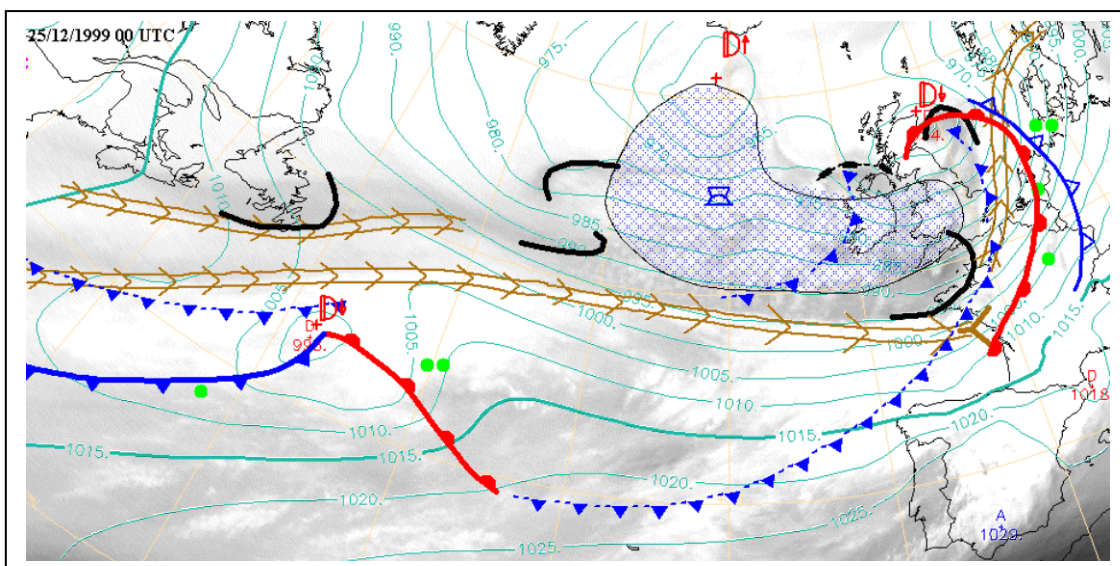


2. ábra. Néhány példa a műhold-, illetve a radarképeken azonosítható speciális objektumokra.

A távérzékelési eszközök által nyújtott információkat közvetlenül a nowcasting és az ultrarövidtávú előrejelzéseknél használjuk, de a modellek révén ezek hasznosulnak a többi időtávú előrejelzésnél is. A modellekben ugyanis egyre fontosabb bemenő információt jelentenek a műholdas adatok. Míg korábban (az 1990-es évek közepén) a hagyományos mérő állomásokkal gyéren ellátott déli félgömbön lényegesen rosszabb volt az ECMWF modell bevétele, addig manapság az egyre bővülő műholdas információk felhasználásával alig van eltérés a két félgömbön a modellek bevételeiben.

Az 4. ábrán látható esettanulmány szerint az ECMWF modell az összcsapadék döntő részét hó formájában jelezte előre (ld. az ábra jobb oldalát), így Budapesttől nyugatra is szilárd halmazállapotú csapadékkal számolt. Az ábra bal oldalán a tényleges

csapadék és a modell által előrejelzett 1300 m-es $RT_{850/1000}$ látható. Ahogy a fentiekben utaltunk rá, *Hirsch* (2000) munkájában egy hosszabb statisztika alapján megállapította, hogy az 1300 m-es $RT_{850/1000}$ hazánk viszonyai között jól elválasztja a folyékony és a szilárd halmazállapotú csapadékot. Az ábra szerint jelen esetben is segített a szinoptikus klimatológia, ugyanis a modell nagyobb területre adott havat, mint ahogy az a valóságban bekövetkezett, hiszen például Győr térségére is szilárd halmazállapotú csapadékkal számolt. A modell által előrejelzett 1300 m-es $RT_{850/1000}$ vonal segítségével felül lehetett bírálni a modellnek ezt az előrejelzését, és így a szinoptikus az említett szinoptikus-klimatológiai vizsgálat felhasználásával a halmazállapot előrejelzésre pontosabb prognózist adhatott.



3. ábra. *P. Santurette (Meteo France) által javasolt analízis: műholdas vízgőz felvételek alapján azonosítják a nagy potenciális örvényesség (PV) megváltozásával jellemzett területeket (vastag fekete vonalak, és ezeket a talajszinoptikus térképeken a hagyományos frontanalízissel együtt ábrázolják.*

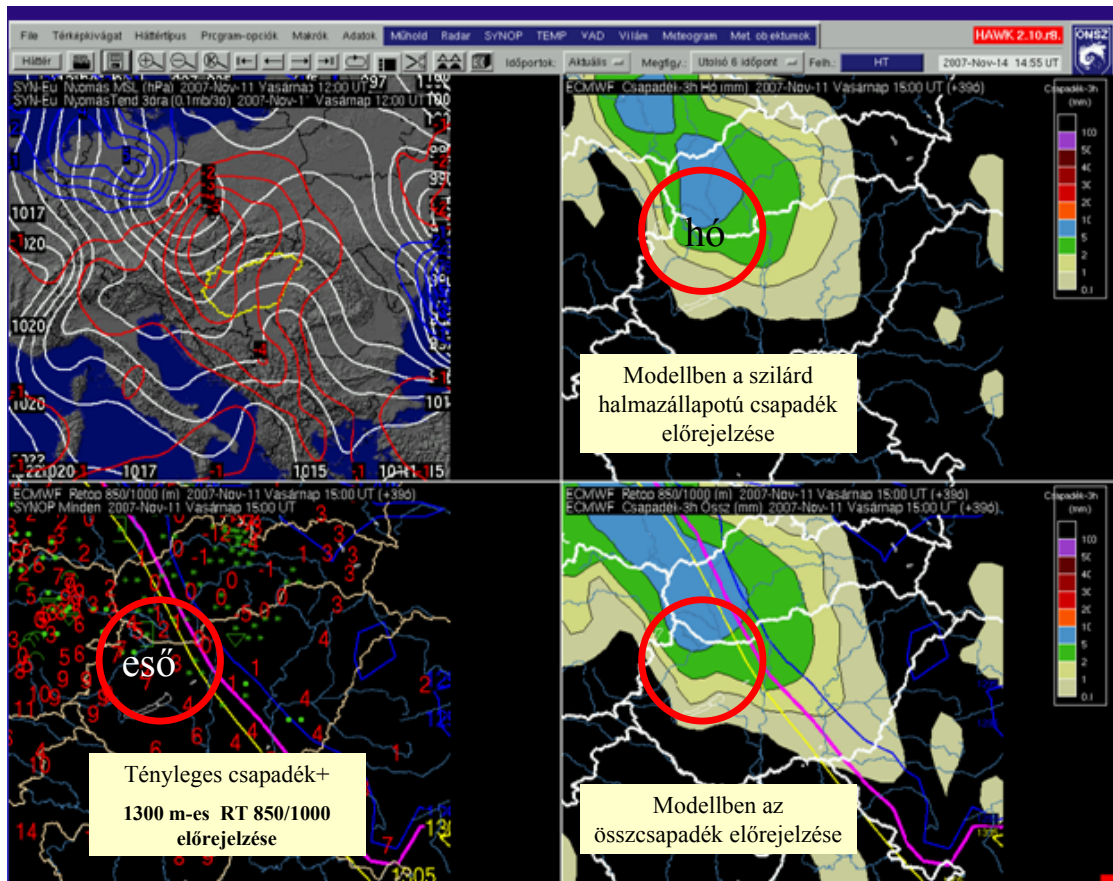
A következő példa azt mutatja be, hogy a szinoptikus klimatológiai kutatások és a modellek eredményeinek együttes felhasználása különösen hatékony lehet az előrejelzések készítésénél.

A technikai fejlődés szerepe a szinoptikus munkában

Nyilvánvaló, hogy a meteorológiai előrejelzések bevalásának a javulását döntő mértékben az egyre megbízhatóbb előrejelzéseket szolgáltató modellek okozzák. A sikeres előrejelzésekben az említetten kívül azonban más tényezők is szerepet játszanak. A technika fejlődése és a meteorológus szakemberek fejlesztése révén az elmúlt évtizedekben az előrejelzési munka jelentős részét sikerült automatizálni, így pl. a hagyományos szinoptikus térképek előállítását teljes mértékben, analizálását 90%-ban. A szolgáltatások terén ugyancsak jelentős automatizálás történt. Néhány évtizeddel korábban a mostaninál

lényegesen kevesebb számú és kisebb tartalommal rendelkező megrendelést gyakorlatilag egyenként, minden egyes szerződést külön-külön legépelve készítettünk. Ma a médiás szolgáltatásokat nem számítva, a szerződések kb. 50%-a teljesen automatikusan kerül el a megrendelőkhöz, s jelentős részük csak kisebb szinoptikus beavatkozást igényel.

Az előzőekben említett automatizálás több szempontból is pozitívan hat az előrejelzések minőségére, bevalására. Mindenekelőtt azért, mert ezáltal lényegesen több ideje és energiája marad a meteorológusnak a szakmai munkára.



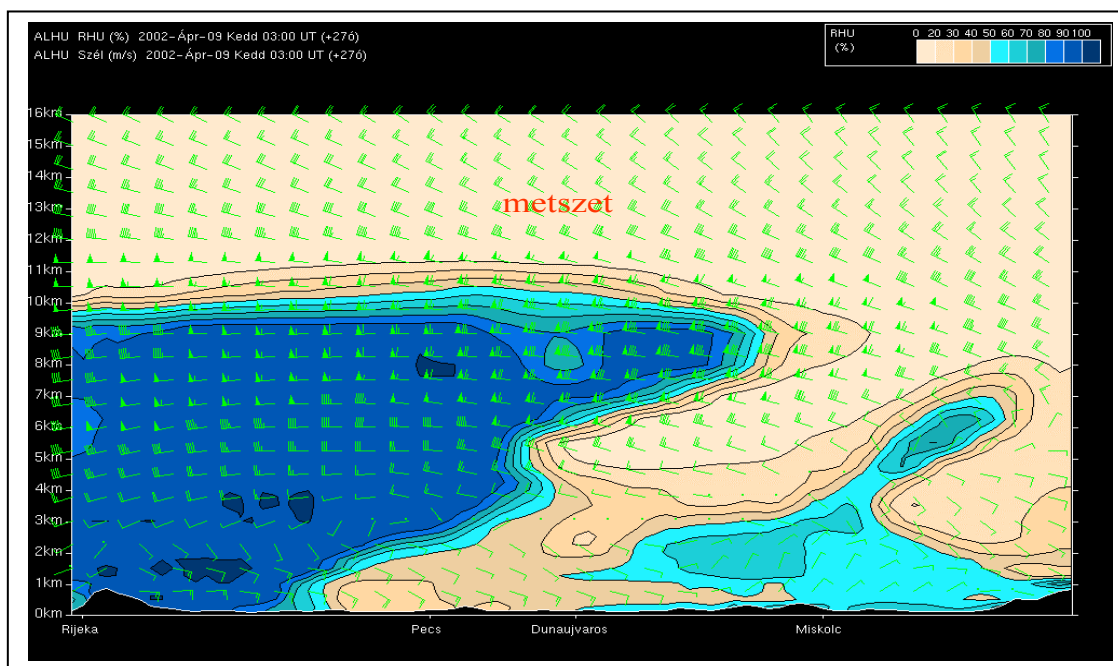
4. ábra. A szinoptikus-klimatológia kombinálása a modell előrejelzésekkel hasznos lehet az előrejelzési gyakorlatban. Az ECMWF modell nagyobb területre adott havat, mint ahogy az a valóságban bekövetkezett. A modell által előrejelzett 1300 m-es $RT_{850/1000}$ vonal segítségével felül lehetett bírálni a modell előrejelzését, és így a szinoptikus a szinoptikus-klimatológiai vizsgálat felhasználásával a halmazállapot előrejelzésre pontosabb prognózist adhatott.

Fontos szempont az is, hogy az automatizálás következtében a megjelenítő rendszerek fejlesztése révén, lényegesen több és a korábbiaknál összetettebb mezők, ábrák segítik a légkörben lejátszódó és a modellek által prognosztizált folyamatok megértését. Erre látunk példát az 5. ábrán, ahol a relatív nedvesség és a szél vertikális eloszlását követhetjük nyomon az ALADIN modell előrejelzései alapján a talajtól egészen a 16 km magasságig. A technikai fejlődéssel kapcsolatban érdemes megemlíteni, hogy miközben az 1980-as években, amikor még kézzel rajzolták a modellekből kinyert elő-

rejelzési mezőket, a szinoptikusok kb. 50–80 előrejelzési mezőt tudtak áttekinteni, addig ma a megjelenítő rendszer segítségével időjárási helyzet függvényében akár 1000-nél is több mezőt is ki tudnak értékelni.

A szinoptikus javít a modell rövidtávú előrejelzésén

A modellek beválása ugyan évről évre javul, de jelentős áttörésről az utóbbi években nem beszélhetünk. Különösen az ultrarövid- és rövidtávú előrejelzéseknél tűnik a szinoptikusok számára úgy, hogy az utóbbi években a modellek javulása lelassult. Például az inverziós helyzetek kezelésében szinte alig, a konvektív csapadék előrejelzésében is csak igen kismértékű javulást láttunk. Mindenesetre az elmúlt évek hazai verifikálási tapasztalatai egyértelműen bizonyítják, annak ellenére, hogy a modellek alapján, viszonylag finom időbeli és térbeli felbontásban, gyakorlatilag minden időjárási elem előrejelzése előáll, az előrejelző szakember ezeken az előrejelzéseken jelentősen tud javítani. A javítás mértéke erősen függ az időjárási helyzettől.



5. ábra. A relatív nedvesség és a szél vertikális eloszlása az ALADIN modell előrejelzése alapján a talajtól 16 km magasságig.

Az alábbiakban összefoglaljuk ennek okait:

- Az aktuális időjárási helyzet birtokában a szinoptikusok felülbírálják a modellek eredményeit: A rövidtávú előrejelzések készítésénél előfordul, hogy a modell már az első időlépcsőkben hibás, például kevesebb nedvességet (felhőt) ad, mint amennyi a valóságban van. Ilyenkor indokolt felülbírni a modellt, hiszen a nedvesség alábecslése miatt nyilvánvalóan a nedvesség előrejelzés is korrekcióra szorul.

- A szinoptikusok tapasztalataikra építve, bizonyos időjárási helyzetekben felülbírálják a modellek eredményeit. A folyamatos verifikálás és saját tapasztalataik alapján megismerik a modellek viselkedését, amely erősen függ az időjárási helyzettől. Például az ALADIN modell verhetetlen a szél előrejelzésben, miközben az ECMWF előrejelzése megbízhatóbb a hőmérséklet vonatkozásában. A téli félévben az inverziós helyzetekben egyik modell előrejelzése sem megbízható (alulbecsülik az alacsony-szinti felhőzetet és felülbecsülik a hőmérséklet napi ingását), ugyanakkor az OMSZ-nál használt két alapmodell közül az elmúlt télen az ALADIN mutatkozott jobbnak (*Bonta és Hirsch, 2008*). Nyári időszakban, leszámítva a tartósan felhős csapadékos időszakokat, minden modellre (beleértve az GFS-t is) jellemző, hogy a hőmérsékleti minimumot fölé, a maximumot pedig alábecsülik.
- A modellek nem mindig fogják meg egy adott térség szinoptikus-klimatológiai sajátosságait. Erre is számtalan példa van, az alábbiakban néhány: hazánk szinoptikus-klimatológiai sajátossága, hogy a kevésbé felhős, szélcsendes éjszakákon az Alföld középső és délkeleti része, a Dunántúl délnyugati vidéke (Nagykanizsa környéke), valamint Szécsény, Zabar térsége lényegesen, gyakran több fokkal hidegebb, mint a környezete. Hasonló speciális szinoptikus-klimatológiai sajátosság, hogy Sopron és környéke igen érzékeny a déli szélre, vagy hogy az ország északkeleti vidékén különösen makacs tud lenni a hidegpárna (télen az alsóbb légrétegekben megrekedő nyirkos, hideg levegő).
- Különböző kezdeti feltételekkel futtatott (ensemble technika) vagy több modell együttes használata már rövidtávon is hozzájárulhat a sikeres előrejelzéshez. Ezzel kapcsolatban meg kell jegyeznünk, hogy az OMSZ feltétlenül előnyben van azokkal szemben (pl. magáncégek), akik csak egy-egy modellt tudnak felhasználni. A több modell együttes használatára jó példa az ún. SRNWP-PEPS rendszer, amely egy európai rövidtávú multi-modell ensemble előrejelző rendszer. A PEPS mozaikszo jelentése: „Poor man's Ensemble Prediction System”, amely arra utal, hogy ezúttal az ensemble rendszer tagjait a résztvevő országok operatív (determinisztikus) előrejelzései alkotják.

Az ensemble technika alkalmazása a középtávú előrejelzéseknél

A középtávú előrejelzések készítésénél évről évre nagyobb figyelmet fordítunk az ensemble előrejelzésekre, különösen azokban az esetekben, amikor a determinisztikus modell eredményei jelentősen eltérnek az EPS átlagtól. A talajra és az 500 hPa-ra vonatkozó spagetti diagramok, a Magyarország több körzetére vonatkozó fáklya diagramok, az EPS meteodiagramok, valamint a csapadék valószínűségi mezők ma már elengedhetetlen kellekei a több napos előrejelzéseknek. A külföldi tapasztalatok szerint is a negyedik, ötödik napot követően a prognózisokat célszerű az ensemble átlagra alapozni, annak ellenére, hogy a determinisztikus modellnek jelenleg kétszer olyan finom a felbontása, mint az ensemble tagoknak.

A középtávú prognózisokkal kapcsolatos, hogy az előrejelzések készítésénél egyre inkább használjuk a klasztereket is. Ezek segítségével bizonytalan időjárási helyzetekben különböző meteorológiai forgatókönyvek prognosztizálhatók. 2008-ban továbbfejlődött a klaszterezési technika. Eddig a klaszterezés időpontja a +5. napi előrejelzés (120 órás) volt. A fejlesztések eredményeként a +8. napi (192 órás) időpontra is

készül klaszterezés. Miközben a korábbi akkor célszerű alkalmazni, ha a fákyadiagram alapján a modell előrejelzésében 120 óra környékén van a legnagyobb bizonytalanság, addig az új klaszterezést akkor, ha a 192 órás előrejelzésnél nagyobb a bizonytalanság.

Összefoglalva, az ensemble előrejelzéseknek a következő előnyei vannak:

- Átlagosan a negyedik naptól kezdve az ensemble előrejelzések átlaga már jobb eredményt ad, mint a finomabb felbontású determinisztikus modell. A napok múlásával a beválás tekintetében növekszik a különbség az EPS átlag és a determinisztikus modell között.
- Az EPS segítségével előrejelezhető a középtávú prognózisok megbízhatósága. Ez ugyanis nem csak attól függ, hogy hányadik napra vonatkozik az előrejelzés.
- A különböző valószínűségi előrejelzési mezők segítségével prognosztizálható a különböző extrém jelenségek előfordulásának az esélye is.

Az ensemble előrejelzések használatának egyik legnagyobb problémája, hogy viszonylag nehéz ötvözni az ensemble előrejelzések által nyújtott valószínűségi információkat a partnereink és a szinoptikusok által egyaránt megszokott determinisztikus szemlélettel.

A szinoptikus javít a modell középtávú előrejelzésén is

A szinoptikusok a középtávú előrejelzések esetében is javítanak a modellek, pontosabban a determinisztikus modellek eredményein. A javítás mértékének bemutatására tekintünk az Időjárás Előrejelző Osztályon használt ún. komplex mutatót. Ez egy verifikációs mérőszám, amelyben verifikált időjárási elemek beválását súlyozva vesszük figyelembe. Minél magasabb a mérőszám, annál jobb az előrejelzés. Amennyiben a szinoptikusok által készített prognózisok komplex mutatójából kivonjuk az ECMWF modellből előálló prognózis komplex mutatóját, akkor megkapjuk a szinoptikus javítás mértékét. A javítás mértéke 2005-ben 1,1 és 2,8% között, 2007-ben pedig 3 és 4,2% között változott, tehát az elmúlt években a szinoptikus javítás mértéke még kissé növekedett is. A javítás minimuma évek óta a második, harmadik nap környékén van, később az ensemble előrejelzések használatával növekszik a javítás mértéke a determinisztikus modellhez képest. Az alábbiakban felsoroljuk ennek legfontosabb forrásait:

- középtávon is figyelembe vesszük a szinoptikus-klimatológiai sajátosságokat (pl. inverzió),
- több más (német, amerikai) modellt is használunk,
- egyre jobban alapoznak az ensemble előrejelzésekre,
- kiszűrjük a modellek naponta bekövetkező ingadozásait (a determinisztikus modellek jobban, az ensemble átlag kevésbé ingadozik).

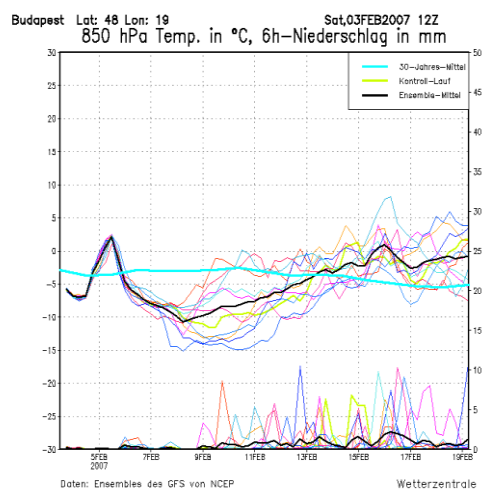
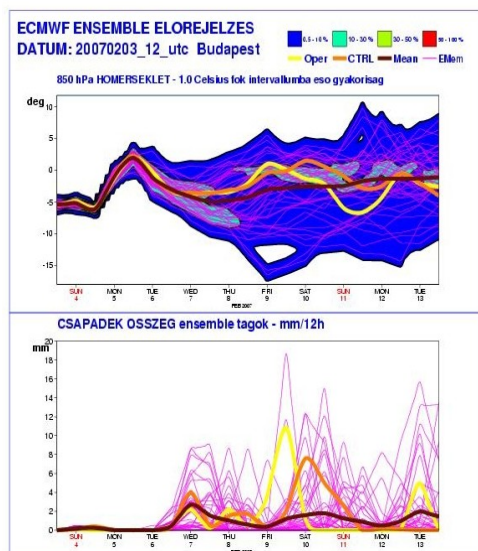
Esettanulmány

Az alábbiakban egy esettanulmány segítségével (*Bonta, 2008*) mutatjuk be egyrészt azt, hogy az EPS produktumokat hogyan hasznosítjuk a középtávú előrejelzéseknél, másrészt foglalkozunk azzal a kérdéssel, hogy a valószínűségi információk hogyan építhetők be a prognózisokba. Az EPS használatának egyik legnagyobb problémája, hogy vi-

szonylag nehéz ötvözni az ensemble előrejelzések által nyújtott információkat a determinisztikus szemlélettel. Ez azért probléma, mert miközben a nagyközönség és a partnereink minél konkrétabb prognózist szeretnének kapni, addig az ensemble előrejelzések alapján szakmailag korrekt módon csak valószínűségi előrejelzéseket lehet készíteni.

2007. február 9-én kifejezetten enyhe, tavaszi, de csapadékos idő volt hazánkban. Eleinte sokfelé esett az eső, a lehulló csapadék mennyisége 2–5 mm között volt, majd felszakadozott a felhőzet, és néhány órára kisütött a nap. A hőmérséklet csúcstértéke 7 és 12 fok között alakult, a 850 hPa-os szinten délben 0, –1 fokot mértek.

A 6. ábrán a 2007. február 3-án 12 UTC-kor futtatott ECMWF modell fáklyadiagram előrejelzése látható, amely jól mutatja, hogy a hatodik nap környékén (február 9-re) a futtatások többsége enyhe időt ad 0 fokhoz közeli 850 hPa-os hőmérséklettel. A futtatások kb. 20%-a ugyanakkor a többitől eltérően hideget jelez előre –10 fok alatti 850 hPa-os hőmérséklettel. A 7. ábrán az ECMWF determinisztikus, a német (DWD), a legnagyobb elemszámú 1-es és a kisebb elemszámú 2-es klaszter reprezentatív tagjainak a hatodik napra vonatkozó előrejelzése látható. Az ECMWF determinisztikus és a német modell, valamint a nagyobb klaszter előrejelzése elég hasonló – mindhárom erőteljes déli, délnyugati áramlással ciklonális helyzetet, sok csapadékot és enyhe időt ad 0 fok körüli 850 hPa-os hőmérséklettel.



6. ábra. 2007. február 3-án 12 UTC-kor futtatott ECMWF modell (bal oldalon) és az amerikai modell (jobb oldalon) fáklyadiagram előrejelzése.

Ugyanakkor a kisebbségben lévő 2-es klaszter egy térségünktől északkeletre elhelyezkedő anticiklont prognosztizál, amelynek peremén igen hideg, szibériai eredetű levegő érkezne a Kárpát-medence fölé. Ebben a változatban a 850 hPa-os szint hőmérséklete – 11 fok körül van. Az amerikai modell determinisztikus változata, csakúgy mint a modell futtatásainak többsége az ECMWF szerint kisebbségben lévő hidegebb változatot támogatja (6. ábra). Az amerikai determinisztikus modell például a szóban forgó napra a 850 hPa-os szintre –10 fokot jelzett előre, és a modell nyomási képe is nagyon hasonló az ECMWF 2-es számú, kisebbségben lévő klaszteréhez. Az esettanulmány szép példa arra, hogy amikor a két modell az ötödik napon túl jelentősen eltér egymástól, akkor a

nemzetközi verifikálások szerint célszerű inkább az ECMWF modellt előny-be részesíteni, amelynek előrejelzése a hatodik napra sokkal közelebb állt a valósághoz.

Az esettanulmányal kapcsolatban érdemes átgondolnunk, hogy a fenti EPS produktumok birtokában milyen előrejelzést adott a szinoptikus, illetve milyen adott volna, ha a partnerek és a nagyközönség jobban elfogadná a valószínűségi információk használatát. Tekintettel arra, hogy az ECMWF modell nagyobb klasztere és a determinisztikus modell is az enyhe csapadékos forgatókönyvet támogatta, a szóban forgó napra a prognózis az alábbiak szerint szólt: *többnyire erősen felhős idő várható, többfelé esővel, záporral. Az 5 mm-es csapadék valószínűsége 10 %. A legmagasabb nappali hőmérséklet 5 és 10 fok között valószínű.*

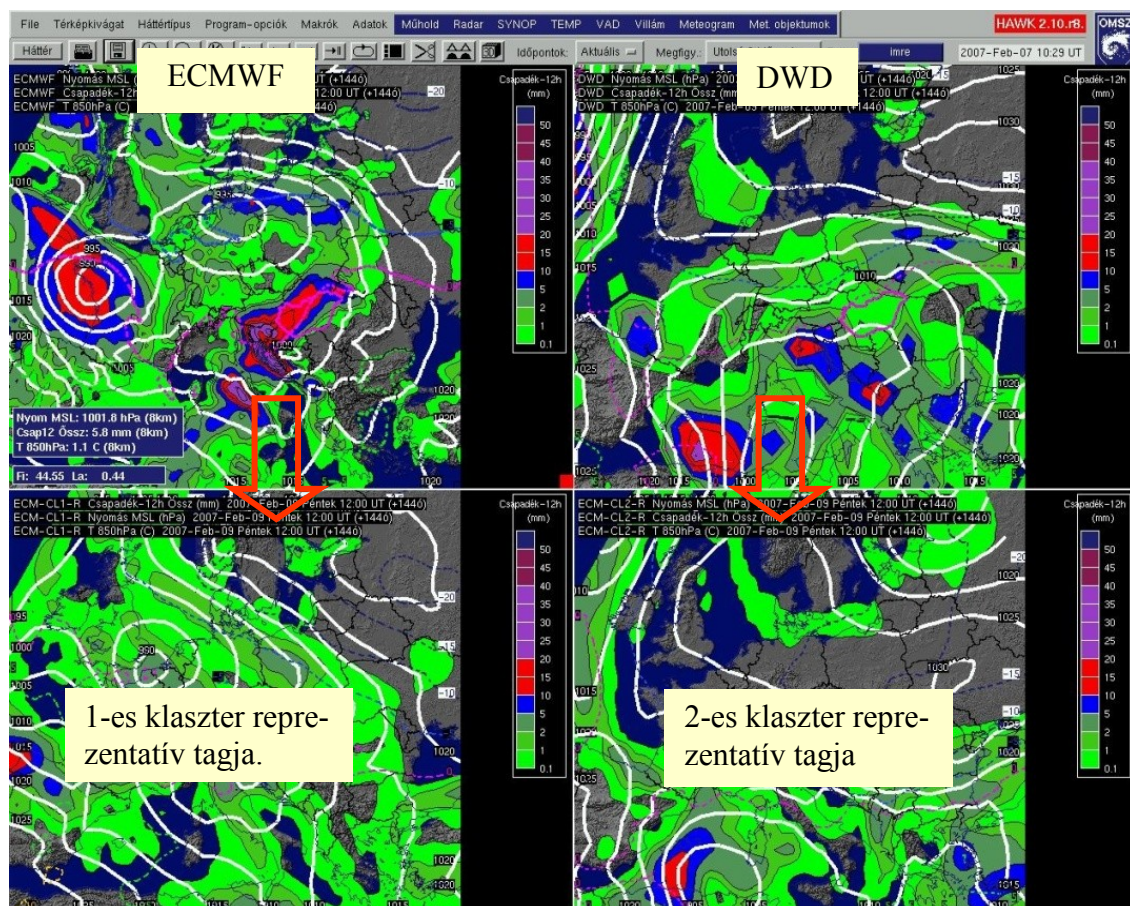
Ez a prognózis alapvetően determinisztikus jellegű, kivéve a csapadékmennyiséget, ahol megjelenik a valószínűségi információ. A tényleges időjárás ezen a napon a következő volt: *többnyire erősen felhős volt az ég, sokfelé esett az eső, zápor-eső. A lehullott csapadék mennyisége többnyire csapadéknyom és 7 mm között változott. A csúcshőmérséklet 6 és 12 fok között alakult.* A fentiek alapján megállapítható tehát, hogy a szinoptikus jól döntött, amikor a legnagyobb klaszter, illetve a futtatások 80%-a alapján készítette a prognózist. Felvetődik ugyanakkor az a kérdés, hogy ilyen esetben szakmailag nem korrektebb megoldás-e a prognózisainkban szerepeltetni annak a lehetőségét is, hogy kb. 20% esélye volt egy lényegesen hidegebb és száraz időjárás kialakulásának. Ez alapján a következőképpen lehetett volna megfogalmazni a prognózist: *80% a valószínűsége annak, hogy többnyire erősen felhős idő lesz, többfelé esővel, záporral. A legmagasabb nappali hőmérséklet 5 és 12 fok között valószínű. 20% a valószínűsége annak, hogy kevés felhő, napos idő lesz, és a legmagasabb nappali hőmérséklet mindössze 0 fok körül alakul.*

A valószínűségi információk különösen indokoltak akkor, ha az EPS szerint nagyon bizonytalan az előrejelzés. Gondoljunk egy olyan hipotetikus, de a gyakorlatban az ötödik napon túli előrejelzéseknél, ha ritkán is, de előforduló esetre, amikor a futtatások egyik fele nagy csapadékot, a másik fele száraz időt jelez előre. Ilyenkor szakmailag az a legkorrektebb megoldás, ha azt prognosztizáljuk, hogy csapadék valószínűsége 50%. Az ilyen előrejelzést viszont sem a nagyközönség, sem az ügyfelek nem fogadják szívesen. A jövőben mindenképpen célszerűnek tűnik, legalább az ötödik és a hatodik napot követően növelni a valószínűségi jellegű információt.

Összefoglalás

A fenti tanulmányban a rövid- és a középtávú előrejelzésnek az elmúlt években meghonosodott új módszereit emeltem ki. A hagyományos szinoptikus módszerek szerepe ugyan visszaszorult, de a kiindulási időjárási helyzet pontos ismerete mind a mai napig elengedhetetlen feltétele a megbízható prognózisnak. Ehhez egyre inkább hozzájárulnak a távérzékelési eszközök, amelyek segítségével olyan speciális alakzatok, objektumok azonosíthatók, amelyek nagymértékben elősegítik a légkörben lejátszódó folyamatok megértését. Az időjárási helyzet pontos diagnózisával kapcsolatban a jövőben fontos lenne további új diagnosztikai paraméterek használata. Anyagunkban kiemeltük a hazai szinoptikus klimatológiai feldolgozások fontosságát is, amelyek különösen akkor hasznosak a gyakorlatban, ha azokat a modellek eredményeivel kombináljuk. Utaltunk arra is, hogy a technikai fejlődés és a szolgáltatások terén bekövetkező automatizálás (első-

sorban a mezőszervesítés) miatt egyre több idő marad a tényleges szakmai munkára, ami feltétlenül hozzájárul a prognózisok színvonalának emelkedéséhez.



7. ábra. Az ECMWF determinisztikus, a német (DWD), a legnagyobb elemszámú 1-es és a kisebb 2-es klaszter reprezentatív tagjainak a hatodik napra vonatkozó előrejelzése. A modellek futtatásának időpontja 2007. február 3. 12 UTC.

Annak ellenére, hogy a számítógépes előrejelzések bevétele évről évre javul, a szinoptikusok elsősorban tapasztalataikra alapozva minden időtávban javítanak a modellek eredményein. Fontos azonban megjegyeznünk, hogy az utófeldolgozási eljárások operatív szolgálatban történő alkalmazásával csökkenthető lenne a szinoptikus javítás mértéke. Az ensemble előrejelzések egyre szélesebb körű használatával kapcsolatban hangsúlyozzuk, hogy a jövőben fontos feladat lesz a valószínűségi információk beépítése az előrejelzési szövegekbe, produktumokba. Erre jó példát mutat az OMSZ-nál 2009-ben bevezetésre kerülő új 10 napos kiadvány, amely fáklya diagramokat és valószínűségi előrejelzési mezőket is tartalmaz.

Irodalomjegyzék

Bonta, I. és Hirsch, T., 2008: Hidegpárna: a helyzet változatlan, *Légtér* **53**(1), 12–14.

- Bonta, I., 2008: *The model performance of 2 m temperature*.
www.ecmwf.int/newsevents/meetings/forecast_products_user/Presentations2008/index.html
- Hirsch, T., 2000: Synoptic-climatological investigation of weather systems causing heavy precipitation in winter in Hungary, *Időjárás*, **104**(3), 173–196.
- Maddox, R.A., 1980: Mesoscale convective complexes, *Bul. Am. Met. Soc.* **61**, 1374–1387.
- Putsay, M., Szenyán, I. and Simon, A., 2006: Case study of Mesoscale Convective Systems over Hungary on 29 June 2006 with satellite, radar and lightning data, *Atmospheric Research* (2008), doi:10.1016/j.atmosres.2008.10.026.
- Santurette, P. and Joly, A., 2002: ANASYG/PRESYG, Meteo-France's news graphical summary of the synoptic situation, *Meteorol. Appl.* **9**, 129–154.

Az előrejelzések beválása, szinoptikus-klimatológiai vizsgálatok

Hirsch Tamás

Országos Meteorológiai Szolgálat, Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztály
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1., e-mail: hirsch.t@met.hu

Összefoglaló – A prognózisok beválásának értékelése fontos szerepet játszik az előrejelzések gyakorlati felhasználhatóságának meghatározásában és a fejlesztési irányok kijelölésében. Az előrejelzések beválását különféle – matematikai módszerekkel meghatározott – mérőszámokkal jellemezzük. Az objektív verifikáció mellett fontos szerepet kell, hogy kapjon a szubjektív értékelés is. Így az objektív módszerektől eltérő szempöngből ítélhetjük meg a prognózisok beválását. Egy jól felépített, részletes verifikációs rendszer kijelöli a numerikus időjárás előrejelző modellek legfontosabb hiányosságait, ezáltal továbbfejlesztésük fő irányát. Az előrejelzések verifikálása jelentös segítséget nyújt a szinoptikusoknak az operatív munka minél magasabb színvonalú ellátásában, illetve saját teljesítményük megítélésében, és egyben megadja azokat a határokat, amelyek közt – a mai tudásunknak megfelelően – előrejelzések készíthetők és szolgáltathatók rövid, közép és hosszú időtávra.

Az előadás másik témaköre a szinoptikus-klimatológiai vizsgálatokat öleli fel, amelyek szinoptikus skálájú folyamatok, illetve időjárású rendszerek hosszabb időszakra vonatkozó, így jelentös számú esetet feldolgozó elemzéseit jelenti. E kutatások új ismereteket adnak a vizsgált szinoptikus skálájú folyamatokról, amelyeket közvetlen modell outputokkal kombinálva jelentös mértékben javíthatják a ritkán bekövetkező, így a modellek által nehezebben prognosztizálható időjárású események előrejelzését. Különösen fontosak lehetnek a szinoptikus-klimatológiai ismeretek olyan területekre vonatkozóan, mint pl. a szinte minden oldalról hegyekkel körülvett Kárpát-medence, amely jelentös mértékben befolyásolhatja az időjárású rendszerek áthelyeződését, kialakulását, fejlődését, illetve gyengülését.

Az előadás ábrái megtalálhatók az OMSZ honlapján:

http://www.met.hu/omsz.php?almenu_id=omsz&pid=metnap34&pri=0&mpx=1

A meteorológiai előrejelzések szerepe a honvédelemben, A NATO meteorológiai támogatási rendszere

Kovács László

MH Geoinformációs Szolgálat, 1024 Budapest II., Szilágyi Erzsébet fasor 7-9.

Összefoglaló – A történelem sokszor bebizonyította, hogy a meteorológiai viszonyok és a légkör különböző jelenségeinek következtében néha a nagyon gyorsan változó környezet hatásainak figyelmen kívül hagyása, vagy nem megfelelő értékelése a katonai műveletek kimenetelére katasztrofális hatással lehet. A mind tökéletesebb harci eszközök és felszerelés ellenére az időjárás, mint befolyásoló tényező napjainkban sem kiküszöbölhető a katonai műveletek tervezése és végrehajtása során. A magyar haderő NATO csatlakozásunk óta új kihívásokkal kell, hogy szembenézzen. A NATO szövetségi rendszerében több nemzet katonái, alegységei hajtják végre együtt feladataikat. Annak érdekében, hogy ugyanazon hadszíntéren települt csapatok parancsnokai ne hozhassanak egymásnak ellentmondó döntéseket a részükre szóló meteorológiai előrejelzéseket is egységesíteni („uniformizálni”) kell. A cikkben ismertetem a „Unified Weather Forecast (UWF)” fogalmát és felépítését, kitérek a Harcászati Döntéshozatal Támogató algoritmusok alkalmazására, és bemutatom a NATO Integrált Meteorológiai és Oceanográfiai Támogatási koncepcióját.

Előzmények

Annak érdekében, hogy NATO jelenleg alkalmazott meteorológiai és oceanográfiai támogatási rendszerét megértsük, röviden összefoglalom azokat a fontosabb eseményeket, előzményeket, a katonapolitikai környezet ama változásait, melyek szükségessé tették a támogatás végrehajtásának szakmai értelemben vett erős leszábralyozását.

A NATO (North-Atlantic Treaty Organization) 1949. április 4-én 10 állam részvételével jött létre, alapvetően védelmi szervezetként. Ennek markáns bizonyítéka a híres 5. cikkely, amely a kollektív védelemről szól. Az NSZK 1955-ös felvételét követően, még ugyanabban az évben létrejött a Varsói Szerződés (VSZ), mellyel egy 1989-ig tartó hidegháborús időszak vette kezdetét. Ezt az időszakot a fegyverkezési hajszája és az erőfitogtatás jellemezte.

Ebben a geopolitikai környezetben szövetségi szinten nem tartották szükségesnek, hogy beavatkozzanak a műveletek meteorológiai támogatásába. A legkézenfekvőbb megoldásnak a nemzeti erőforrások bevonását tekintették. Maga a NATO vezetési struktúrája tartalmazott ugyan támogató elemeket, de ezek alapvetően a befogadó nemzeti támogató elemek bázisán működtek.

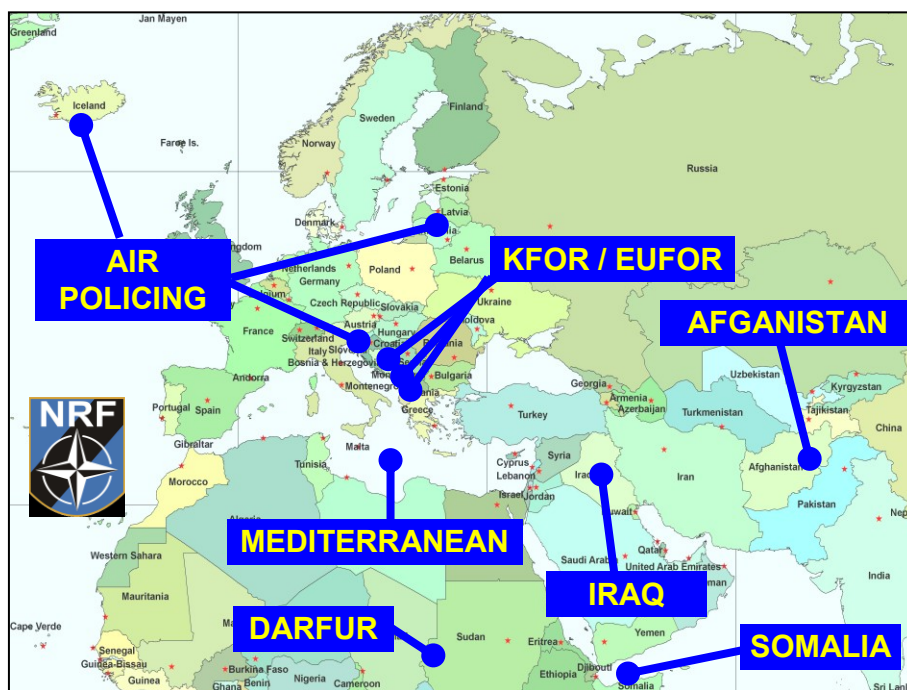
A közép- és kelet-európai rendszerváltozásokat, valamint a Varsói Szerződés blokkjának szétesését követően a NATO légüres térbe került. Több korábbi VSZ-es állam is szándékát fejezte ki a NATO-hoz történő csatlakozásra. Ezzel egy időben az egyre fokozódó etnikai rivalizálás destabilizálta a Balkánt. A NATO a kialakuló válság-gócok felszámolása érdekében változtatott addigi stratégiáján és kiterjesztette azt a válságreakgáló, ún. non-Article 5, műveletekben való részvételre is.

NATO erők kerültek bevetésre először Bosznia-Hercegovinában, majd Koszovóban. A Világkereskedelmi Központ New-York-i ikertornyai elleni terrortámadás után a terrorizmus elleni harc jegyében NATO erők kerültek bevetésre Afganisztánban, majd Irakban is. A NATO jelenleg 7 misszióban vesz részt (*1. ábra*).

Miközben a békevezetési struktúra a hidegháborút követően lényegesen karcsúsodott, addig a harcoló csapatok létszáma 0-ról 54 000-re növekedett. A válságreagáló műveletek a korábbi stratégia megváltoztatását vonták maguk után. A stratégia változása hatással volt a doktrinális elvekre, illetve ezen keresztül a műveleti tevékenység teljes feltételrendszerére. Az új helyzetre tekintettel a NATO műveletek meteorológiai támogatásának alapelveit is újra kellett gondolni.

A hidegháborús időszakban a NATO hadereje „jól ismert” környezeti feltételek között végezhetette tevékenységét, hiszen alapvetően saját érdekszféráján belül hajtotta végre feladatait. A válságócok azonban a NATO felségterületein kívül találhatóak, a műveleti területeket általában összeomlott, vagy nagyon leromlott helyi infrastruktúra jellemzi. Ezeket a területeket meteorológiai szempontból az adatellátottság, illetve a helyi támogató rendszerek hiánya sújtja. Ilyen körülmények között a NATO hadereje nem támaszkodhat a befogadó nemzeti támogatásra, de legalábbis hosszú időnek kell eltelnie ahhoz, hogy ezen a téren is előrelépés történjen. Nem marad tehát más választás, mint hogy a NATO válságövezetekbe települő erői kapják meg a feladatot az infrastrukturális hiányosságok kiküszöbölésére. Az így kialakítandó képességeket nevezzük részkitöltő képességeknek (angolul: niche capabilities).

A meteorológia területén ez a követelmény kitelepíthető mérő-megfigyelő, távérzékelő és információs rendszerek alkalmazását, kitelepülő nemzeti meteorológiai csoportok (Meteorological Support Unit – MSU), illetve többnemzeti meteorológiai csoportok (Combined Meteorological Unit – CMU) bevetését teszi szükségessé.



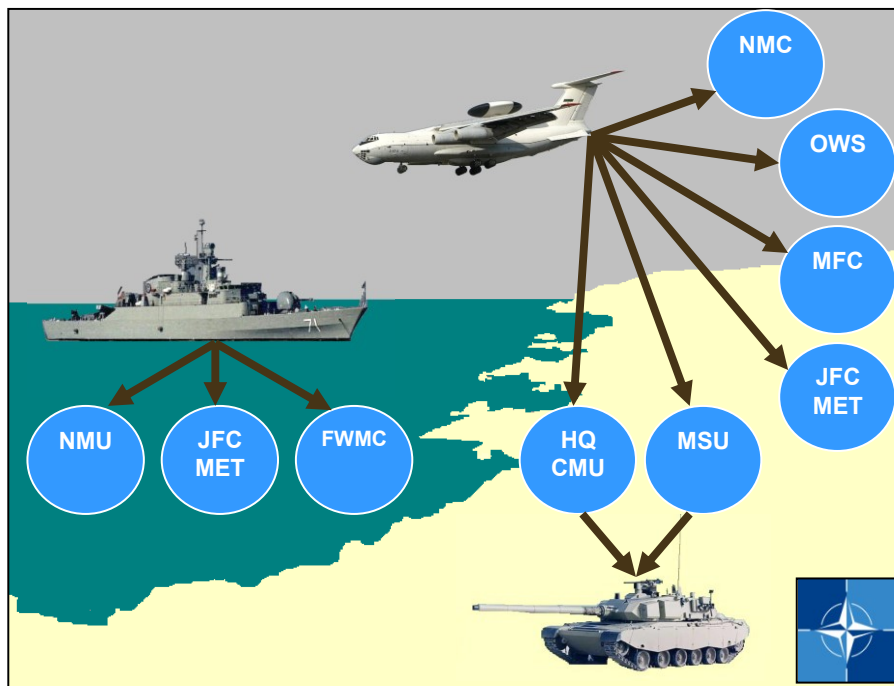
1. ábra. NATO műveletek helyszínei.

A 2. ábrán a hadműveleti területeken tevékenykedő meteorológiai támogató elemeket láthatjuk. Nyilvánvaló, hogy az egymásnak nem ellentmondó, következetes meteorológiai támogatás végrehajtása csak ezeknek, a különböző identitású alegységeknek az összehangolt, koordinált tevékenységével érhető el. Emiatt van szükség a műve-

leti területeken a meteorológiai támogatás központi szabályozására, az erőfeszítések egységesítésére.

Az erőfeszítések egységesítése

Nyilvánvaló, hogy egy ilyen többnemzeti környezetben nem csak a nyelvi akadályok leküzdése a feladat, hanem meg kell oldani, hogy a technikai és szakmai háttér is azonos (de legalább hasonló) legyen minden résztvevő nemzet és a NATO hadvezetése számára egyaránt. Ehhez biztosítani kell a NATO műveletek során a nemzeti alegységek teljes kompatibilitását és együttműködését egymással, illetve a NATO vezetési rendszereivel. Ezt az *interoperabilitást* a nemzetek úgy tudják biztosítani, hogy elfogadják és alkalmazzák a NATO alapidokumentumaiban megfogalmazott irányelveket, műveleti és anyagi természetű szabványait.



2. ábra. Hadszintéri meteorológiai támogató elemek.

A katonai és a polgári meteorológiai eljárások és produktumok szabályozásának fundamentumai alapvetően azonosak. Ezeket nagyrészt a Meteorológiai Világszervezet (WMO), illetve repülésmeteorológiai vonatkozásban a Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (ICAO) fekteti le, illetve szabályozza. A NATO alapvetően a WMO és az ICAO előírásait, ajánlásait alkalmazza, saját szabványai, technikai eljárásrendje is ezekre épül. Mivel azonban a harcászati szinten megjelenő felhasználói igények meglehetősen speciálisak, ezért a NATO szabványokon és eljárási utasításokon keresztül tovább szabályozza a végtermékek előállításának követelményeit, feltételrendszerét. Ilyen szabványok, illetve eljárások az Egységesített Időjárás Előrejelzés (Unified Weather Forecast), valamint a Harcászati Döntéshozatalt Támogató eszközrendszer.

Annak érdekében, hogy ugyanazon hadszíntéren települt csapatok parancsnokai ne hozhassanak egymásnak ellentmondó döntéseket, a részükre szóló meteorológiai elő-

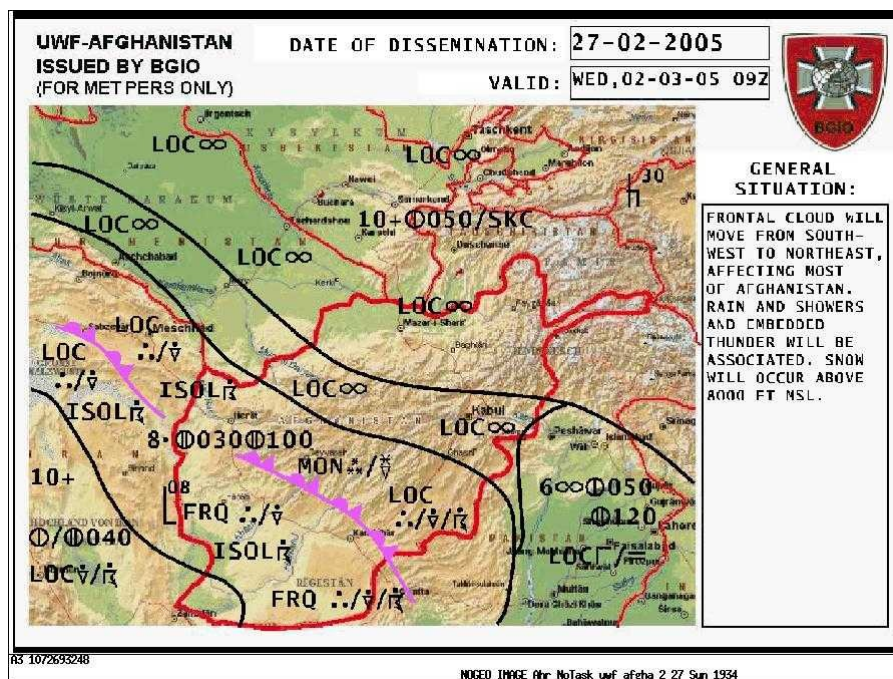
rejelzéseket is egységesíteni („uniformizálni”) kell. Ezt nevezi a NATO meteorológiai közössége az „egy hadszíntér – egy előrejelzés” elvének.

Ennek érdekében a nemzeti erőfeszítéseket a NATO legmagasabb műveleti vezetési szintjén (az Európai Szövetséges Parancsnokságon) a Szövetséges Erők Európai Főhadiszállásának (SHAPE) főmeteorológusa – a nemzeti képviselők bevonásával – koordinálja.

UWF – az Egységesített Időjárás Előrejelzés

Az Egységesített Időjárás Előrejelzést egy a SHAPE által kijelölt katonai meteorológiai központ állítja elő. Ennek a produktumnak közérthetően tartalmaznia kell a szinoptikus helyzet várható változásait 2–5 nappal előre az érintett műveleti területre. Ez az előrejelzés képezheti az alapját valamennyi műveleti tevékenység meteorológiai támogatásának. Az előrejelzés lehet szöveges, de a felhasználók inkább a térképes ábrázolást részesítik előnyben. Erre látunk egy példát a 3. ábrán.

Az uniformizálás a hadműveletek tervezése során nélkülözhetetlen, azonban ez nem jelenti azt, hogy harcászati szinten, rövidtávon ne lehetne az UWF-ben foglaltaktól szemernyt sem eltérni. Ilyen esetekben az eltérő álláspontot mindenképpen célszerű az UWF-et kiadó központtal, vagy a kijelölt meteorológiai összekötő csoporttal egyeztetni.



3. ábra. Egységesített Időjárás Előrejelzés. (Az UWF produktumok alapjául szolgálnak a különböző műveleti feladatokhoz készülő speciális, feladatra szabott előrejelzéseknek.)

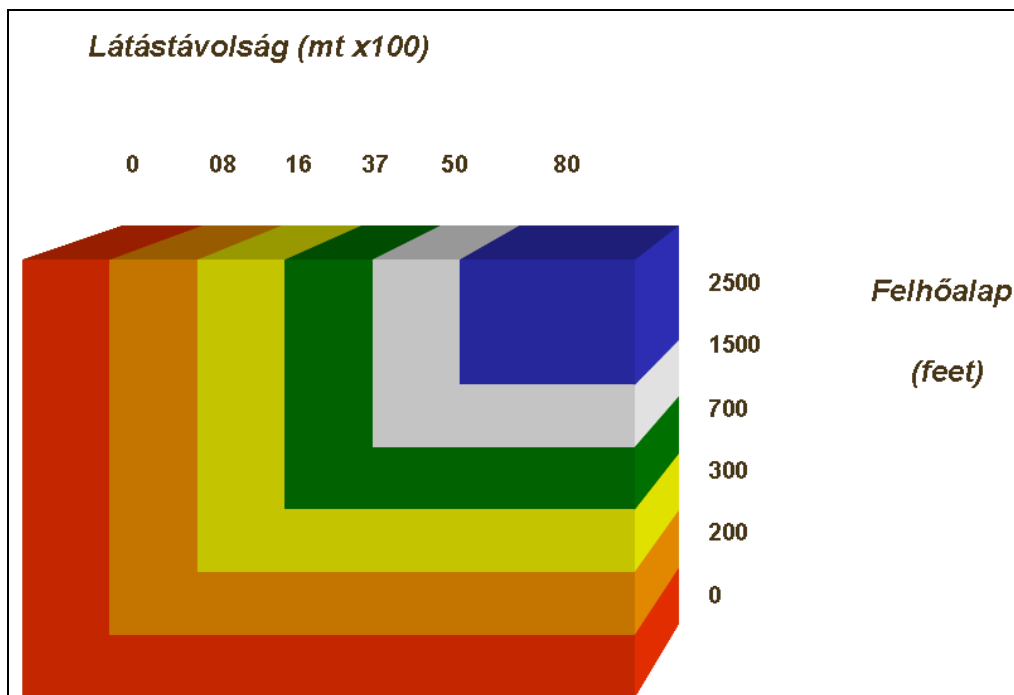
TDA – a Harcászati Döntéshozatal Támogatása

A speciális harci feladatok, a környezeti tényezőkre eltérő mértékben érzékeny haditechnika, illetve fegyverzet meteorológiai támogatásához az általános célú, mindenre

kiterjedő alapproduktumok közvetlenül nem alkalmasak. Sokkal specifikusabb, feladatra szabott előrejelzésekre van szükség a harcászati szinteken. Azokat az eljárásokat, melyek a meteorológiai alapadatokból, előrejelzésekből speciálisan egy-egy harci tevékenységre, egy-egy fegyvertípus, haditechnikai eszköz bevetettségére adnak meteorológiai szempontból tájékoztatást – céljukat tekintve – a Harcászati Döntéshozatal Támogató Algoritmusoknak nevezzük. A NATO meteorológiai közösségének Hadszintéri Meteorológiai és Oceanográfiai Munkacsoportja ezeknek az algoritmusoknak a kifejlesztésén, illetve ezek NATO tagállamok szintjén történő bevezetésén fáradozik.

Jelenleg a következő meteorológiai témákban folynak kutatások: repülőeszközök jegesedése, az időjárás emberi szervezetre gyakorolt hatása, elektromágneses hullámterjedés (irányított rakéták elleni védelem), éjjellátó készülékek alkalmazása (megvilágítottság mértéke).

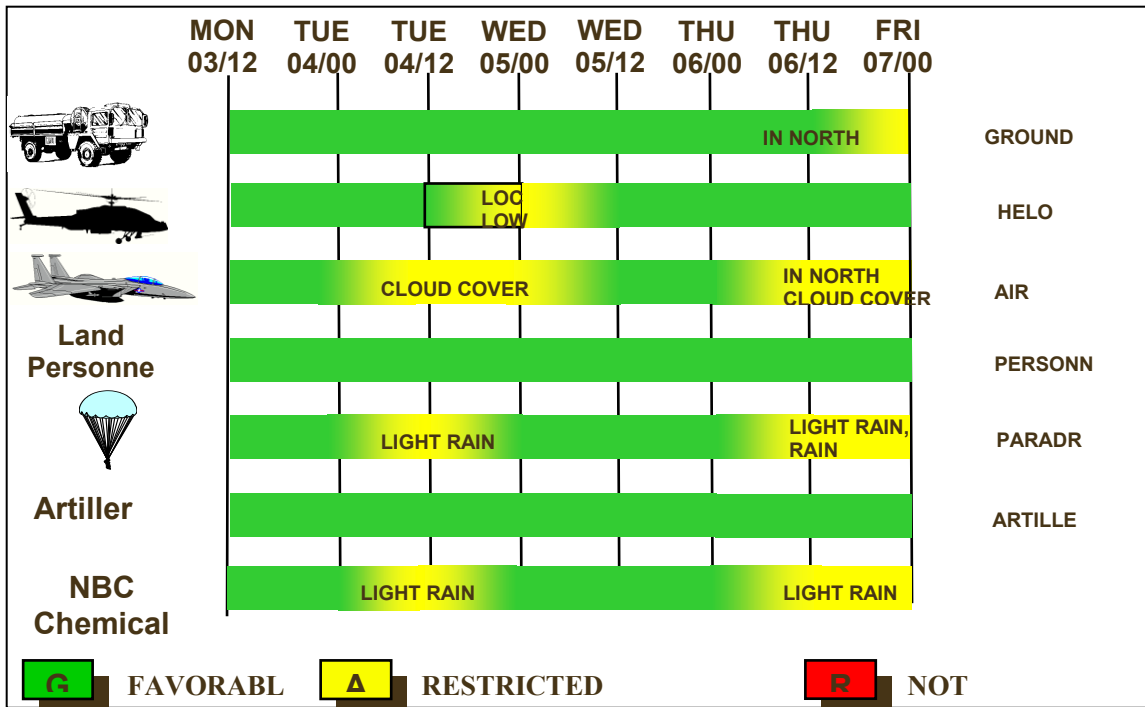
Célját tekintve TDA-nak tekinthetők a repülésmeteorológiai színekódok (4. ábra), melyek a látástávolság és a felhőalap mért-észlelt értékei alapján, a repülőtér fogadókészségének időjárási okokból bekövetkező korlátozására hívják fel kategóriaszínnek alkalmazásával a figyelmet.



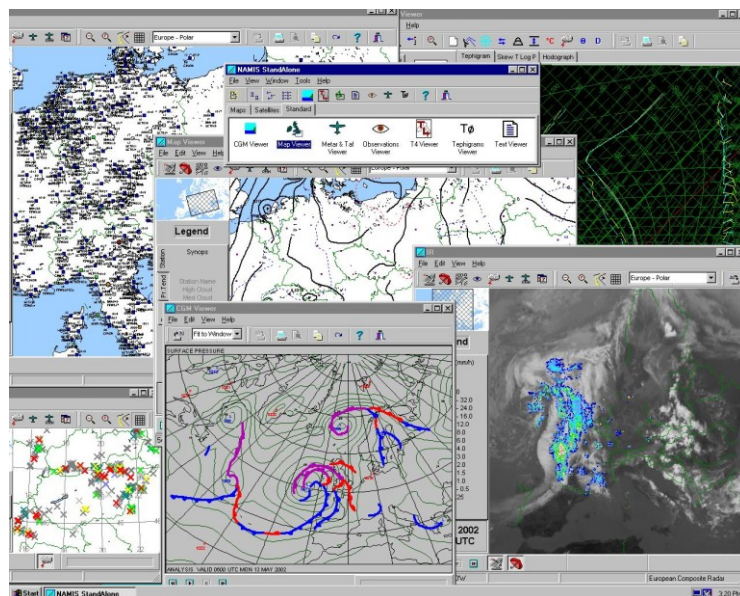
4. ábra. Repülésmeteorológiai színekódok.

A másik legelterjedtebb harcászati döntéshozatal támogató eljárás az Időjárási Hatásmátrixok alkalmazása (5. ábra), melyek könnyen áttekinthető módon adnak képet a döntéshozók számára a különböző műveleti feladatok végrehajthatóságáról, illetve speciális haditechnikai eszközök bevetettségéről.

Ahhoz, hogy a polgári információs rendszerekben nem forgalmazott katonai meteorológiai produktumok (pl. katonai repülőterek METAR és TAF táviratai), illetve az egységesített előrejelzési produktumok eljuthassanak a NATO vezetési rendszerének minden szintjére egy hatékony és jól menedzselhető információs rendszert kellett a NATO meteorológiai közösségének kifejleszteni.



5. ábra. Az időjárás hatásmátrix.



6. ábra. A NAMIS munkaállomás.

A NAMIS, a NATO Automatizált Meteorológiai Információs Rendszere egy földbázisú, de műholdas szegmessel is ellátott információcsere hálózat, melynek informatikai központja a Német Hadsereg Geoinformációs Hivatalában van. A hálózat végpontjaiban az azonos nevű munkaállomások jelentik meg a forgalmazott meteorológiai adatokat, előrejelzéseket (6. ábra). A munkaállomások rendszerszoftvereibe ma már beintegrálják a legelterjedtebben használt TDA algoritmusokat is.

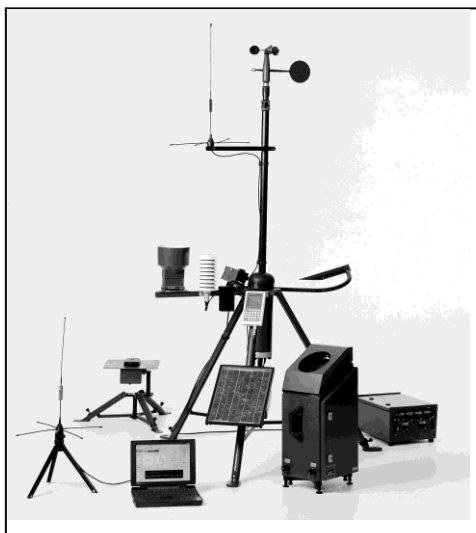
IMETOC támogatás koncepciója

A hadműveleti területen féléves ciklusokban (néha még gyakrabban is) változik a csapatok összetétele. Nagy a fluktuáció. Van, hogy egyes beosztásokat ugyanazon nemzet katonái töltenek be éveken keresztül, de az is előfordul, hogy egy-egy alegység, vagy részleg félévente más nemzet „kezébe kerül”. Ilyenkor előfordul, hogy az új összetételű egység katonái nem a korábbi nemzet által megszokott háttértámogatásra építenek, hanem kialakítják a sajátjukat. Mivel UWF produktumot több nemzeti meteorológiai központ is képes készíteni, így emiatt változhat annak kiadója is.

2002-ben a NATO létrehozott egy gyorsan bevethető haderőt, melyet a főerők kitelepülését megelőzően vetnek be. A gyors reagálású erők meteorológiai támogatása csak nagyon hatékony szervezéssel biztosítható.

Ezeket a kihívásokat felismerve a NATO meteorológiai közössége új támogatási koncepciót dolgozott ki, az Integrált Meteorológiai és Oceanográfiai (IMETOC) támogatás koncepcióját. Ennek lényege, hogy a NATO különböző missziós feladataira külön-külön kijelölnek egy ún. Vezető Nemzetet (Lead Nation – LN), amely felel a misszióhoz kapcsolódó műveleti terület egységes meteorológiai és oceanográfiai adatbázisának létrehozásáért és rendelkezésre bocsájtásáért. Feladat valamennyi, az időjárás elemzéséhez szükséges információ összegyűjtése, az azokból származtatható misszióspecifikus előrejelzések elkészítése. A produktumok előállítására Segítő Nemzeteket (Assisting Nation – AS) is kijelölhetnek.

A nemzeti szinten települő alegységeknek mindössze az integrált adatbázishoz történő hozzáférést biztosító eszközöket kell beszerezniük. A műveleti területre települő egységek napi harcászati tevékenységének meteorológiai támogatását ennek az adatbázisnak a felhasználásával feladatra szabott előrejelzéseken és tájékoztatásokon keresztül kell a szakszemélyzetnek végezni.



7. ábra. Harcászati meteorológiai mérőállomás.

Ahhoz, hogy a koncepció ne csak koncepció maradjon, a nemzeteket ennek megvalósítására kell készíteni. Ennek érdekében a NATO képességfejlesztési célkitűzései között szerepelnek a GEOMETOC támogatással szemben támasztott képességkövetelmények is. Ennek értelmében a képességcsomagot felvállaló nemzetnek olyan irány-

ba kell fejlesztenie a Geoinformációs (térképészeti, földrajzi, vízrajzi, meteorológiai és oceanográfiai) adatbázisait, hogy azok kompatibilisek legyenek a NATO integrált adatbázisaival. Biztosítani kell az ezekhez történő hozzáférést a NATO védett informatikai hálózatán keresztül. Rendelkeznie kell az integrált adatbázishoz kapcsolódó kitelepíthető információs rendszerekkel, valamint el kell látnia kitelepülő alegységeit korszerű automatizált meteorológiai mérőeszközökkel (7. ábra).

Hazai szerepvállalás

Nyilvánvaló, hogy a magyar katonameteorológia sem szeretne kimaradni a szövetségesi feladatokból. Ennek érdekében feldolgoztuk és alkalmazásba vettük a meteorológiai vonatkozású NATO szabályzókat (oceanográfiával, speciális helyzetünk miatt, nem foglalkoztunk).

1999-ben – NATO tagságunk kezdetével egy időben – csatlakoztunk a NAMIS rendszerhez is. Ma minden nemzeti meteorológiai támogató elem rendelkezik egy ilyen eszközzel.

A katonai repülőterek mérőrendszereinek automatizálását követően kitelepíthető harcászati meteorológiai mérőrendszereket szereztünk be (*TACMET*), melyek ma is Afganisztánban teljesítenek szolgálatot.

Jelenleg magyar katonameteorológusok látnak el szolgálatot az afgán főváros nemzetközi repülőterén.

A meteorológiai előrejelzések hidrológiai alkalmazásai Valószínűségi előrejelzések kockázatának elemzése

Koncsos László

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., e-mail: koncsos@vkkt.bme.hu

Összefoglaló – Az ensemble előrejelzések hidrológiai alkalmazását és kockázatát vizsgáltuk a Tisza Tiszabecs-Tokaj szakaszán. Az árvédekezés rendszerét – különösen a Tisza-völgy új árvédelmi koncepciójában (Vásárhelyi-terv Továbbfejlesztése, VTT) az ilyen előrejelzések alapján lehet működtetni. Ha az előrejelzési rendszer nem működik megfelelően, akkor a védett értékekben veszteségek jelentkeznek. A veszteségek oka, hogy a védekező szervezet nem hozza meg időben a szükséges intézkedéseket (pl. vésztározó feltöltés, töltéserősítés), vagy tévesen reagál a helyzetre (pl. feltölti az árvízi vésztározót, pedig nem kellene).

A kockázatot bayesi értelemben a *veszteségek várható értékének* definiáltuk. A kockázat a rendszer hosszúidejű működésével kapcsolatos, és nagyszámú, statisztikailag lehetséges árvízi esemény kárainak számbavételén alapul.

Az előrejelzési módszerek összehasonlíthatóak a kockázat mértéke alapján. Az előrejelzési módszerek fejlesztésére fordítandó erőforrások is kiszámíthatók: a „tökéletes” előrejelzés és az adott minőségű, illetve adott módszerrel végrehajtott előrejelzés kockázatkülönbségeként. A kockázat meghatározására új szimulációs metodikát fejlesztettünk ki, amely lehetővé tette, hogy a védekezési rendszert, és az elszennvedett katasztrófákat együttesen kezelhessük.

A szimulációs modell, futása során, összeállítja az egyes természeti és védekezési peremfeltételek esetében keletkező védekezési költségeket (az egyes lefolyások jellemző árvízi tetőző szintjeinek ismeretében). A Monte Carlo keretrendszerbe ültetett árvízi szimulációs modellel a Felső-Tiszán nyolc potenciális katasztrófa pontot elemeztünk.

A katasztrófák hatásait numerikus elöntési modellel vizsgáltuk. A károk összegzéséből áll elő egy-egy terület (katasztrófa pont) jellemző érintettsége. Az elborított területtípusok nagysága határozza meg az

érintett területtípusokon értelmezhető társadalmi és gazdasági hatásokat, mint például károk az ingó és ingatlan vagyokban, ipari termelésben, mezőgazdasági területeken.
A szimulációs vizsgálatot 7 előrejelzési scenárióval végeztük el, és elemeztük a kockázatok összehasonlításával.

Az előadás ábrái megtalálhatók az OMSZ honlapján:

http://www.met.hu/omsz.php?almenu_id=omsz&pid=metnap34&pri=0&mpx=1

Jelent-e az időjárás veszélyt a repülés számára?

Sándor Valéria¹ és Ruzsiczky Pál²

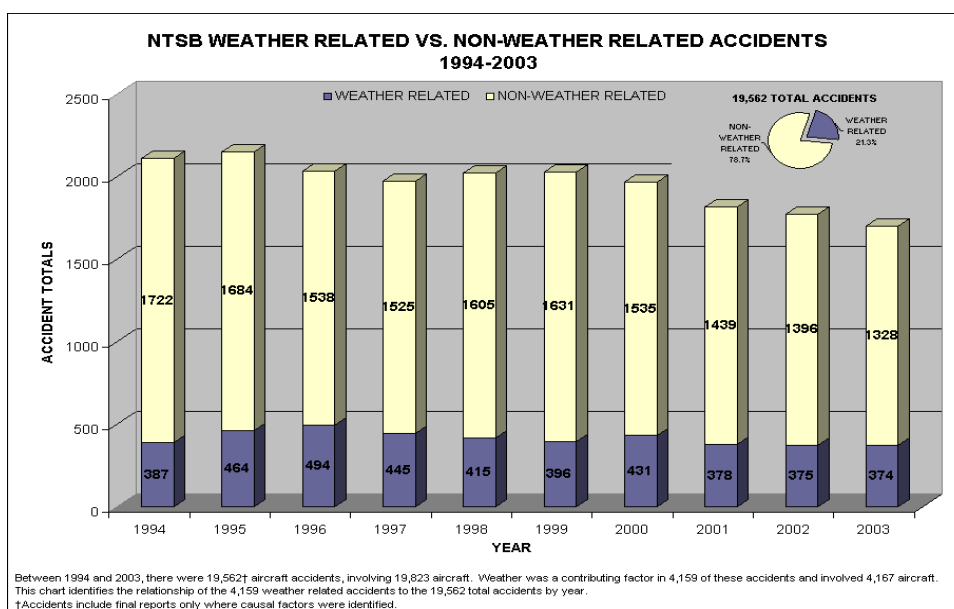
¹Országos Meteorológiai Szolgálat, 1024 Budapest Kitaibel Pál u. 1., e-mail: sandor.v@met.hu

²Wizzair Légitársaság, e-mail: pal.ruzsiczky@wizzair.com

Összefoglaló – Többször elhangzik az a kijelentés, hogy a technikai fejlődés előrehaladtával a repülés egyre inkább időjárás-függetlenné válik. Igaz-e ez a valóságban, legyőzheti-e az ember a természet erőit a repülés vonatkozásában? A baleseti statisztikák azt mutatják, hogy a balesetet, katasztrófát előidéző okok között előkelő helyen áll az időjárás. Az időjárás folyamatokban a turbulencia, a zivatar, a szélnyírás, illetve a jegesedés az a meteorológiai jelenség, amely különös veszélyt jelent. Az időjárás veszélyek elkerülése, a repülés biztonságos végrehajtása a pilóták és a meteorológusok közös erőfeszítésének eredménye. A pilótának olyan ismeretekkel kell rendelkeznie, amelyek segítségével lehetősége nyílik a veszélyek felismerésére, ugyanakkor a repülési feladat megkezdése előtt tájékozódnia kell az útvonalon kialakult és várható időjárás veszélyekről. A meteorológus fontos feladata a repülés által igényelt információk előállítása és továbbítása. A repülésmeteorológiai előrejelzések készítése során a nowcasting technika alkalmazása lehetőséget nyújt a pontosabb előrejelzések, információk előállítására.

Repülési balesetek, baleseti statisztikák

Az elmúlt évek, évtizedek során a repülési baleseti statisztikák sokat javultak. A javulás okai közé tartozik egyrészt a technika fejlődése, másrészt pedig az egyes balesetek

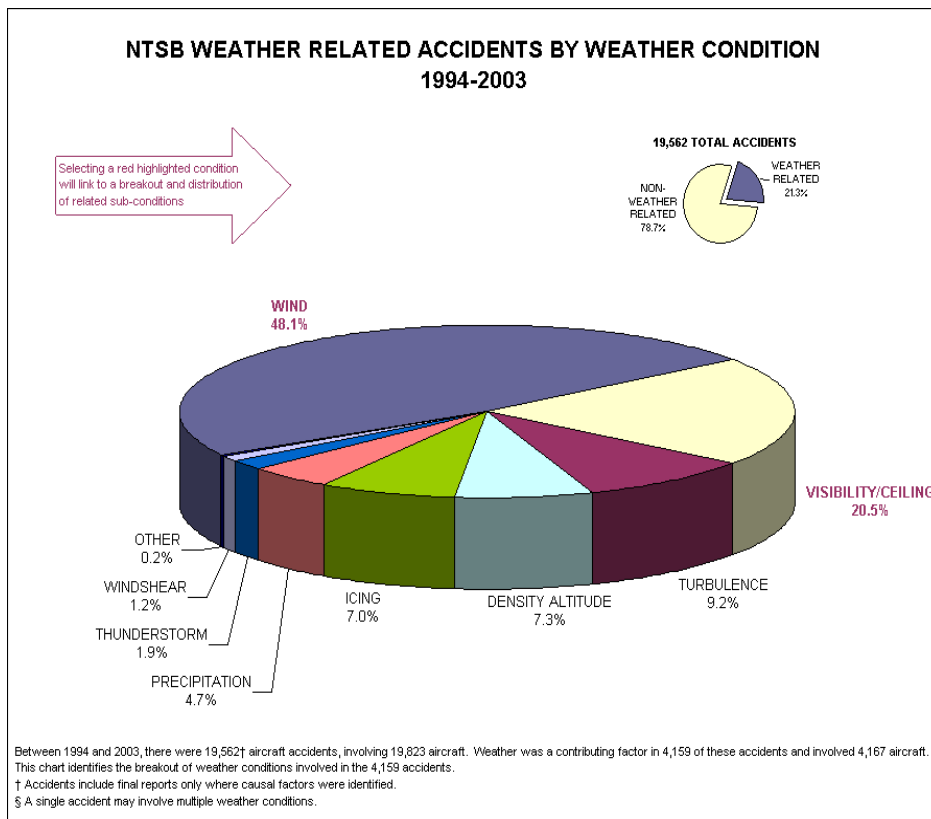


1. ábra. Repülőgép balesetek (kék oszlop: időjárással összefüggő balesetek, sárga oszlop, időjárással nem összefüggő balesetek).

www.nasdac.faa.gov/aviation_studies/weather_study/studyindex.html

kivizsgálása során leszűrt tanulságok azonnali hasznosítása, alkalmazása és ezzel egyidőben a hasonló balesetek megelőzésére hivatott változtatások szigorú bevezetése. Az 1994 és 2003 közötti időszak baleseteit vizsgálva arra a következtetésre jutottak, hogy az olyan balesetek, amelyek összefüggésbe hozhatók az időjárással, az esetek kb. 21%-ában fordultak elő (1. ábra).

A 2. ábrán az időjárással kapcsolatos baleseteket tüntették fel az időjárási jelenségek szempontjából. E szerint a szél 48%-ban, a rossz látás – alacsony felhőalap 20%-ban, a turbulencia 9%-ban, a jegesedés 7%-ban a zivatar és a szélnyírás 3%-ban veszélyezteti a repülést. A sűrűségi magasság (a felszállási úthossz egyik eleme) a balesetek 7%-áért felelős.



2. ábra. Az időjárással kapcsolatos balesetek az időjárási jelenségek szempontjából 1994 és 2003 között A vizsgált időszak 19562 balesete közül 4159 volt kapcsolatban az időjárással. www.nasdac.faa.gov/aviation_studies/weather_study/studyindex.html

Repülésre veszélyes jelenségek

A repülésre veszélyes meteorológiai elemek, jelenségek körének meghatározásakor figyelembe kell venni a repülés különböző ágazatait. Más a repülésre veszélyes jelenségek köre a General Aviation – GA („kisgépes repülés”) és más a Civil Aviation – CA („nagygépes repülés”) esetében.

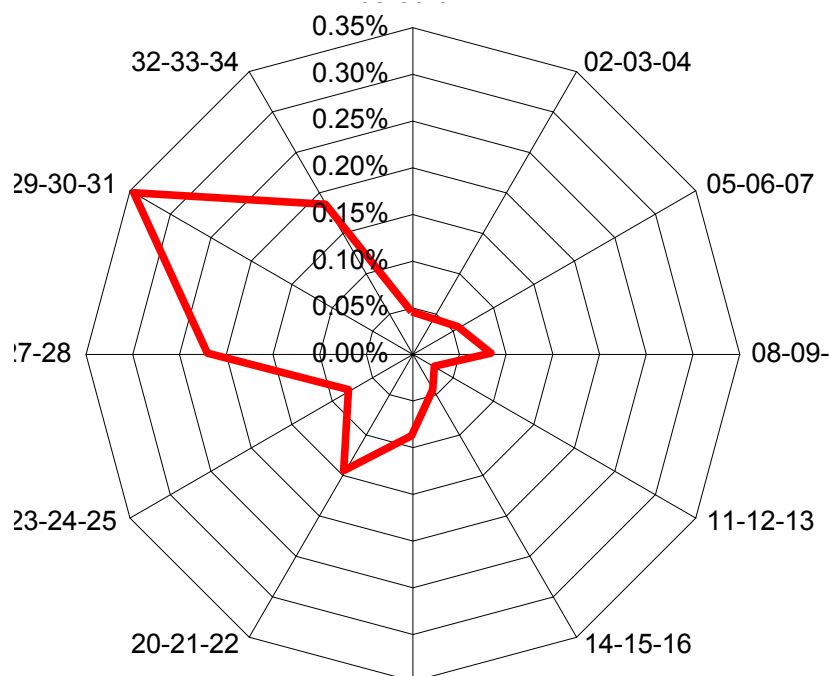
A rossz látás, alacsony felhőalap főként a GA repüléseit sújtja, hiszen a CA fejlett nagy repülőgépeinek egy része 0 m-es látástávolság és 0 m-es felhőalap esetén is képes leszállni. Ez azonban nem jelent teljes függetlenséget a ködös időjárási helyzetektől, mert ilyen esetekben szükséges az is, hogy a repülőtér felszereltsége az ilyen forgalomnak is megfelelő legyen (CAT III.C kategóriájú). Jelenleg azonban még kevés ilyen repülőtér van.

Az alacsony felhőalap és az 1 km-nél alacsonyabb látás nemcsak a repülés biztonságát veszélyezteti, hanem annak rendszerességét is, a repülőtér ilyen esetekben hosszabb időközönként tud fogadni és indítani repülőgépeket.

Az erős talajszél is a veszélyes elemek közé sorolható, mind a GA, mind a CA körében. A kisgépes repülésnél az erős talajmenti szél által keltett turbulencia is növeli a veszélyt. A nagygépes repülésnél is veszélyt jelent az erős talajszél. Minden repülőgéptípusra adott a megengedett szélkomponens érték. Például egy Boeing B737-nél a megengedett szélkomponens értékek a következők:

- hátszél-komponens 10 KT
- oldalszél-komponens 35 KT
- szembeszél-komponens 50 KT

Ha a 35 KT-s megengedett oldalszél-komponenst nézzük, ez az érték nem olyan extrém, hogy ne fordulna elő. Évente néhány alkalommal előfordul ilyen erős, a futópályára közel merőleges irányú szél. A 3. ábrán látható, hogy a 200–220 fokos irány elég nagy gyakorisággal fordul elő a Budapest-Ferihegy repülőtéren.

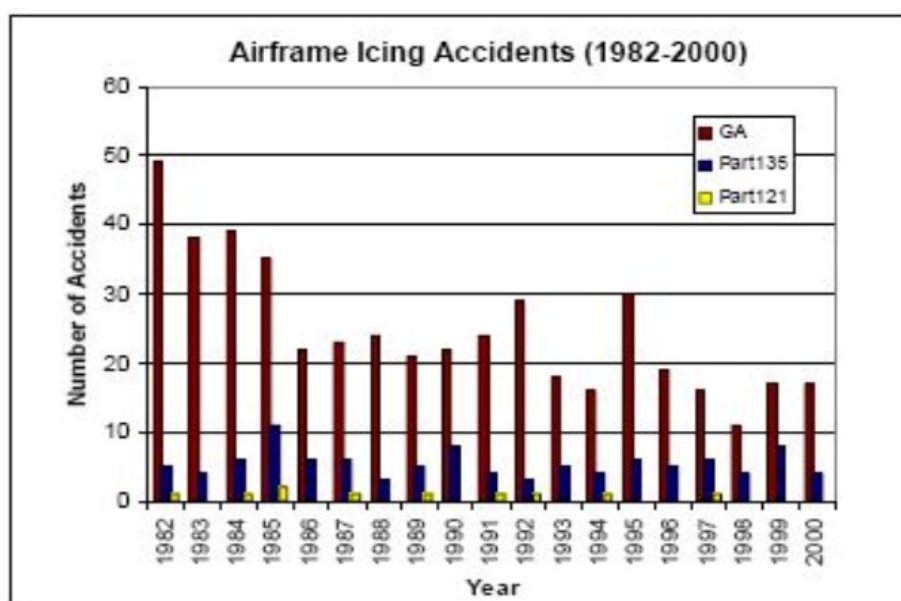


3. ábra. Az egyes szélirányok előfordulási gyakorisága a széllelkések figyelembevételével 30°-os szektoronként. (Forrás: HungaroControl).

Klasszikusan a repülésre veszélyes elemeknek a jegesedést, a turbulenciát, a zivatart és az alacsonyszintű szélnyírást szoktuk említeni. E jelenségek a repülés valamennyi ágazatára egyformán nagy veszélyt jelentenek.

Több évvel ezelőtt még a *jegesedés* volt az egyik legveszélyesebb meteorológiai paraméter a repülésre. Ezt felismerve fejlesztették a jégtelenítés technikai hátterét, a pilóták ismereteit. Meteorológiai szempontból pedig a jegesedés jelzésében és előrejelzésében történtek minőségi változások. Ennek ellenére a jegesedés továbbra is okoz veszélyes repülési helyzeteket, időnként halálos baleseteket is.

A 4. ábrán a jegesedéssel kapcsolatos baleseteket vizsgálták az USA-ban az 1982–2000 közötti időszakban. Látható, hogy az események mind a GA, mind a CA körében csökkenő tendenciát mutat.



4. ábra. Jegesedéssel kapcsolatos balesetek az USA-ban (piros oszlop: GA, kék oszlop: 30 ülés alatti repülőgépek, sárga oszlop: 30 ülés feletti repülőgépek).

<http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/81425.pdf>

A jegesedéssel kapcsolatos balesetek kb. 80%-ban a téli időszakban (október és március között) fordulnak elő, de nem kizárt a nyári időszakban sem.

A *turbulencia* a légkörben bárhol előfordulhat, gyakran nagy veszélyt jelent a le- és felszálló repülőgépek számára. Leggyakoribb előfordulási helyei:

- a sűrűlódási rétegben kialakuló mechanikus turbulencia (az áramló levegő sűrűlódik a talajfelszínnel),
- felhőkben kialakuló termikus turbulencia (labilis hőmérsékleti rétegződéshez kötött),
- szabad légkörben megjelenő dinamikus turbulencia (nagy függőleges és vízszintes szélnyírás kialakulása a jet-stream-ek közelében).

A zivatar és az alacsonyszintű szélnyírás kb. 3%-os gyakorisággal okoz eseményeket. Ebbe a gyakoriságba azonban a zivataros turbulencia és jegesedés által bekövetkezett baleseteket nem számították bele, vagyis itt a szélnyíráson kívül a zivatar elektromos tevékenysége, illetve a zivatart kísérő jégeső hatására kialakuló balesetek jelennek meg.

A zivatarok felderítése a fedélzeti lokátorok segítségével egyre biztosabb, de ennek ellenére is bekövetkeznek ilyen események. A veszély nem korlátozódik a zivatarfelhő területére, ezért a légitársaságok a légi üzemeltetési utasításokban előírják a zivatar kerülés feltételeit is. Pl. két zivatargóc között legalább 20 km-es zivatarmentes terület legyen, vagy előírás az, hogy zivatar felhőt oldalirányban 10 km-re, felette 1 km távolság tartásával kell kerülni.

Mit tud tenni a meteorológus?

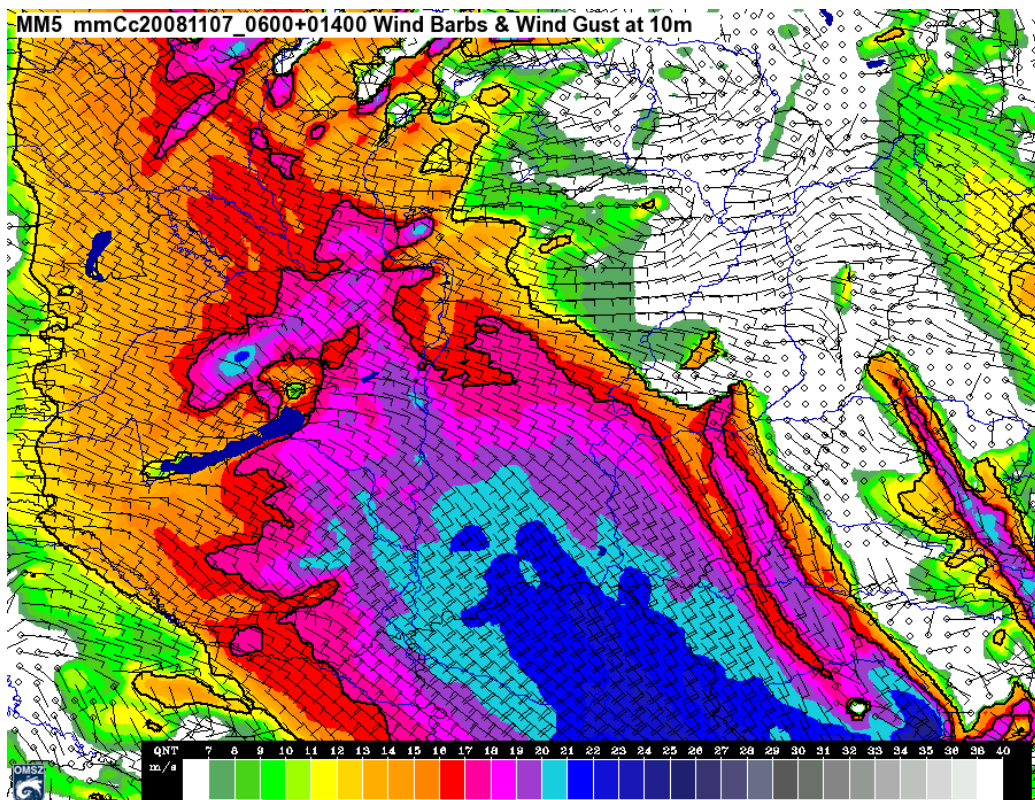
Az OMSZ a polgári repüléssel kapcsolatos előrejelzési tevékenység körében információt szolgáltat a nagygépes repülés, a kisméretű repülés és a sportrepülés számára. Minden ágazat más-más igényekkel lép fel. A meteorológus fontos feladata a repülés által igényelt információk előállítása és továbbítása.

A meteorológus eszköztárába tartoznak a mérési és megfigyelési adatok, a távérzékelő rendszerek információi, valamint a numerikus előrejelzések, ezek közül is kiemelt fontossággal a nowcasting előrejelzések.

A felhasználók pontos időjárási helyzetképet, pontosabb előrejelzéseket igényelnek, de nemcsak repülésbiztonsági céllal, hanem a gazdaságos üzemeltetés miatt is. Az előrejelzéseket nemcsak a pilóták használják, hanem a légitársaság, a repülőtér üzemeltetője és a légiforgalmi irányítás is.

A meteorológus feladata tehát a következő néhány órára egy meghatározott helyre, területre szóló előrejelzés készítése, sűrű időbeli bontásban. Pontosan meg kell mondanunk, hogy kell-e számítani valamilyen veszélyes időjárási jelenségre. A repülés tekintetében (élet- és vagyonvédelem) a meteorológia felelőssége igen nagy!

Az OMSZ-ban az MM5 modell alkalmazásával készülnek azok az előrejelzések, melyeket a repülésmeteorológiában is használunk. A repülésmeteorológiai előrejelzések készítése során a nowcasting technika alkalmazása lehetőséget nyújt a pontosabb előrejelzések, információk kiadására. Az 5. ábrán egy nagyfelbontású előrejelzett szélmezőt látunk, mely a nowcasting modell segítségével készült.



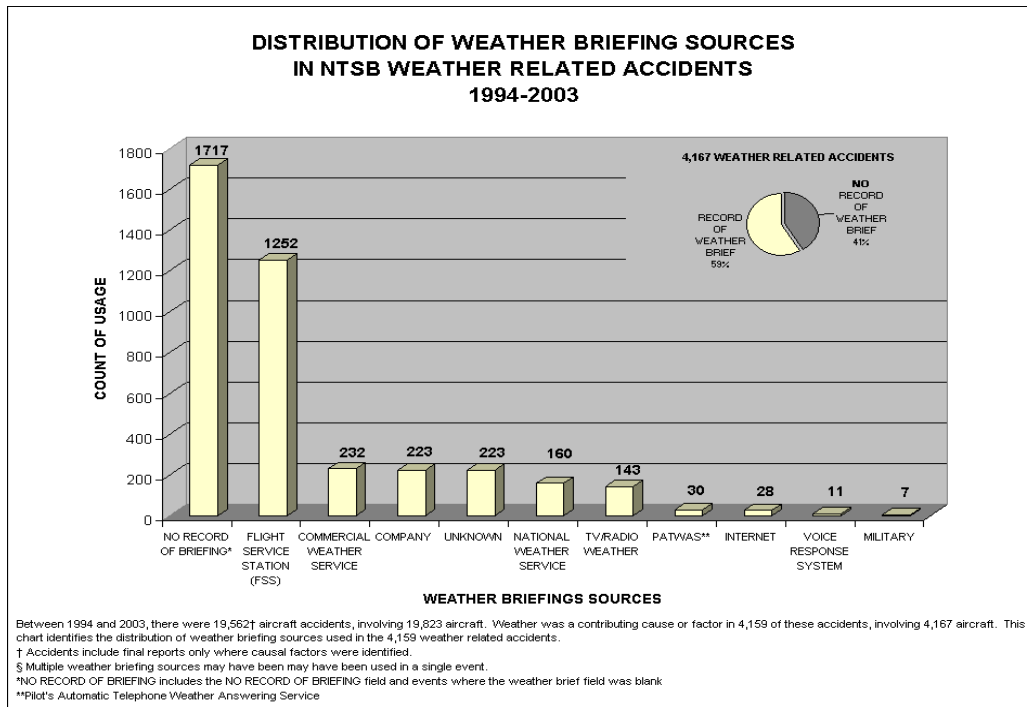
5. ábra. Egy nowcasting szélelőrejelzés.

Mit tud tenni a pilóta?

A pilóta nagymértékben hozzá tud járulni ahhoz, hogy az időjárással kapcsolatos balesetek száma csökkenjen. Mit tud tenni:

- alapvető ismereteket kell szereznie meteorológiából: a veszélyes jelenségek felismerése, felhőzeti kép ismerete terén – az oktatás és a rendszeres továbbképzés fontosságát nem lehet túlhangsúlyozni,
- szinoptikai ismereteit bővítenie kell, ezzel szinoptikai szemlélete is kialakul, s pontosabban tudja az általános időjárási helyzetet értékelni, a konzekvenciákat levonni,
- helyesen értelmezni a radar és műhold információkat,
- az időjárási felkészülés, a briefing fontosságának tudatában kell lennie – az útvonaltervezés szerves része legyen az időjárás várható változásának megismerése.

A 6. ábra a briefing fontosságára hívja fel a figyelmet. Az ábrán látszik, hogy azokat a baleseteket vizsgálva, melyeknek időjárási okai voltak, az események 41%-ában nem történt meg a felkészülés során az időjárási helyzetre való felkészülés, nem volt briefing!



6. ábra. Az időjárási információk forrása repülések előtt. (Olyan eseteket vizsgáltak, amikor a repülés folyamán időjárási okokra visszavezethető esemény történt.)
http://www.nasdac.faa.gov/aviation_studies/weather_study/wbrief.html

A jogszabályi előírásoknak megfelelően a légi jármű parancsnokának joga, felelőssége, a repülőtér körzetét elhagyó repülések esetén gondosan tanulmányoznia kell a rendelkezésre álló meteorológiai jelentéseket, valamint előrejelzéseket, ezután dönt a repülési feladat végrehajtásáról. Ebben segít a meteorológus (ha a pilóta ezt kéri!).

Összefoglaló megjegyzések

A repülésre veszélyes jelenségek elkerülése érdekében a meteorológusnak és a pilótának együttesen kell mindent megtennie ahhoz, hogy a repülések időjárási szempontból esemény- és balesetmentesek legyenek!

A repülésmeteorológiai szolgálat ezt legjobb tudása szerint teszi.

Skálafüggő légszennyezettség előrejelzések

**Mészáros Róbert¹, Lagzi István^{1,2}, Ferenczi Zita³,
Steib Roland³ és Kristóf Gergely⁴**

¹ELTE TTK, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A., e-mail: mrobi@nimbus.elte.hu, lagzi@vuk.chem.elte.hu

²Northwestern University, Department of Chemical and Biological Engineering
The Grzybowski Group, 2145 Sheridan Road, Evanston, Illinois 60208

³Országos Meteorológiai Szolgálat, 1181 Budapest, gilice tér 39.
e-mail: ferenczi.z@met.hu, steib.r@met.hu

⁴Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Áramlástan Tanszék, 1111 Budapest, Bertalan Lajos utca 4–6, e-mail: kristof@ara.bme.hu

Összefoglaló – A légszennyező anyagok terjedésének leírására és különböző skálájú előrejelzésére több hazai intézetben is folynak modellfejlesztések és alkalmazások. Tanulmányunkban áttekintjük az Országos Meteorológiai Szolgálat, az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszéke és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszéke által a témában végzett kutatásokat és azok eredményeit.

Bevezetés

Az időjárás előrejelzések egyik fontos alkalmazási területe a légszennyezés meteorológia. A numerikus előrejelzési modellek bemenő adatokat szolgáltatnak a különböző skálájú szennyezőanyag terjedési és ülepedési modellek számára. Az utóbbi években a megnövekedett felhasználói igény miatt komoly fejlesztések tapasztalhatók a légszennyezési modellek terén is. A hazai gyakorlatban is egyre korszerűbb és hatékonyabb modelleket adaptálnak, illetve fejlesztenek több intézetben is.

E kissé formabontó tanulmányban három hazai kutatóműhely (Országos Meteorológiai Szolgálat, Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék, valamint

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszék) által végzett légszennyezettség elemző és előrejelző feladatokat ismertetjük. Célunk annak bemutatása, hogy az egyes intézményekben milyen kutatások, operatív alkalmazások folynak a témában. Nem törekszünk a modellek részletes leírására; e tanulmány keretében inkább az eredményekre, az alkalmazási lehetőségekre fókuszáltunk. A dolgozatban ezeket intézetenként mutatjuk be.

Az OMSZ által adaptált FLEXPART modell segítségével meghatározható a szennyezőanyagok nagytávolságú transzportja, diffúziója, száraz és nedves ülepedése. A modellfuttatás naponta két alkalommal történik Paks forrásponttal és egy feltételezett kibocsátási scenárióval. Az OMSZ lokális skálán (Ferihegyi Repülőtér környezete) is végez operatív légszennyezettség előrejelzéseket az EDMS egyesített emissziós és diszperziós modellrendszerrel.

Az ELTE Meteorológiai Tanszékén fejlesztett TREX modell segítségével különböző skálán becsülhető az eseti és állandó kibocsátások következményeként létrejövő környezeti terhelés. A modellrendszer operatív módon is alkalmazható az OMSZ ALADIN előrejelzési modelljével összekapcsolva. A programcsomag segítségével a Paksi Atomerőmű területén történő esetleges baleset során a légkörbe kerülő radioaktív izotópok terjedésére, bomlására és ülepedésére készülnek előrejelzések. A modell egy másik alkalmazási területe a folyamatos terhelés becslése, valamint rövid- és hosszútávú előrejelzése.

A BMGE Áramlástan Tanszéke a mérnöki gyakorlatban alkalmazott általános célú szimulációs szoftverek adaptálását végzi mezoskálájú légköri folyamatok vizsgálatára. E megközelítés lehetővé teszi a komplex felszínek feletti áramlás (pl. városi utcaközök, ipari üzemek, településrészek) finom térbeli felbontással történő vizsgálatát.

Országos Meteorológiai Szolgálat

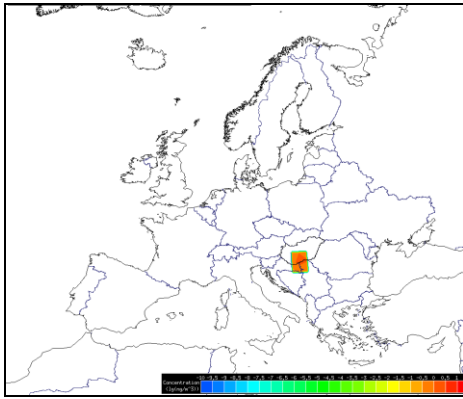
A FLEXPART modell

A FLEXPART modell segítségével a szennyezőanyagok nagytávolságú transzportját, diffúzióját, száraz és nedves ülepedését tudjuk meghatározni. A szennyeződés forrása lehet pont, vonal, területi vagy térfogati. A modell használható ún. backward és forward módban is. Backward számítások során a szennyezőanyag feltételezett forrását lehet azonosítani, forward módban pedig a szennyeződés várható térbeli mozgását tudjuk előrejelezni.

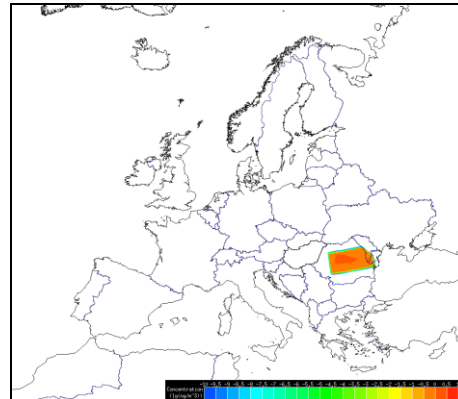
A modell a planetáris határréteg parametrizációjához a Monin–Obukhov-féle hasonlósági elméletet használja, míg a planetáris határréteg magasságát a kritikus Richardson-szám segítségével határozza meg. A hasonlósági elmélet alkalmazhatóságának korlátja eddig az volt, hogy az ún. dinamikus sebességet és a dinamikus hőmérsékletet nem tudtuk operatív módon számolni. Az ECMWF előrejelzések fejlesztésével ez az akadály azonban elhárult, mivel az operatíván futtatott előrejelzési modell 3 órás időlépcsővel számolja a hő- és momentum fluxusokat.

A szennyezőanyag részecskék diszperzióját a planetáris határrétegben több ezer trajektória számolásával szimuláljuk. A trajektóriák következő pontjának helyzetét Δt idő elteltével a következő összefüggés alapján határozzuk meg:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(x, t)\Delta t,$$



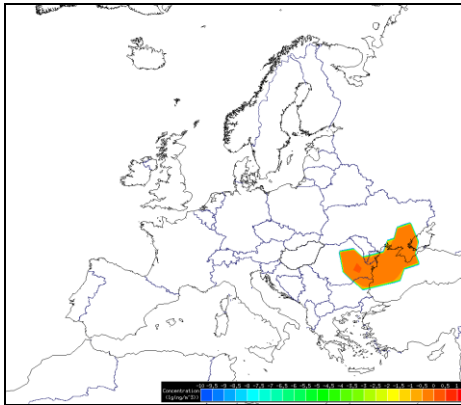
Koncentráció mező +6 óra



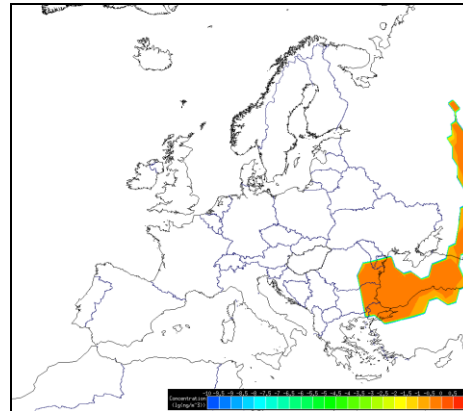
Koncentráció mező +24 óra

ahol $x(t + \Delta t)$ a trajektória pont Δt idő múlva, $x(t)$ a trajektória előző pontja, $v(x, t)$ szélsebesség az x pontban és t időpillanatban.

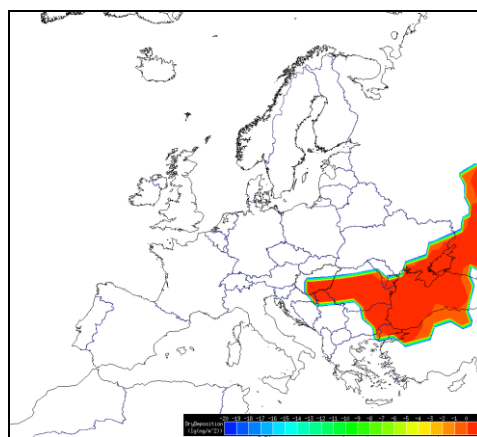
A szélmező szerkezetét három tényező határozza meg: nagyskálájú mozgások, a mezoskálájú fluktuációk és a turbulens mozgások. Az ECMWF numerikus előrejelző modellből származó szélsebességek csak a nagy-skálájú szél értékét adják meg, mivel a modell térbeli felbontása túl durva ahhoz, hogy reprezentálni tudja a mezo-skálájú folyamatokat és a határrétegben kialakuló turbulens örvényeket, ezért a turbulens és mezoskálájú mozgásokat parametrizálni kell. A lagrange-i részecskemodellekben a részecskék mozgása két tagból tevődik össze: a véletlen szélsebességekből és a részecske mozgásának fejlődéséből, amely a feltételezések szerint Markov-folyamat. Ezt a Langevin-egyenlettel lehet leírni. A FLEXPART modell a turbulens és mezo-skálájú szél fluktuációjának meghatározásához egyaránt a Langevin-egyenletet használja, azzal a feltételezéssel, hogy a mezoskálájú folyamatok függetlenek a turbulens fluktuációktól. A FLEXPART működését egy, a Paksi Atomerőműben feltételezett beleseti helyzet szimulációjával mutatjuk be (1. ábra).



Koncentráció mező +36 óra



Koncentráció mező +60 óra



Teljes ülepedés 60 óra alatt

1. ábra. Szennyezőanyag csóva és a teljes ülepedés szimulációja egy, a Paksi Atomerőműben feltételezett baleset után. A szimulációt a következő beállításokkal futattuk: A szimuláció kezdete: 2004. 06. 15. 12 UTC. A kibocsátás 2 órán át tart. A kibocsátás magassága: 120–125 m. A kibocsátott szennyezőanyag teljes mennyisége: 1,0 kg Kibocsátott részecskék száma: 1000. Az ábrákon a talajközeli (0 – 300 m) koncentrációt és a teljes ülepedést logaritmus skálán rajzoltattuk ki ng m^{-3} illetve ng m^{-2} egységekben.

Repülőtéri előrejelzés készítése különböző szennyezőanyagokra az EDMS diszperziós modellel

Napjainkban a repülőterek levegőminőségének vizsgálata egyre inkább a figyelem középpontjába kerül. Az utazási szokások változásával a repülőterek forgalma és vele együtt a földi kiszolgálás mértéke, valamint a reptérre vezető utak forgalma is folyamatosan növekszik. E forgalomművekedés miatt az utóbbi években a repülőterek légszennyező hatásának növekedésével kell számolni.

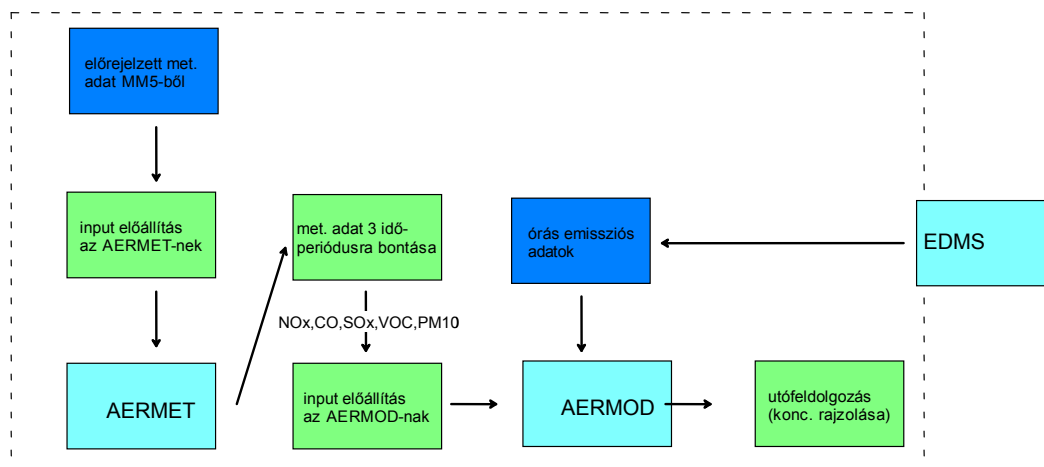
A témához kapcsolódó Jedlik Ányos projekt keretein belül a Központi Fizikai Kutatóintézet koordinálásával az OMSZ elvállalta, hogy diszperziós számításokat fog végezni a ferihegyi repülőtér környékére. Erre a célra az EDMS (Emissions and Dispersion Modeling System) modellt telepítettük az OMSZ-nál. Választásunk azért esett erre a modellre, mivel az EDMS diszperziót számoló modulja az általunk már évek

óta használt AERMOD diszperziós modell. A fő célkitűzésünk az volt, hogy a modellt operatíván alkalmazzuk légszennyezettség előrejelzésre a Budapest Ferihegy repülőtér területén. Kidolgoztunk egy rendszert, melynek segítségével koncentráció előrejelzéseket tudunk készíteni különböző szennyezőanyagokra a repülőtéren és annak közvetlen környezetében.

Az újonnan kifejlesztett előrejelző rendszerünk képes operatíván elkészíteni a napi átlagos diszperziós előrejelzéseket öt különböző szennyezőanyagra (NO_x , SO_x , CO, VOC, PM_{10}). A rendszer felépítését az 2. ábra mutatja. A reptéri diszperziós számítások sokkal bonyolultabbak a hagyományos diszperziós számításoknál, mivel a repülőgépek térbeli emissziója nem független a modellezett terület aktuális szélviszonyaitól. Az EDMS-ben széliránytól és szélességtől függő konfigurációkat lehet beállítani. A Ferihegyi repülőtéren alkalmazott repülőgép eljárások a széllel szembe fordítottak lehetnek és nem a szélesség függvényében. Emiatt kénytelenek voltunk egy programot kidolgozni, amely képes időjárásfüggő emissziós fájlokat használni a diszperziós számítások során. Általános esetben a reptéren a repülőgépek nagy része a 31L futópályát használja felszállásra, míg a 31R futópályát leszállásra. Ha a 130 fokos széllel szembe fordított komponens (pályára párhuzamos) nagyobb, mint 5 csomó, akkor megfordul a fel- és leszállási irány. Ilyen esetben a repülőgépek általában a 13L futópályát használják felszállásra és a 13R futópályát leszállásra. Ennek hatására a „taxizás iránya” is megváltozik. Ez a jelenség nagyon fontos lehet a diszperziós számítások során, mivel egy szennyezőanyag emissziója jelentős eltérést mutathat le- és felszállás során. Emiatt a modellezés során a fel- és leszállás helyét minél pontosabban kell meghatározni a jobb minőségű eredmények érdekében.

A modell által előállított 24 órás diszperziós meteorológiai adatbázis órás adatokat tartalmaz. A modell ezt az adatbázist 3 különböző részre osztja (0–12 óra, 12–18 óra, 18–24 óra), s a széladatokat kiértékelése ezekben az időintervallumokban történik meg. Az időintervallumok azért nem szimmetrikusak, mert 0 és 6 óra között elhanyagolható a repülőgép forgalom. Mindhárom időintervallumban átlagolásra kerülnek az órás széllel szembe fordított komponensek. Ez a három számított széllel szembe fordított komponens határozza meg az adott időintervallumban felhasznált emissziós inputokat. Mindhárom időintervallumban külön történik a diszperzió számítás a megfelelő emissziós adatokkal. A számítás végén előállnak a napi átlagos koncentráció értékek a különböző szennyezőanyagokra az egyes időintervallumokra végzett koncentráció számítások súlyozásával. A meteorológiai helyzettől függően, nyolc különböző emissziós inputtal tudunk diszperziós számításokat végezni.

A számításokhoz felhasznált input meteorológiai adatokat az OMSZ-nál operatíván működő MM5 numerikus időjárás-előrejelző modellből származtatjuk. Modellünkhöz a 12 UTC-s analízisből induló 36 órás MM5 előrejelzés órás adatait használjuk fel.



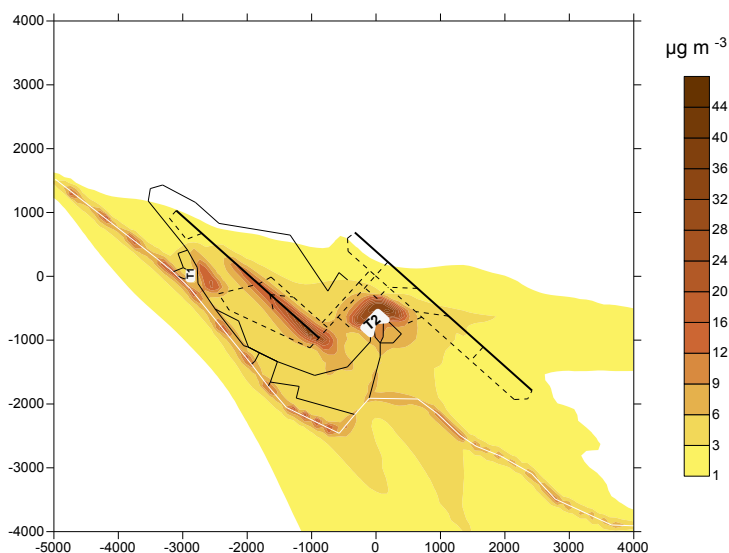
2. ábra. Az előrejelző modellrendszer felépítése. Zöld téglalapok: OMSZ által fejlesztett programok, sötétkék téglalapok: input adatok, világoskék téglalapok: diszperziós számításokat végző programok.

A 2. ábrán bemutatott szennyezőanyag előrejelző rendszerünk 2008. június vége óta operatívan működik. A következőkben 3 modellezési eredményt mutatunk be.

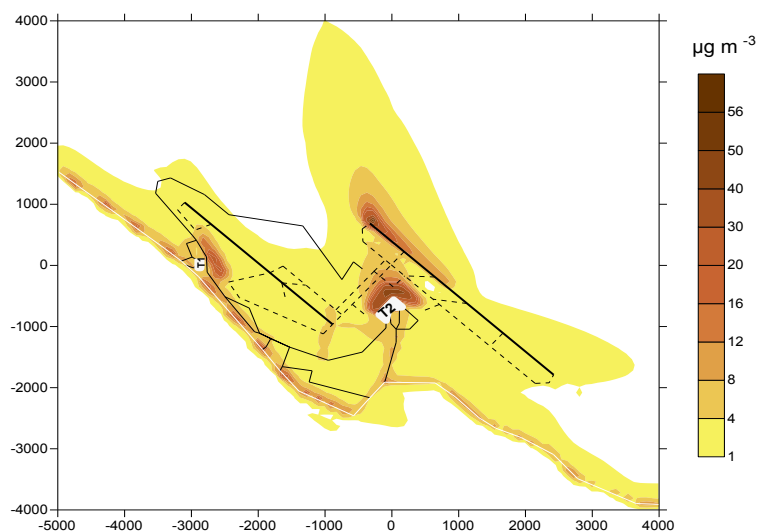
A 3–5. ábrák különböző időjárási helyzetekben mutatják be a modellezési eredményeket NO_x -re. Az öt szennyezőanyag közül azért a NO_x -et emeljük ki, mert ennél a szennyezőanyagnál követhető nyomon legjobban a repülőgépek környezetre gyakorolt hatása. A modellezési területen előforduló jelentősebb CO és VOC koncentrációk a repülőtér közelében elhaladó gépjárműforgalom, míg jelentősebb SO_x és PM_{10} koncentrációk a földi kiszolgáló egységek hatására alakulnak ki.

A bemutatott ábrákon a koncentrációk nem tartalmazzák a háttér koncentrációkat. Csak közvetlenül a repülőtér működéséből eredő emissziókat, valamint a repülőtér mellett elhaladó 4-es út emisszióját vettük figyelembe a diszperziós számítások során. A 3. ábra az előrejelzett napi átlagos NO_x koncentráció eloszlást mutatja be Ény-i szél esetén, a 4. ábra ugyanezt, csak D-i szél esetén. Az 5. ábra azt az esetet mutatja be, amikor a szél irányt vált a nap folyamán, így megváltoznak a repülőtéri eljárások is (pl. fel- és leszállás iránya). Az ábrán a vastag fekete folytonos vonalak jelölik a futópályákat, a fekete szaggatott vonalak a „taxi utakat”, a fekete folytonos vonalak a repülőtérhez vezető utakat és a reptér belső útjait, a fehér folytonos vonal a repülőtér előtt elvezető 4-es utat jelöli, míg a két fehér poligon a két terminált jelképezi. NO_x esetén a származtatott koncentrációk azt mutatják meg, hogy a repülőtér hatása és a reptér mellett elvezető 4-es út járulékos hatása a környezetre közel azonos nagyságrendű. Az ábrákon a legnagyobb koncentráció a 2. Terminál körül és a felszállóhelyek környékén tapasztalható. További lokális maximum helyek az 1. Terminál közelében, valamint a 4-es út mentén tapasztalhatók. Repülőgépek NO_x emissziója felszállás közben a legmagasabb, így nem meglepő, hogy magas NO_x koncentrációt találunk a felszállási hely közelében. Mivel az 1. Terminál repülőgép forgalma kb. harmada a 2. Terminálnak, így az ott modellezett NO_x értékek ennek megfelelően alacsonyabbak. A terminál környéki jelentős NO_x koncentrációkért a GSE (Ground Support Equipment) és az APU (Auxiliary Power Units), tehát a földi kiszolgáló egységek a felelősek. A repülőgépek és a gépjárművek NO_x emissziója sokkal jelentősebb, mint a GSE és az APU emissziója, de mivel utóbbiak viszonylag kis területen fejtik ki hatásukat, így a kialakított koncentráció értékekben jelentős szerepük van. Azt mondhatjuk, hogy a maximális NO_x koncentrációk az

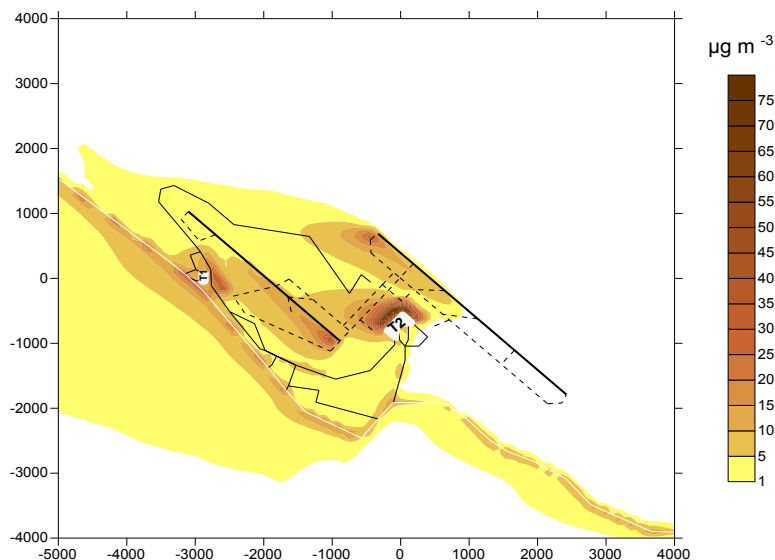
aktuális napi időjárás függvényében 30 és 100 $\mu\text{g m}^{-3}$ között változnak. Az első esetben a repülőgépek által okozott legnagyobb koncentráció a 31L felszállási pont közelében található (ÉNy-i szél esetén), a második esetben a 13L felszállási pont közelében (D-i szél), míg a harmadik esetben mindkét felszállási pont közelében (változik a szélirány a nap folyamán). Természetesen a harmadik esetben a koncentráció értékek a felszállási hely környékén kb. fele akkorák, mint az első két esetben, mivel a felszállások megoszlanak a két felszállási pont között.



3. ábra. Napi átlagos NO_x koncentráció ÉNy-i szél esetén.



4. ábra. Napi átlagos NO_x koncentráció D-i szél esetén.



5. ábra. Napi átlagos NO_x koncentráció szélfordulás esetén.

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék

Eseti kibocsátás hatásainak elemzése

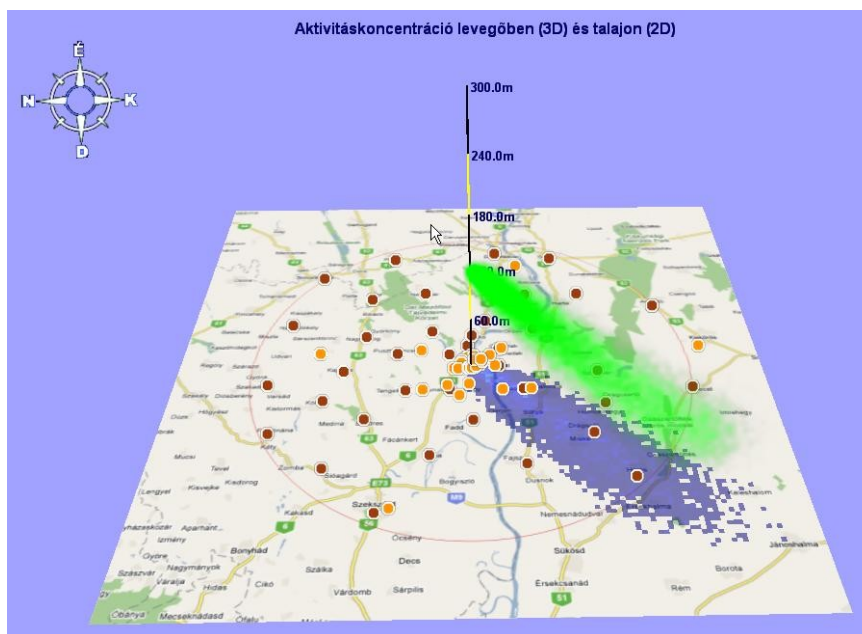
A nukleáris létesítmények, atomerőművek üzemeltetése során nem kerülhető el bizonyos mennyiségű radioaktív anyag környezetbe, elsősorban a légkörbe és felszíni vizekbe kerülése (normál üzemi kibocsátások). Ezen túlmenően az atomerőművek biztonságos üzemeltetése ellenére fel kell készülni veszélyhelyzetekre, balesetekre, melyek során nagy aktivitású radioaktív anyagok is a környezetbe kerülhetnek (baleseti kibocsátások). Ezért a hatósági követelmények mellett a társadalom és a tudományos közélet részéről is egyre nagyobb az igény, hogy pontosan ismerjük, és hatékonyan előre jelezzük az állandó levegőszennyezés vagy egy eseti nukleáris baleseti kibocsátás hatását a környezetre, és főként az ott élő lakosságra.

Az emisszió, a kémiai átalakulások, a terjedés és az ülepedés, valamint az élő és élettelen környezetet érő terhelés minél pontosabb leírására és becslésére, egy komplex szemléletmódra van szükség. Az elmúlt években kifejlesztettünk egy Euler-típusú terjedési modellt és esettanulmányokat készítettünk, érzékenységi vizsgálatokat, szinoptikus klimatológiai elemzéseket végeztünk a Paksi Atomerőműben történő esetleges baleseti szituációkra (Lagzi *et al.*, 2006).

Az erőmű térségére elkészítettünk egy háromdimenziós Lagrange-típusú terjedési modellt is, amely alkalmas különböző szennyezőanyagok terjedésének a leírására és képes gyorsan és pontosan előre jelezni a légszennyezési és dózis szinteket lokális skálán. A TREX baleseti kibocsátási modell a Paksi Atomerőmű területén történő esetleges baleset során a légkörbe került radioaktív izotópok kibocsátását, terjedését, bomlását és ülepedését szimulálja. A programmal egyéb származtatott mennyiség (aktivitáskoncentráció és különböző dózisosok) is számíthatók (6. ábra). A modell két különböző tartományon számol: az egyik a Paksi Atomerőmű 30 km-es körzete, a másik az erőmű közvetlen (10 × 10 kilométeres) környezete. A kisebb tartományra vonatkozó számítások részletesebb felbontású rácson történnek. A programcsomaggal különböző célokra

alkalmas szimulációk végezhetők (operatív használat, éles baleseti helyzet modellezése, gyakorlatok, tesztek végzése).

A programcsomag operatív és baleseti helyzetben történő használatakor azt vizsgáljuk hogy az adott pillanatban bekövetkező balesetnek milyen következményei lennének. Ebben az esetben nagyon fontos hogy a modell minél rövidebb idő alatt lefusson és az eredmények alapján megalapozott döntéseket lehessen hozni. Ennek érdekében elkészítettünk egy párhuzamosított modellváltozatot. A párhuzamosítást korszerű, a célra megfelelő videokártyán végeztük. A párhuzamosított program több független szálon fut, amelyek egymás mellett, egyszerre működnek a szimuláció sebességét illetve pontosságát nagyban megnövelve.



6. ábra. Részlet a TREX baleseti kibocsátási modell megjelenítő felületéről.

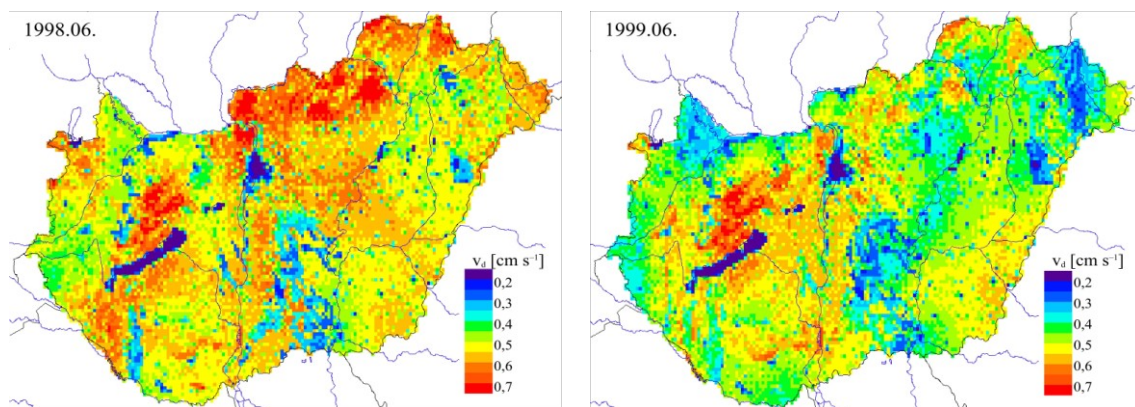
Folyamatos szennyezőanyag terhelés meghatározása

A légköri szennyezőanyagok által okozott környezeti terhelés meghatározása nagy kihívást jelentő feladat. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén mi is azt a célt tűztük ki, hogy elkészítünk egy olyan modell-rendszert, amely Közép-Európa területére, részletes tér- és időbeli felbontásban képes a szennyezőanyagok terjedését, hígulását és ülepedését számítani. A modellfejlesztés előnye többek között, hogy rugalmasan kezelhetők a bemenő adatbázisok, a modellbe egyszerűen beilleszthetők a legújabb kutatási eredmények. A TREX terjedési–kicserélődési modellel becsülhető a folyamatos szennyezőanyag terhelés mértéke (*Lagzi et al.*, 2004; 2006; *Mészáros et al.*, 2006).

Eddig elsősorban az ózon felszínközeli koncentrációjának és száraz ülepedésének eloszlását becsültük. Meghatároztuk a különböző koncentráció- és fluxus alapú mérőszámokkal jellemzett terhelés mértékét is különböző vegetációs periódusokra. A 7. ábrán az ózon száraz ülepedési sebességének térbeli eloszlása látható 1998. és 1999. júniusára. Az ábráról leolvasható két legfontosabb következtetés az, hogy az ülepedési

sebesség értéke nagy eltéréseket mutat az egyes növényállományokra, és az eltérő időjárási helyzet miatt még azonos hónapokban is jelentős különbségek alakulhatnak ki az egyes évek között.

A modellszámításokat Magyarország területére, egy szabályos ($0,025 \times 0,0375$ fokos, kb. $2,5 \times 2,5$ km-es felbontású) rácson végeztük. A bemenő meteorológiai mezőket az ALADIN numerikus előrejelzési modell szolgáltatta. Korábbi elemzések és részletes érzékenységi vizsgálatok (Mészáros et al., 2008; 2009) azt az eredményt szolgáltatták, hogy hazánk területén a felszín-légkör közti kölcsönhatásokban kiemelt szerepet játszik a talajnedvesség. Emiatt a TREX legújabb verziójában finomítottuk a talajnedvesség-becselő rutint. A továbbiakban egyes almodulok finomítást, valamint más szennyezőanyagok koncentrációjának és ülepedésének becslését tervezzük a modellel.



7. ábra. Az ózon átlagos 12 UTC-s ülepedési sebessége 1998 és 1999 júniusában.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Áramlástan Tanszék

Dinamikusan változó felbontású szennyezőanyag-terjedési modell fejlesztése

Napjainkban egyre nagyobb hangsúlyt kap az új ipari létesítmények és egyéb épületek levegőminőségre gyakorolt hatása. Különösen fontos szempont ez nagyvárosok esetében, ahol a légszennyezés gyakran kritikussá válik.

Az immissziós szintek, városi környezetben, erősen függenek az észlelési pont környezetének geometriai viszonyaitól, például egy utca két oldalán is jelentős eltérést mutathat a légszennyezés az utcakanyon hatás és az épületek körül kialakuló egyéb komplex áramlások miatt. A városfejlesztés levegőminőségre gyakorolt hatásainak felmérésére tehát olyan előrejelzési módszerek szükségesek, amelyek figyelembe veszik a geometriai részletek áramlásmódosító hatásait.

Szélcsendes időben a nagyvárosok légcseréjének egyetlen hajtóereje a városokban jellemző magasabb léghőmérséklet okozta termális szellő (városi hősziget konvekció). E jelenség vizsgálatára többféle megközelítés lehetséges. Ennek egyik ismert módja többek között a mért korrelációkra épülő statisztikai modellek fejlesztése (Unger et al., 2006) és valamilyen mezoskálájú meteorológiai szimulációs szoftver vizsgálati tartományába beágyazottan működő, épületek körüli áramlások szimulációjára alkalmas célszoftver alkalmazása (Kesarkara et al., 2007).

Egy 2005-ben megkezdett kutatási projekt keretében a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszékén a mérnöki gyakorlatban bevált, komplex geometriájú terekben lejátszódó áramlások szimulációjára alkalmas szoftverek adaptálásával fejlesztik a fenti jelenség elemzésére használható eljárást. E megközelítés egyik előnye, hogy az elemzés részletességét (a numerikus háló finomságát) teljesen szabadon képes kezelni; képes részletes felbontásban meghatározni az egyes épületek közüli áramlást, ugyanakkor távotérben a felbontás hirtelen átmenetek nélkül ritkítható a struktúrátlan háló alkalmazásának köszönhetően. Kidolgozásra került egy olyan matematikai eljárás is (Kristóf *et al.*, 2006; 2008), amely alkalmas a mezoskálájú légköri hatásoknak a mérnöki gyakorlatban alkalmazott, általános célú szoftverekben történő figyelembevételére. Jelenleg a nedvesség- és hőtranszport, valamint a felszín energia- mérlegének számítására alkalmas részmodellek fejlesztése folyik.

Az új szimulációs módszer a szennyezőanyagok légköri terjedésének számos további területén látszik előnyösen alkalmazhatónak, többek között kémények és hűtőtoronyok fáklájának számítására és nehéz gázok talajközeli terjedésének vizsgálatára. Néhány további lehetséges mikrometeorológiai alkalmazása lehet a lokális szélerősödések, gravitációs hullámok, lejtőviharok előrejelzése vagy a termik- és felhőképződés elemzése.

Köszönetnyilvánítás

A cikk elkészítéséhez hozzájárult az OTKA K68253 pályázat. A szerzők köszönetet mondanak egyes munkákban való aktív részvételükért, segítségükért a következő kollégáknak: dr. Horányi András, dr. Kullmann László (Országos Meteorológiai Szolgálat), dr. Ács Ferenc, Czender Csilla, Komjáthy Eszter, Molnár Ferenc, Szakály Tamás, Szi- nyei Dalma, Vincze Csilla (Eötvös Loránd Tudományegyetem).

Irodalomjegyzék

- Kesarkara, A.P., Dalvi, M., Kagainalkara, A. and Ojha, A., 2007: Coupling of the Weather Research and Forecasting Model with AERMOD for pollutant dispersion modeling. A case study for PM10 dispersion over Pune, India, *Atmos. Environ.* **41**, 1976–1988.
- Kristóf G., Rác N., Bányai T., Gál T., Unger J. és Weidinger T., 2006: A városi hősziget által generált konvekció modellezése általános célú áramlástan szoftverrel – összehasonlítás kisminta kísérletekkel, *A 32. Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa*. 95–104. OMSZ, Budapest.
- Kristóf, G., Rác, N. and Balogh, M., 2008: Adaptation of pressure based CFD solvers for mesoscale atmospheric problems, *Boundary-Layer Meteorol.* **131**, 85–103, DOI 10.1007/s10546-008-9325-7.
- Lagzi, I., Mészáros, R., Horváth, L., Tomlin, A., Weidinger, T., Turányi, T., Ács, F. and Haszpra, L., 2004: Modelling ozone fluxes over Hungary, *Atmos. Environ.* **38**, 6211–6222.
- Lagzi, I., Mészáros, R., Ács, F., Tomlin, A.S., Haszpra, L. and Turányi, T., 2006: Description and evaluation of a coupled Eulerian transport-exchange model. Part I: Model development, *Időjárás* **110**, 349–363.

- Mészáros, R., Lagzi, I., Juhász, Á., Szinyei, D., Vincze, Cs., Horányi, A., Kullmann, L. and Tomlin, A.S., 2006: Description and evaluation of a coupled Eulerian transport-exchange model. Part II: Sensitivity analysis and application, *Időjárás* **110**, 365–377.
- Mészáros, R., Szinyei, D., Vincze, Cs., Lagzi, I., Turányi, T., Haszpra, L. and Tomlin A.S., 2009: Effect of the soil wetness state on the stomatal ozone fluxes over Hungary, *Int. J. Environment and Pollution* **36**(1–3), 180–194.
- Unger, J., Sümeghy, Z., Gál, T. and Balázs, B., 2006: Statistical modelling of the urban heat island using 2 and 2D surface parameters in Szeged, Hungary, *Volume of Abstracts. 8th Conf. on Meteorology-Climatology-Atmospheric Physics*, Athens, 169.

A meteorológiai előrejelzések felhasználói szemmel

Bedó Albin Zoltán

E.ON Földgáz Trade ZRt., 1051 Budapest, Roosevelttér 7–8.,
e-mail: albin.bedo@eon-foldgaz.com

Összefoglaló – Az E.ON Földgáz Trade Zrt. látja el Magyarországon a földgáz közüzemi nagykereskedelmi feladatokat. Éves szinten kb. 12 Mrd m³ földgázt értékesít megközelítőleg 800 – 1100 Mrd Ft értékében. Mivel ennek a forgalomnak a 70%-a hőmérsékletfüggő, a meteorológiai adatoknak jelentős szerepe van:

- az éves- és a havi- tervezésben (hosszútávú hőmérsékleti statisztikák, féléves és havi bontású hőmérsékleti előrejelzések),
- a rövidtávú tervezésben, forrás lehívásokban (napi tényadatok és 10 napos meteorológiai előrejelzések),
- a napi- és napon belüli- gázkereskedelem irányítási feladataiban (órás tényadatok, napon belüli hőmérséklet előrejelzések).

Az éves tervezéshez jelenleg még nem áll rendelkezésre használható pontosságú hosszú távú hőmérsékleti előrejelzés. Az Országos Meteorológiai Szolgálat féléves időhorizontra vonatkozó előrejelzése – néhány éves tesztelési tapasztalat alapján – még nem érte el az üzleti használhatósághoz szükséges pontosságot. Ez a terület mégis kiemelt figyelmet érdemel, mivel a földgázfogyasztás jelentős éven belüli szezonálisitása miatt több mint 3 Mrd m³ földgázt kell egy féléven keresztül tárolni, s ezen a tárolási költségen több 10 Mrd Ft nagyságrendű megtakarítást lehetne elérni a hosszú távú hőmérsékleti előrejelzés pontosságának fejlesztésével.

A havi előrejelzések szerepe a készletezési stratégia rendszeres felülvizsgálatában, a várható felesleg optimális árú értékesítésében van.

Rövidtávra automatizáltan történik a fogyasztás előrejelzése, 50 egyedi és összevont fogyasztási helyre heti, három napos és egy napos időhorizontra. Ennek megfelelően a 10 napos és a vizsgált napot megelőző hőmérsékleti előrejelzések a fő adatforrások. Az előrejelzések üzleti szerepe a földgázforrások lehívásában, a rendszeregyensúly megtervezésében és a napi földgáz és kapacitás ügyletek elbírálásában van. A nominált igények pontatlanságának kezelése árazott opciók lehívásával történik, így az előrejelzési pontosságnak direkt hatása van a költségekre. A rendszeregyensúly megbomlása esetén napon belüli ismételt pontosításra van szükség, amihez célszerűen a már eltelt órák tényadatai is felhasználásra kerülnek.

A földgáz kereskedelemben az egyik legfontosabb befolyásoló tényező az időjárás. A földgázfogyasztás előrejelzések pontosságának a növelése érdekében, a hőmérséklet mellett további meteorológiai elemek előrejelzései is tesztelésre kerülnek, mint a szélsébség, vagy a napsütéses órák száma. A földgázpiac kiteljesedésével várhatóan egyre több kereskedő jelenik meg ezen adatszolgáltatások előfizetőjeként, s az erre irányuló kutatások esetleges szponzoraként.

Az előadás ábrái megtalálhatók az OMSZ honlapján:

http://www.met.hu/omsz.php?almenu_id=omsz&pid=metnap34&pri=0&mpx=1

Médiameteorológia–2008

H. Bóna Márta¹ és Reisz András^{1,2}

¹Országos Meteorológiai Szolgálat, 1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1., e-mail: bona.m@met.hu

²ELTE TTK, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A., e-mail: enso@freemail.hu

Összefoglaló – A cikk első részében röviden áttekintjük a médiameteorológia néhány elméleti kérdését. Ismertetjük a médiameteorológia humán eszközeit, amelyek a leírt szöveg, az élőbeszéd és a képi megjelenítés; ez utóbbihoz tartozik a meteorológusok személyes szereplése a különböző média fajtákban. Rövid elemzést adunk a személyes szereplés előnyeiről, követelményeiről. Áttekintjük, hogy a médiameteorológia révén a meteorológia mely területeiről áramlik a legtöbb információ a „befogadók”-hoz. Érdekes kérdéseket vet fel az információ-terjesztés irányának a vizsgálata. Újfajta meteorológiai információcsere jött létre az Internet révén. Fontos témakörünk a meteorológiai közszolgálati tevékenysége és a médiameteorológia kapcsolata is. Végül az elmúlt 5–6 év legfontosabb médiameteorológiai eseményeiről adunk rövid áttekintést az OMSZ-ra és a privát szférára nézve.

A cikk második része a médiameteorológia gyakorlati sajátosságairól és a szakmát legtöbbször hátrányosan érintő kérdésekről szól. Először meghatározzuk, hogy mi a fő tevékenysége egy médiameteorológusnak és milyen módon sajátíthatja el ezt a speciális szakterületet külföldön, valamint a hazai gyakorlatban. Ezt követően megvilágítjuk, hogy manapság milyen kihívásokkal kell megküzdenie egy televíziós meteorológusnak a szakmában és a médiában. Külön foglalkozunk az időjárás-jelentésekben alkalmazott képi megjelenítéssel, amelyben 1997 óta jelentős változások történtek és megemlítjük a tudományos magyarázó szövegek fontosságát is. Végül szót ejtünk az elektronikus információterjesztés meteorológiai vonatkozásairól, és a médiameteorológusok újabb feladatáról, a klímaváltozással kapcsolatos kérdések tolmácsolásáról is.

Bevezetés

A média latin eredetű szó, a médium többes száma, amely közvetítő eszközt, közeget jelent. A „médiák” alak tulajdonképpen szabálytalan, de ma már ez a latin nyelvvel kapcsolatos szabálytalanság beépült nyelvünkbe, úgy használjuk, hogy a szó egyes száma média, többes száma médiák. A média tehát a tömegkommunikáció számára közvetítő eszköz, amelynek segítségével üzenetek, információk jutnak el nagyszámú „befogadó”-hoz, akik életkorban, értékrendben, felfogásban, lakóhelyben, ízlésben nagyon különbözőek. A média körébe soroljuk a rádiót, a televíziót, a könyveket, újságokat, magazinokat, filmeket, műsoros videó- és hangkazettákat, óriásplakátokat, egyre növekvő mértékben és súllyal az internetet, sőt bizonyos szempontból a mobiltelefont is.

A médiameteorológia a különböző kommunikációs csatornákon keresztül történő meteorológiai információk terjesztése, a terjesztés gyakorlati tevékenysége és az ehhez szükséges elméleti tudás (meteorológiai és kommunikációs) összessége. Így a médiameteorológia a meteorológia egy speciális területévé vált.

Meteorológiai információ a médiában

Az információk, ismeretek terjesztésének humán eszközei: a leírt szöveg, az élőbeszéd és a képi megjelenítés külön-külön, együttesen, vagy bármilyen párosításban. Először az

írott meteorológiai szöveg terjesztésének voltak meg a technikai feltételei (könyvek, táviró, az újságok, amelyekben képi információ is megjelent), majd a meteorológiával kapcsolatos beszéd „továbbítása” is lehetővé vált (telefon, telefon-hírmondó, rádió), később, a televíziózás terjedésével megkezdődött a meteorológiai képi információk gyorsütemű fejlődése. Napjainkban az internet egyesíteni tudja a meteorológiai írott szöveg, a beszéd és a képi információk gyors, egyéni és intézményi információterjesztési feladatait.

Egyébként az írott szöveg és a beszéd – mint médiameteorológiai terjesztési eszközök – a magyar nyelv kiemelten fontos szerepére irányítják a figyelmet. Ugyanakkor a képi megjelenítés egyáltalán nem játszik alárendelt szerepet a két másik terjesztési eszközzel szemben, épp oly fontos eszköze a médiameteorológiának, mint a leírt szöveg és a beszéd.

Bármely meteorológiai információt tartalmazó szövegnek, vagy elhangzó beszédnek meg kell felelnie a magyar nyelv szabályainak. Alapkövetelmény az, hogy a leírt szövegben helyesírási hibának nem szabad lenni, beszéd esetében annak nyelvtani hibától, beszédhibától mentesnek kell lennie és jó stílusban, jól megfogalmazott információkat kell tolmácsolni helyes hangsúlyozással. Mindezek ismeretéhez, biztonságos és magas színvonalú alkalmazásához tanulásra, gyakorlásra, szakemberek segítségére van szükség. Ennek ellenére a gyakorlatban előfordulnak hibák, amelyekből néhány „gyöngyszemet” bemutatunk.

A meteorológiai információ képi megjelenítésnek is megvannak a fortélyai. A szakmai és esztétikai szempontokon kívül meg kell találni a helyes arányt, hogy mennyi meteorológiai képi információt lehet közölni a befogadókkal. Napjainkban a videografikai megoldások miatt legalább olyan fontos az informatikusok tevékenysége, mint a kommunikációs szakembereké.

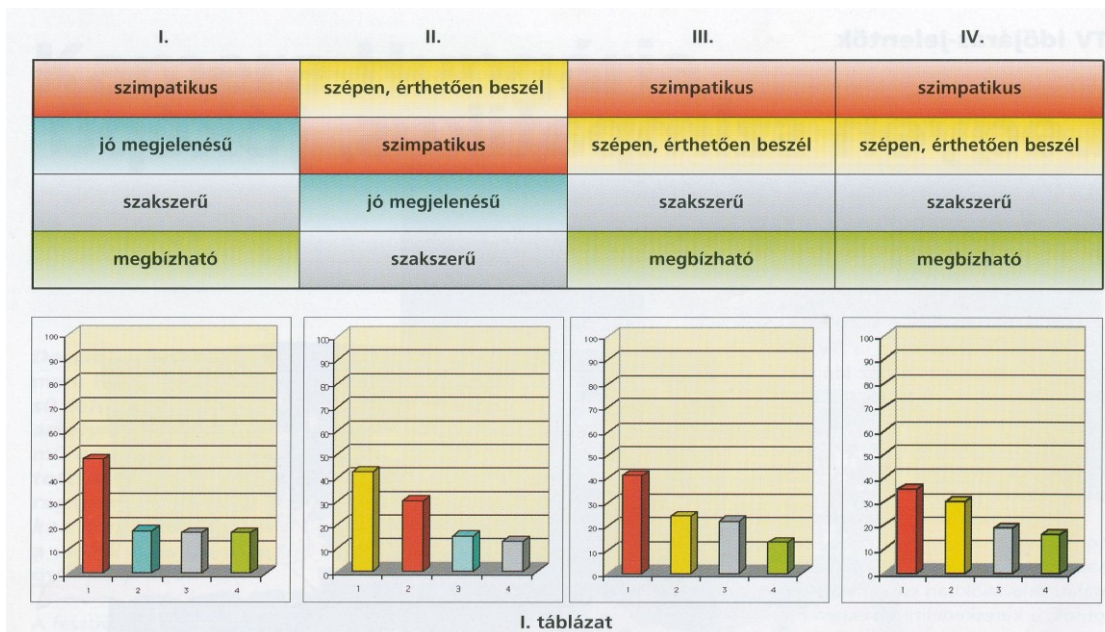
Meteorológusok a médiában

A meteorológusok rendszeres, személyes megjelenése új lehetőséget teremtett az információ terjesztésben, amelyből a meteorológia, ezen belül az előrejelzés tudományága csak profitálhatott. Az előrejelzések szakszerűek, a grafikai elemek, műhold képek, egyszerűbb időjárás térképek, stb. bevonásával látványosabbak, érthetőbbek lettek. A meteorológusoknak meg kellett tanulni a jó kommunikálás alapszabályait.

Először inkább csak a rádióban, de nagyon hamar a televízióban is továbbítottak információt a meteorológusok, Magyarországon a rádióban a 60-as évek végétől, a televízióban a 70-es évek legelejétől. Egy közvélemény kutatás alapján (90-es évek vége) kiderült, hogy a nézők által kedvelt TV-s médiameteorológusok kisebb-nagyobb eltéréssel, de mindegyikük rendelkezik a következő 5 tulajdonsággal: szimpatikus, szépen, érthetően beszél, szakszerű és megbízható (*I. táblázat*).

A meteorológusoknak a médiában történő személyes megjelenése nemcsak azért volt érdekes, mert új színfolt volt, hanem azért is, mert a meteorológus által tolmácsolott időjárás információban nincs információtorzulás. Az az időjárás-jelentés ugyanis, ami egyszer „a tömegkommunikáció útvesztőibe” bekerül, a legkritikább esetben „ússza meg” torzulás nélkül. A mindennapi gyakorlatból számtalan példát hozhatunk fel. Az időjárás-jelentéseket (előrejelzéseket) a hírszerkesztők, a különböző műsorok vezetői nagyon

gyakran szabadon átfogalmazzák, a fontos elemek helyett kevésbé fontos részleteket emelnek ki. Egy példa: 2008. július 21. A prognózisban az szerepelt, hogy „... az erős szél éjszakára csak kissé mérséklődik”, ehelyett a Magyar Rádióban az hangzott el, hogy: „... szélcsend lesz.”



I. táblázat. Közvéleménykutatás a Tv-ben szereplő négy meteorológus legfontosabb tulajdonságairól (1990-es évek eleje).

A médiameteorológia iránti elvárások

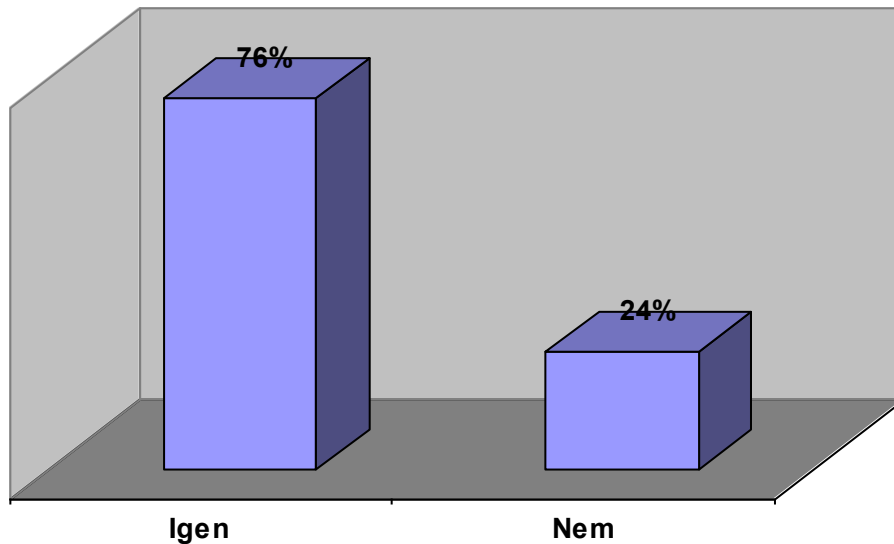
A médiameteorológiai tevékenységen belül a legtöbb információ továbbítása három fő területről történik:

- az időjárás előrejelzése, ezzel együtt az időjárási veszélyjelzések, az aktuális, mért és megfigyelt adatok,
- az éghajlatváltozással kapcsolatos témakör,
- az ismeretterjesztés, amely felöleli a meteorológia teljes egészét.

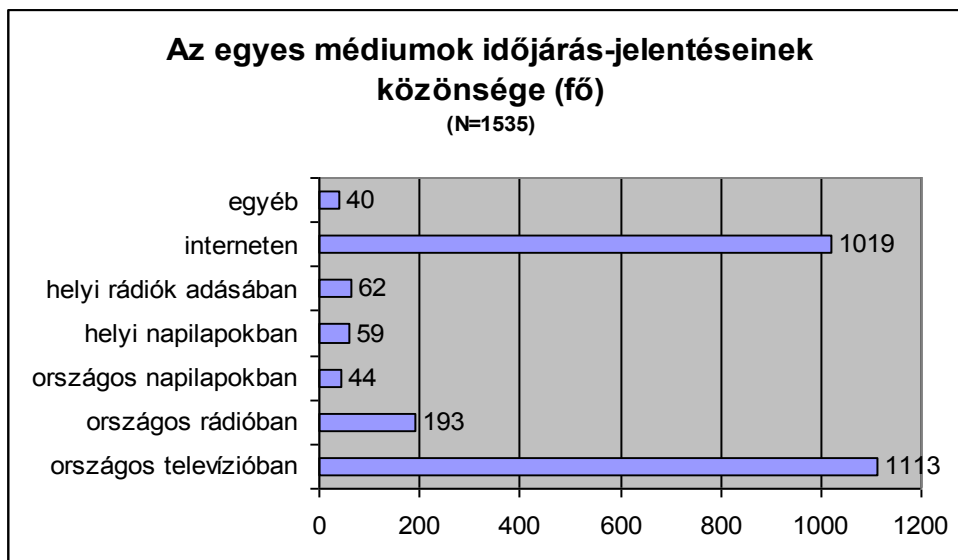
Legnagyobb érdeklődésre az időjárás előrejelzés tart számot. Ez a téma csaknem mindenkit érdekel, a várható időjárás ismeretére szükség lehet a mindennapi élet, a munkavégzés és a szabad idő eltöltése szempontjából egyaránt.

Jó néhány évtizeden keresztül a meteorológiai információk útja egyirányú volt, az Országos Meteorológiai Szolgálattól a lakosság felé. Az információ hosszú ideig az ún. hagyományos médián keresztül jutott el az érdeklődőkhöz. A technika és az elektronika fejlődése nyomán azonban olyan új eszközök váltak mindennapossá, amelyekkel most már a lakosság felől is érkeznek meteorológiai információk az OMSZ felé. Új elem az internet-es információcsere a meteorológia iránt érdeklődő egyes csoportok, emberek között. Mivel e csoportok is részt vesznek a meteorológiai információ terjesztésében, ezért az információcsere új útjainak a képviselői szintén részeseivé válnak a médiameteorológiai tevékenységnek (pl. a viharvadászok, vagy több új, szakmailag értékes és komoly honlap).

TÁJÉKOZÓDIK-E RENDSZERESEN A VÁRHATÓ IDŐJÁRÁSRÓL?



1. ábra. Közvéleménykutatás a „várható időjárás” iránti érdeklődésről.

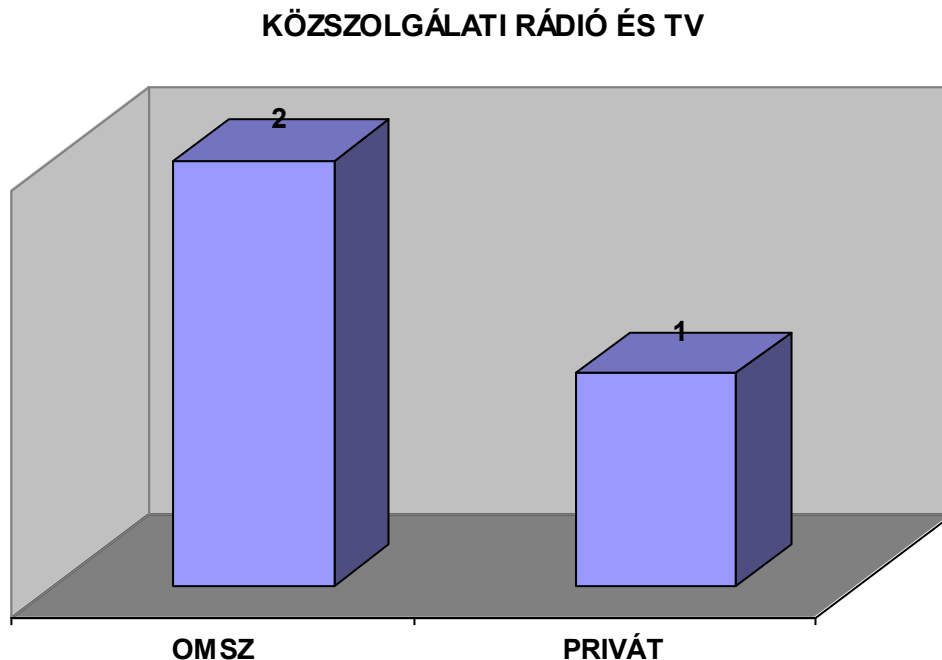


2. ábra. Az egyes médiumok időjárás-jelentéseinek a közönsége. Egy közvélemény kutatás a kilencvenes évekből.

A médiameteorológia területén napjainkban az OMSZ-on kívül jelen van a privát meteorológia és a hobby meteorológia is. Sokfajta, különböző színvonalú produktum található. Felelősséggel természetesen mindenki csak a saját tevékenységéért, mi az OMSZ produktumaiért tartozunk. Mégis a meteorológia, mint szakma és tudomány – az esetleges nem kellő színvonalú produktumok miatt – veszíthet hitelességéből. A nagyközönség számára nem egészen világos és számukra talán nem is fontos, hogy melyik produktum vagy produkció kihez köthető. A meteorológiai információ forrásának mindenkori

korrekt megnevezése adhatja a megoldást, legyen az szóban, írásban vagy egy honlapon.

A médiameteorológiai tevékenységnek csak akkor van értelme, ha a „befogadók”, megértik, helyesen értelmezik és használni is tudják az időjárás információt. Tudni kell tehát, hogy mi a „befogadók” véleménye erről a tevékenységről, konkrétan az OMSZ médiameteorológiai tevékenységéről. Az OMSZ az elmúlt 20–30 évben általában évtizedenként egy-egy közvélemény kutatással tájékozódott minderről. Érdekes lenne összehasonlítani az egyes felméréseket, ez azonban csak részben lehetséges.



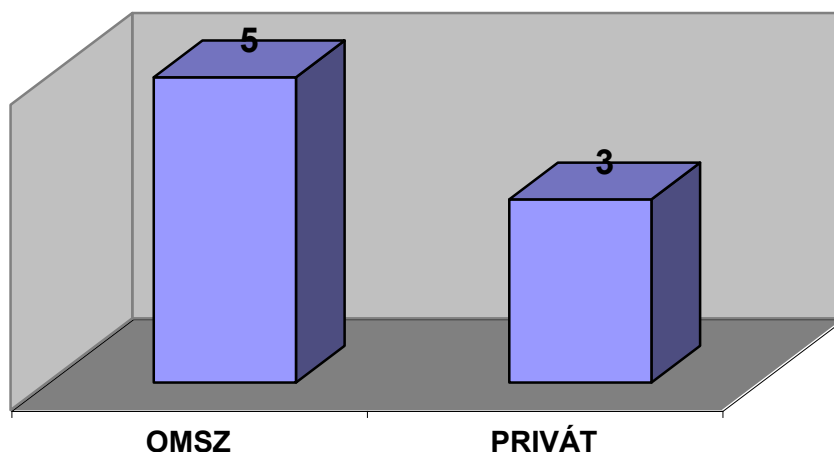
3. ábra. Az időjárás-előrejelzések információ forrása a közszolgálati rádió és TV csatornákon 2008-ben.

A médiameteorológia elmúlt fél évtizede

A következőkben egy rövid áttekintést adunk az elmúlt 5–6 év médiameteorológiai történéseiből a sajtó, a rádió és a televízió területéről, kizárólag az OMSZ szemszögéből nézve. Ezekre az évekre a privát szférával folytatott piaci verseny nyomta rá a bélyegét, sikerek és kudarcok egyaránt voltak.

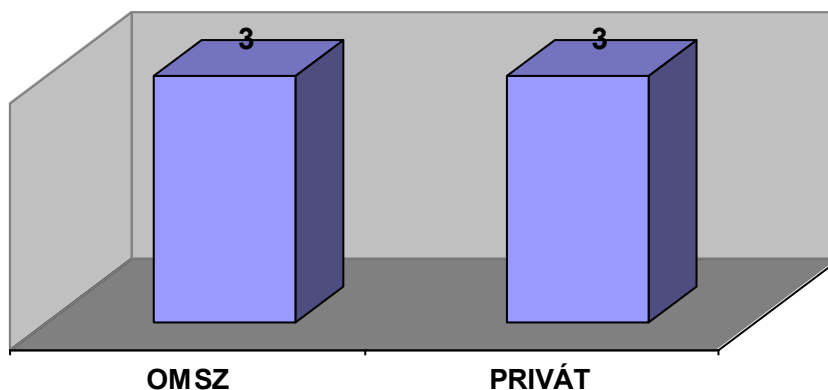
A korábbi felmérésekben pl. internettel kapcsolatos kérdés fel sem merült, hisz a kilencvenes években Magyarországon még nem terjedt el (1. és 2. ábra). A legfrissebb felmérés pedig már szinte csak az internetezők körében készült. Épp ezért az ország lakosságát illetően nem tekinthető reprezentatívnak, viszont épp annak a társadalmi csoportnak a véleményét fejezi ki, amely az informatikai újdonságok iránt a legnyitottabb. Az mindegyik felmérésből egyértelműen kiderült, hogy a meteorológia iránt az érdeklődés nagy. Jó hír az is, hogy a médiameteorológiai tevékenység általában megfelel az elvárásoknak.

KERESKEDELMI TV-K



4. ábra. A kereskedelmi televíziók meteorológiai információs forrásának a megoszlása az OMSZ és a privát szféra között 2008-ban.

KERESKEDELMI RÁDIÓK



5. ábra. A kereskedelmi rádiók meteorológiai információ forrásának a megoszlása az OMSZ és a privát szféra között 2008-ban.

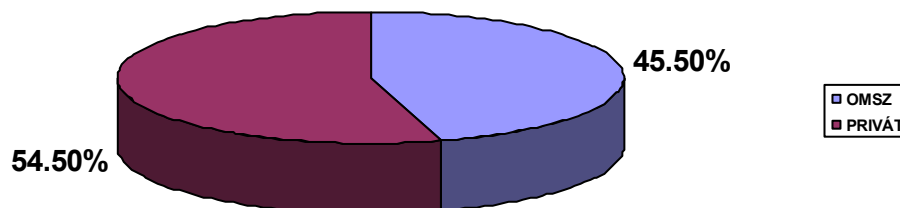
2002-ben a két közszolgálati TV (MTV, Duna) számára az OMSZ Stúdióban készültek az időjárás-jelentések, akkoriban naponta még jóval több élő, vagy rögzített időjárás-jelentés volt. A kereskedelmi TV-k közül a TV2 számára az OMSZ szolgáltatja az információkat, de az adások az ő saját stúdiójukban készültek (ez így van ma is). Júniustól az RTL Klub is az OMSZ információit igényelte, az adások a saját stúdiójukban készültek, csakúgy, mint most. Az év végén beindult a Hír TV, amely szintén az OMSZ információit rendelte meg. A Magyar Rádió és az országos sugárzású kereskedelmi rádiók (Danubius, Sláger, Juventus, Info) az OMSZ előrejelzéseit használták.

A 2003, de még inkább a 2004-es esztendő a piacvesztés éve volt. Csökkent az adások száma a közszolgálati TV-knél, a Hír TV (igaz csak átmenetileg) elpártolt az OMSZ-tól. Egyre több országos napilap mondta fel a szerződést, hasonlóan a kereskedelmi rádiókhoz. 2005-ben a Duna TV számára is megszűnt a szolgáltatásunk. Visszatért viszont a Hír TV. Az RTL Klubnál fiatal OMSZ-os meteorológus vette át a stafétabotot a privát szféra szereplőjétől. Néhány új TV is jelentkezett, az újságok közül a Metro ismét a mi ügyfelünk lett.

2007-ben a Magyar Rádió műsorstruktúrájának teljes átalakulása érzékenyen érintette az időjárás-jelentéseket is. Jelentős mértékben csökkent a meteorológusok által tolmácsolt időjárás-jelentések száma, a Reggeli Krónikában pl. 38 év után egyáltalán nincs élő bejelentkezés. Helyette a bemondók, műsorvezetők ismertetik az előrejelzést, időjárási adatokat. Az első évben ezzel kapcsolatban nagyon sok rossz tapasztalatot gyűjtöttünk. A bemondók, de különösen a műsorvezetők elég gyakran teljesen szabad értelmezésben tolmácsolták az időjárás-jelentéseket, rövid részleteket kiragadva, önkényesen értelmezték azt.

A 2008-as médiameteorológiai piaci helyzetképet – a teljesség igénye nélkül – a 3–6. ábrák szemléltetik. A továbbiakban tekintsük át a médiameteorológia gyakorlati sajátosságait, a manapság leggyakoribb és a szakmát legtöbbször negatívan érintő kérdéseket is.

MÉDIAPIACI RÉSZESEDÉS



6. ábra. Az OMSZ és a magán meteorológiai társaságok médiapiaci részesedése 2008-ban.

Médiameteorológus, mint szakember és nem, mint „időjós”!

Mindenekelőtt tisztázzuk, hogy a médiameteorológiával (tehát a meteorológiai információk médián keresztül történő terjesztésével) foglalkozó szakembert elvileg médiameteorológusnak hívjuk, gyakorlatilag azonban nálunk ez a megnevezés még nem hódított teret az „időjós” kifejezéssel szemben. A szó szoros értelmében médiameteorológusnak számít, aki időjárás-jelentést tolmácsol a televízióban és rádióban vagy éppen elkészíti az időjárással kapcsolatos grafikát valamelyik sajtóorgánumnak. A hazai gyakorlatban az ún. „médiás” beosztott látja el a fenti feladatokat, de például rádiós szerep-

lést, a kötelező mikrofonengedély megszerzése után az ügyeletes szinoptikus is vállalhat, akinek a fő hivatása az időjárás előrejelzés. Más országokban a nem meteorológusok olyan gyors kurzusokon (training) is részt vehetnek, ahol elsajátíthatók a szakterület legfontosabb szakmai és kommunikációs követelményei. Az a szakember, aki ezeknek eleget tesz, joggal nevezhető médiameteorológusnak még akkor is, ha nem feltétlenül van meteorológus képesítése. Nálunk a nem meteorológus médiaszereplők az OMSZ meteorológus kollégáival való rendszeres konzultáció révén szerzik meg tapasztalataikat, ennek ellenére azzal a szólás-mondással élünk, hogy: „*gyakorlat teszi a mestert*”.

Meteorológus is lehet „médiasztár”?

A személyes megjelenés (részben a rádióban való megszólalás is) új utat nyitott az információ terjesztésében, amelyből főleg az előrejelzés tudományága eleinte mindenképpen profitálhatott, manapság azonban egyre gyakrabban „átesünk a ló túlsó oldalára”. Ez alatt azt értjük, hogy ma már az időjárás-jelentések zömmel látványos, szórakoztató elemként épülnek be a televízió-csatornák műsorszerkezetébe elveszítve ezzel eredeti, hírközlő jellegüket. A hazai médiavilágban és a körülötte kialakult felfogásban ezek után nem meglepő, hogy a meteorológiát művelő és főként televízióban közvetítő szakember (az eredeti jelentésnél maradva médiameteorológus) egyre inkább „médiasztárként” kerül a köztudatba. Ez a manapság gyakori kifejezés felkapott, nagyon híres (nem feltétlenül közkedvelt vagy szimpatikus) személyt, közszereplőt (sportoló, színész, énekes, stb.) jelent. Jelenleg a mondás úgy tartja: „*aki egyszer megjelenik a televízióban, az már sztár*”. Arra a kérdésre, hogy ez miért van így, nagy valószínűséggel egy médiaszakértő tudna válaszolni, számunkra sokkal fontosabb az okozat, nevezetesen az ezzel járó szakmai egyensúlyvesztés lehetősége. Ma bármelyik televízióban szereplő meteorológus kollégának több kihívással is meg kell küzdeni. Egyrészt, meg kell felelnie a nézőnek fellépésével, ruházatával, beszédével, másrészt tudatában kell lennie annak, hogy „öt” időnként „kritikus szemek” is nézik, akiknek nem annyira fontos a megjelenés, mint a tartalom, a szakmai színvonal. Ezt az egyensúlyt néha nehéz betartania, főleg akkor, ha egy-két alkalommal éneklésre vagy főzésre invitálják egy szórakoztató műsorba. Ezek után kicsit furcsának tűnhet, ha bonyolultnak tűnő izobárok, infravörös műholdfilmek előtt magyarázza el a várható időjárást még akkor is, ha egyébként professzionális módon eleget tesz eredeti hivatásának. Az ilyen nem szakmai jellegű fellépések elutasítása persze nem biztos, hogy megoldást jelent, ugyanis az elmúlt évtized folyamán jelentősen megváltozott a televíziós kultúra arculata, amelynek alakításában a televíziós meteorológusnak is egyre nagyobb mértékben szerepet kell vállalnia. Ha mindezt optimálisan, okosan műveli, akkor nem sérül egyik oldal érdeke sem, ellenkező esetben a szakmát is kár érheti.

Verseny az időjárás-jelentések produkciójában

Az audiovizuális médiában a grafikai megjelenítés (a személyes megjelenés mellett) a második legfontosabb tényező az információközlésben, amelyet számítógép-grafikus és kommunikációs szakértők együttesen alkotnak meg az időnként csekély beleszólással rendelkező meteorológus közreműködésével. Ezen a téren 1997 óta, tehát a kereskedelmi média elterjedése óta nagy változások történtek. Egy-egy csatorna igyekszik sajátos,

megnyerő, versenyképes „műsort” létrehozni a szintén ő általa kiválasztott szereplő mellé. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy a tévénéző kedvére válogathat a „produkciók” közül, sőt egy adott időjárási helyzetet és annak jövőbeli változását is szinte minden téren eltérő formában tekinthet meg (7. ábra). Ezzel kapcsolatban gyakori és sajnálatos tapasztalat, hogy a szóban forgó „felhasználó” időnként eltérő prognózist lát még akkor is, ha nevezetesen ugyanaz a forrás (esetünkben OMSZ) szolgáltatja az információt. A fő közszolgálati csatornán jelenleg is a „legszélsőségesebb eset” fordul elő, nevezetesen itt a hivatalos forráson kívül jelen van a privát szféra meteorológiai produkciója is.



7. ábra. Médiameteorológusok a televízió képernyőjén.

Mit árulnak el a szimbólumok?

Fontos kérdés, hogy hogyan értelmezhetők a térképeken megjelenő szimbólumok. Csak egy-két példát ragadunk ki a sok közül. Ha az előrejelzésben az szerepel, hogy „a sok napsütés mellett szórványosan záporok is kialakulhatnak”, akkor értelemszerűen egy Magyarország térképen záporokat ábrázoló szimbólumok kerülnek fel (8. ábra). Mindez több nézőben is azt a hatást keltheti, hogy országsszerte lesz eső, mivel a térképhez képest arányaiban nagyobb méretű esőcseppek ezt emelik ki jobban.

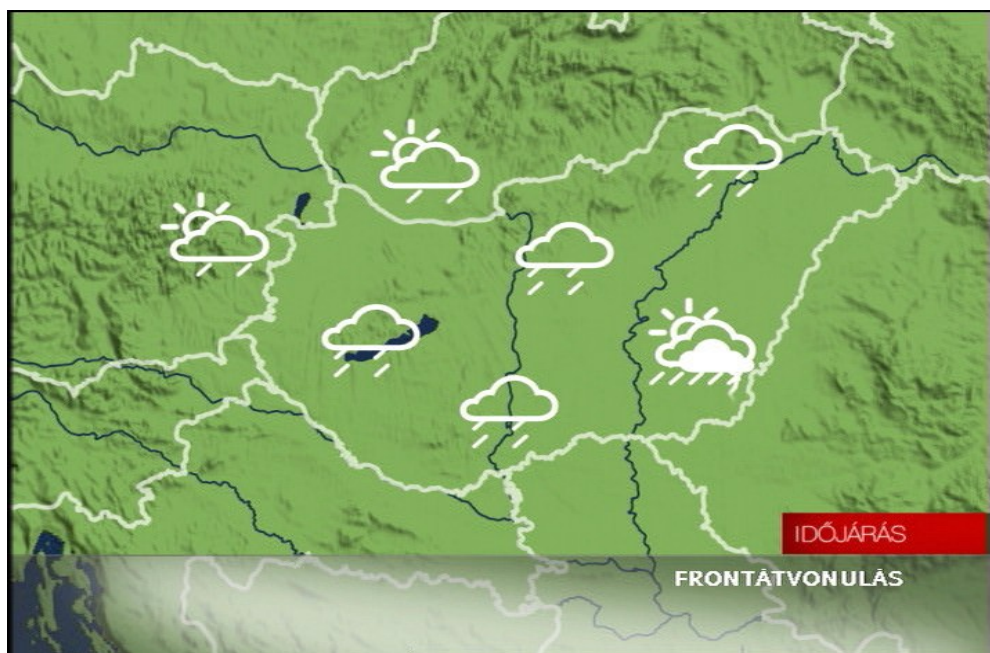
Egy másik példa az időbeli és térbeli változás problémáját illusztrálja. Ha egy gyors mozgású hidegfront alkalmával kell a prognózist interpretálni, akkor előfordulhat, hogy a nap első felében még napsütés várható, majd délutánra megérkezik a front csapadékot adó felhőzete és átmenetileg zápor, zivatar is kialakulhat viharos széllel, ezt követően azonban ismét napsütés következik (9. ábra). Mivel a térképek egy meglehetősen tág időszakra vonatkoznak (fél napra), megint az „esős” szimbólumok

kerülnek túlsúlyba. Ennek egész napos borongós, csapadékos idő lesz az összhatása, holott még napsütésről is szó volt.



8. ábra. Hogyan is ábrázoljuk: szórványos záporok?

Természetesen a meteorológus szóbeli kommentárja mindezt világosabbá teheti a néző számára, de ennek ellenére sem kerülhető el teljes mértékben az információtorzulás és időnként az ezzel járó szakmai hitelvesztés rajtunk kívül álló okok, esetenként egy hivatalos „showman” meteorológiai produkciója miatt.



9. ábra. Hogyan is ábrázoljuk: frontátvonulás?

Szakmaiság kontra egyszerűség

Rendszeresen felmerülő kérdés, hogy milyen arányban szerepeljen egy időjárás-jelentésben szakkifejezés vagy tudományos magyarázó szöveg. Erre talán azt lehet válaszolni, hogy tudomásunk szerint bármely szakma képviselője élhet és él is szakkifejezések használatával mondanója kifejtésekor, miért pont a meteorológia legyen kivétel. Nekünk szakembereknek folyamatosan tudatosítanunk kell, hogy a légkör fizikai törvényeknek engedelmeskedik és ennek kiszámítása nem pusztán jóslás. Egy 2 perces jelentésben talán megengedhető, hogy a napos időt anticiklonnal, a csapadékot pedig ciklonokkal és frontokkal hozzuk kapcsolatba feltéve, hogy van erre vonatkozó képi információ. Ezzel egyrészt bővítjük a tudást, másrészt méltó módon tesszük „kirakatba” tudományunkat. Ezek után nem kérdés, hogy mindezt csak hivatásos meteorológus tudja hitelesen elvégezni, mert ki az, aki olyan repülőre ül fel, ahol a pilóta ugyan jóképű, de fogalma sincs a repülőgép irányításról.

Időjárás a világhálón

A modern információs társadalom forradalmi vívmánya az elektronikus publikálást megtestesítő Internet szolgáltatás. Az ezt képező és hálózatokba kötött számítógépekről, valamint a rajtuk tárolt és egymás között nagy sebességgel áramló hatalmas (Terrabájt méretű) adatmennyiségről van szó. Egy ismert internetes keresőprogrammal tett kísérletünk alkalmával (tized másodpercek alatt!) csak az „időjárás” címszóra milliós nagyságrendű találatot kaptunk, tehát az akkor létező és feltehetően magyar weblapokon összesen ennyiszor találkozhattunk volna ilyen jellegű információval. Az egyre inkább népszerű „szupercella” ugyanakkor tízezres, míg az ehhez szorosan kapcsolódó „mezociklon” kifejezés már csak százas nagyságrendben jelent meg az internetes oldalakon. Ennek ellenére nem lenne meglepő, ha pár év múlva már erről a gigantikus zivatarfelhőről is több millió hivatkozást találnánk ebben a virtuális közegben. Az interneten való publikálás egyik nagy előnye, hogy a felhasználó (kliens) egyszerűen, hivatkozásokon (link) keresztül juthat egyik „elektronikus ismerettárból” a másikba. Így egy jól megszerkesztett ún. website (honlap) segítségével autodidakta módon szereshető összefüggő tudás egy adott témán, például a meteorológia tudományán belül. További fontos előny, hogy az írott szövegen kívül határozottan jelen vannak a képek, az animációk és a hangok is. Ezáltal a keresés (vagy szörfözés) a legmagasabb fokon, audiovizuális, illetve interaktív módon történhet elősegítve ezzel a gyorsabb és hatékonyabb információszerzést. Bátran kijelenthetjük, hogy az OMSZ hivatalos honlapja, amely 2001-ben újult meg, a fentieknek teljes mértékben eleget tesz minőségi és tartalmi oldalról egyaránt és ma is töretlenül bővül, fejlődik.

Az előnyök mellett meg kell említenünk a hátrányokat is. Az elektronikus publikálás jelenleg szinte teljes szabadságjoggal rendelkezik, ezért gyakorlatilag bárki, bárhol és bármit közzé tehet a Világhálón. A meteorológia sem képez kivételt, vele kapcsolatban sorra jelennek meg a különböző témájú weblapok, amelyek közül néhány valóban színvonalas és szakmailag is elismert (metnet, szupercella), de ugyanakkor egyre több az üzleti és reklám célokra, valamint kedvtelésből alkotott honlap is. Utóbbiak elkövetik „ellenünk” azt a hibát, hogy időnként tudományosan nem megalapozott, szenzációs vagy bulvár hangvételű cikkeket jelentetnek meg, miközben az internetes reklá-

mok feltüntetésével (banner) kerülnek előnyös helyzetbe és akár évekig fennmaradhatnak. Éppen ezért az említett milliós nagyságrendű találat az időjárás témakörével kapcsolatban nem feltétlenül autentikus forrásból származik, de ennek felderítése, a felhasználó általi szelektálás már az egyéni igényesség és tájékozottság alapján dől el. A mi feladatunk az, hogy a hamisnak vagy hibásnak tűnő információkra lehetőség szerint reagáljunk és korrigáljuk azokat.

Médiameteorológusok a klímavédelem szolgálatában

A klímaváltozás tényének és a vele járó társadalmi és gazdasági problémáknak a médiában való közlése egyre gyakrabban visszatérő jelenség. Ezzel kapcsolatban már nagyon sok fajta nyilatkozat született, amelynek egy része természetes módon félelmet és bizonytalanságot is generált. Az ezzel foglalkozó tudományos szakembereken kívül nekünk médiameteorológusoknak is az a plusz feladatunk, hogy ezt jó kommunikációs stratégiával, az információközlésnek erre a célra bevált módszereivel és eszközeivel enyhítsük. Ennek időszerűségét bizonyítja, hogy 2007 tavaszán az Európai Bizottság égisze alatt létrejött egy szakmabeliekből és médiameteorológusokból álló szervezet, amelynek célja a lakosság hatékony és közérthető formájú tájékoztatása a klímaváltozással kapcsolatban, elősegítve az emberek egyéni hozzájárulását a természetes környezet és az éghajlat védelméhez.

Összefoglaló megjegyzések

Cikkünk áttekintést nyújtott a jelenlegi hazai médiameteorológiai tevékenység elméleti és gyakorlati vonatkozásairól, valamint az elmúlt 5–6 év legfontosabb médiameteorológiai eseményeiről az OMSZ-ra és a privát szférára nézve. Szó volt az információ-terjesztés humán eszközeiről, a személyes szereplés követelményeiről és előnyeiről, a közszolgálati tevékenység és a médiameteorológia kapcsolatáról. Megvilágítottuk a média és a meteorológia közötti viszonyt, amely a szakmát illetően nem minden esetben hat pozitívan. Példákkal illusztráltuk a televíziós időjárás-jelentések gyakorlati sajátosságait különös tekintettel a szereplőre és a képi megjelenítésre. Végül említést tettünk az internetről, mint újfajta kihívást jelentő médiumról és a meteorológusok szerepéről a klímaváltozás tolmácsolásában.

Fiatal Éghajlatkutatók Fóruma **A Magyar Meteorológiai Társaság tudományos pályázata**

Major György

Magyar Meteorológiai Társaság
1371 Budapest, Fő utca 68. Pf. 433, e-mail: major.gy@met.hu

A Magyar Meteorológiai Társaság 2008. januárjában pályázatot hirdetett 1970. január 1. után született szakemberek számára „Fiatal Éghajlatkutatók Fóruma” elnevezéssel. Eredeti kutatás-fejlesztési munkák eredményeként született, még nem publikált, tudományos dolgozatok beküldését vártuk a következő témakörökben:

- a Föld, valamint Magyarország éghajlatának múltja, jelene és jövője;
- bármely tudomány olyan részterülete, amelyen az éghajlati tényezőknek alapvető szerepe van.

A pályázat céljai azok voltak, hogy

- a fiatal éghajlatkutatók ismertebbé váljanak,
- hazai és nemzetközi ismertségük növekedjen,
- kutatói tevékenységük ösztönzést nyerjen.

A pályázati anyagok beküldésének határideje 2008. szeptember 30-a volt. Az ünnepélyes eredményhirdetésre a Meteorológiai Tudományos Napokon került sor a Magyar Tudományos Akadémia nagytermében november 21-én.

A beérkezett pályaművek száma 19; sem megkésett, sem formailag hiányos munka nem volt köztük, ezért elismerés illeti mindegyik pályázónkat. A pályázatok száma az előzetesen vártnál nagyobb volt. Ez is nehezítette a bírálati munkát, de legfőképpen az, hogy a magas színvonalú dolgozatok nagy részarányt képviseltek. Hosszú tépelődés után a pályázati kuratórium (Bozó László, Czelnai Rudolf, Mészáros Ernő és Major György) úgy döntött, hogy az előzetesen meghirdetett háromtól eltérően öt pályamunkát jutalmaz. Még hosszabb tépelődés után sem sikerült egyetértést kialakítani a legjobb öt pályamunka értékbeli sorrendjéről, ezért a jutalmazásra szánt 1 millió Ft (amelyet az Országos Meteorológiai Szolgálat és a kuratórium tagjai adtak össze) egyenlő részekben került kiosztásra. Ez a megoldás nem felel meg a pályázatoktól elvárható versenyszellemnek, de ez volt a legigazságosabb a versenyzőkkel szemben.

A nyertesek és a pályaműveik címe a szerzők neve szerinti abc-rendben:

- **Czúcz Bálint:** Az éghajlatváltozás biológiai sokféleségre gyakorolt hatásának regionális szintű érzékenységi elemzése
- **Dezső Zsuzsanna:** A magyarországi és közép-európai nagyvárosok hősziget hatásának vizsgálata nagyfelbontású műholdképek alapján
- **Fodor Nándor:** Magyarország agro-ökológiai potenciálja, illetve annak várható alakulása a klímaváltozás hatására

- **Siklósy Zoltán:** A cseppkövek: a múltbéli klíma kutatásának eszközei
- **Szépszó Gabriella:** A Magyarországon várható éghajlatváltozás becslése regionális klímamodellek segítségével.

Amint már említettük, a nyertesek és a többiek munkái közötti értékbeli különbség igen kicsi volt, ezért az összes pályázó minden elismerést megérdemel, mert kiváló munkát végzett!

A nyertesek tanulmányi ösztöndíjat kaptak, amelynek időszaka alatt a pályázati anyagukat a szakterületüknek megfelelő, impakt faktorra bíró tudományos folyóirat követelményeinek megfelelően átdolgozták és elküldték a kiválasztott folyóiratnak publikálás céljából. Ily módon jelentősen hozzájárulnak a hazai, éghajlattal kapcsolatos kutatások nemzetközi megismertetéséhez.

A pályázat lezárására 2009. április 16-án került sor egy olyan tudományos rendezvényen, amelyen az öt díjazott előadásban ismertette pályamunkáját.

A Meteorológiai Tudományos Napok konferenciasorozat eddigyi rendezvényei, az előadáskötetek, és a CD-k adatai

- 1.: 1975. XI. 11-12. (MTA Székház, Nagyterem)
Az Akadémia alapításának 150. évfordulója és a Magyar Meteorológiai Társaság alapításának 50. évfordulója
(Előadáskötet nem jelent meg.)
- 2.: 1976. XI. 15-16. (MTA Székház, Nagyterem)
Légköri folyamatok numerikus modellezése
(Előadáskötet nem jelent meg.)
- 3.: 1977. XI. 10-11. (MTA Székház, Nagyterem)
25 éves az Országos Meteorológiai Szolgálat Marczell György Obszervatóriuma
(Előadáskötet nem jelent meg.)
- 4.: 1978. XI. 14-15. (MTA Székház, Nagyterem)
Meteorológiai előrejelzések
Tormássyné Papp Zsuzsanna (szerkesztő), 1979: Meteorológiai előrejelzések. Meteorológiai Tudományos Napok '78. (ISBN 963 7701 25 7) Az Országos Meteorológiai Szolgálat Hivatalos Kiadványai XLVIII. kötet, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 161 oldal.
- 5.: 1979. XI. 15-16. (MTA Székház, Nagyterem)
Meteorológiai megfigyelések
Lépp Ildikó (szerkesztő), 1979: Meteorológiai megfigyelések. Meteorológiai Tudományos Napok '79. (ISBN 963 7701 46 X) Az Országos Meteorológiai Szolgálat Hivatalos Kiadványai LI. kötet, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 148 oldal.
- 6.: 1980. XI. 20-21. (MTA Székház, Nagyterem)
Az éghajlat ingadozása és kölcsönhatása az emberi tevékenységgel
Martos Ferenc (főszerkesztő), 1981: Tudományos ülésszakok, emlékülések. Meteorológiai Tudományos Napok 1980. november 20-21. Az éghajlat változásának és változékonyságának elméleti kérdései. Az MTA Föld- és Bányászati Tudományok Osztályának Közleményei 14. kötet, 2-4. szám, 157–251. oldal. Az éghajlat és az emberi tevékenység. Az MTA Föld- és Bányászati Tudományok Osztályának Közleményei 14. kötet, 2-4. szám, 253–326. oldal.
- 7.: 1981. XI. 19-20. (MTA Székház, Nagyterem)
A környezetvédelem és időjárás módosítás meteorológiai kérdései
(Előadáskötet nem jelent meg.)

- 8.: 1982. XII. 2-3.** (MTA Székház, Nagyterem)
A légköri erőforrások feltárásának és hasznosításának kérdései
Major György (szerkesztő), 1984: *A légköri erőforrások feltárásának és hasznosításának kérdései. Meteorológiai Tudományos Napok '82.* (ISBN 963 7701 72 9) Az Országos Meteorológiai Szolgálat Hivatalos Kiadványai LVII. kötet, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 224 oldal.
- 9.: 1983. XI. 17-18.** (MTA Székház, Nagyterem)
Műholdmeteorológia és távérzékelés a meteorológiában
(Előadaskötet nem jelent meg.)
- 10.: 1984. XI. 22-23.** (MTA Székház, Nagyterem)
Ötven éves a Balatoni Viharjelző Szolgálat
(Előadaskötet nem jelent meg.)
- 11.: 1985. XI. 21-22.** (MTA Székház, Nagyterem)
A légköri savas ülepedés okai és következményei
Mészáros Ernő (szerkesztőbizottsági elnök), 1986: *A légköri savas ülepedés okai és következményei. Összevont szám. Időjárás 90, 2-3., 65-191.* oldal.
- 12.: 1986. XI. 26-27.** (MTA Székház, Nagyterem)
Mezőgazdaság és meteorológia
Mészáros Ernő (szerkesztőbizottsági elnök), 1987: *Mezőgazdaság és meteorológia. Összevont szám. Időjárás 91, 2-3., 57-208.* oldal.
- 13.: 1987. XI. 19-20.** (MTA Székház, Nagyterem)
A környezet regionális és globális változásai
Mészáros Ernő (felelős szerkesztő), 1988: *A környezet regionális és globális változásai. Speciális szám. Időjárás 92, 2-3., 57-189.* oldal.
- 14.: 1988. XI. 17-18.** (MTA Székház, Nagyterem)
Matematikai módszerek a meteorológiában
Mészáros Ernő (felelős szerkesztő), 1989: *Matematikai módszerek a meteorológiában. Speciális szám. Időjárás 93, 2-3., 65-166.* oldal.
- 15.: 1989. XI. 16-17.** (MTA Vári kongresszusi terem)
Víz, időjárás, éghajlat
Mészáros Ernő (felelős szerkesztő), 1990: *Víz, időjárás, éghajlat. Speciális szám. Időjárás 94, 2-3., 65-180.* oldal.
- 16.: 1990. XI. 22.** (MTA Vári kongresszusi terem)
A légköri ózon keletkezése, eloszlása és jelentősége
Mészáros Ernő (felelős szerkesztő), 1991: *A légköri ózon keletkezése, eloszlása és jelentősége. Speciális szám. Időjárás 95, 2-3., 65-130.* oldal.

- 17.: 1991. XI. 19.** (OMSz Székház, Díszterem)
Meteorológia és növénytermesztés
Tánczer Tibor (szerkesztő), 1993: Meteorológia és növénytermesztés. Meteorológiai Tudományos Nap '91. (ISBN 963 7702 51 2) Az Országos Meteorológiai Szolgálat Hivatalos Kiadványai LIX. kötet, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 92 oldal.
- 18.: 1992. XI. 19-20.** (MTESZ Budai Konferencia Központ, Nagyterem)
Műholdmeteorológia
(Előadaskötet nem jelent meg.)
- 19.: 1993. XI. 18-19.** (MTESZ Székház, Konferenciaterem)
Éghajlatváltozás – éghajlati szélsőségek
(Előadaskötet nem jelent meg.)
- 20.: 1994. XI. 17-18.** (MTESZ Székház, Konferenciaterem)
Az időjárás előrejelzése
(Előadaskötet nem jelent meg.)
- 21.: 1995. XI. 16-17.** (MTESZ Budai Konferencia Központ, Nagyterem)
Új és intenzív megfigyelő eszközök alkalmazása a meteorológiában
(Előadaskötet nem jelent meg.)
- 22.: 1996. XI. 14-15.** (MTA Székház, Díszterem)
Matematika és fizika a meteorológiában. 100 éves az Időjárás című folyóirat
(Előadaskötet nem jelent meg.)
- 23.: 1997. XI. 20-21.** (ELTE Aula)
Az éghajlatváltozás és következményei
Dunkel Zoltán (szerkesztő), 1998: Meteorológiai Tudományos Napok '97. Az éghajlatváltozás és következményei. (ISBN 963 9902 76 8) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 289 oldal.
- 24.: 1998. XI. 19-20.** (MTA Székház, Nagyterem)
Az időjárás és az éghajlat hatása a növény-víz kapcsolatrendszerre
Mika János (szerkesztő), 1998: Meteorológiai Tudományos Napok '98. Az időjárás és az éghajlat hatása a növény-víz kapcsolatrendszerre. (ISBN 963 7202 77 6) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 173 oldal.
- 25.: 1999. XI. 18-19.** (MTA Székház, Nagyterem)
Időjárási és éghajlati szélsőségek
Hunkár Márta és Mika János (szerkesztők), 1999: Meteorológiai Tudományos Napok 1999. Időjárási és éghajlati szélsőségek. (ISBN 963 9902 76 8) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 213 oldal.

- 26.: 2000. XI. 23-24. (MTA Székház, Nagyterem)
A levegőkörnyezet monitoringja, állapotának értékelése és szabályozása
Hunkár Márta és Mika János (szerkesztők), 2000: Meteorológiai Tudományos Napok 2000. A levegőkörnyezet monitoringja, állapotának értékelése és szabályozása. (ISBN 963 9902 76 8) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 164 oldal.
- 27.: 2001. XI. 15-16. (MTA Székház, Nagyterem)
A légköri erőforrások hasznosításának meteorológiai alapjai
Mika János (szerkesztő), 2001: Meteorológiai Tudományos Napok 2001. A légköri erőforrások hasznosításának meteorológiai alapjai. (ISBN 963 7702 84 9) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 192 oldal.
- 28.: 2002. XI. 14-15. (MTA Székház, Nagyterem)
A meteorológiai előrejelzések és alkalmazásaik
Mika János (szerkesztő), 2002: Meteorológiai Tudományos Napok 2002. A meteorológiai előrejelzések és alkalmazásaik. (ISBN 963 7702 86 5) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 188 oldal.
- 29.: 2003. XI. 20-21. (MTA Székház, Nagyterem)
Az időjárás numerikus előrejelzése
Weidinger Tamás (szerkesztő), 2003: Meteorológiai Tudományos Napok 2003. Az időjárás numerikus előrejelzése. (ISBN 963 7702 87 3) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 180 oldal.
- 30.: 2004. XI. 18-19. (MTA Székház, Nagyterem)
Intenzív meteorológiai megfigyelések
Gyuró György és Nagy József (szerkesztők), 2005: Intenzív meteorológiai megfigyelések. Meteorológiai Tudományos Napok 2004. (ISBN 963 7702 90 3) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 176+16 oldal.
- 31.: 2005. XI. 24-25. (MTA Székház, Nagyterem)
Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások
Weidinger Tamás (szerkesztő), 2006: Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások. Meteorológiai Tudományos Napok 2005. (ISBN 963 7702 93 8) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 231 oldal.
- 32.: 2006. XI. 23-24. (MTA Székház, Nagyterem)
Felhőfizika és mikrometeorológia
Weidinger Tamás és Geresdi István (szerkesztők), 2007: Felhőfizika és mikrometeorológia. Meteorológiai Tudományos Napok 2006. Országos Meteorológiai Szolgálat (ISBN 978-963-7702-97-6), Budapest, 182 oldal.

33.: 2007. XI. 22-23. (MTA Székház, Nagyterem)

A levegőkörnyezet állapota: ökológiai kölcsönhatások és egészségügyi kockázatok. Szervezők: Bozó László, Gelencsér András és Horváth László

Kiadvány: Sáhó Ágnes (szerkesztő), 2008: *A levegőkörnyezet állapota: ökológiai kölcsönhatások és egészségügyi kockázatok. Az előadások írásos változata. Meteorológiai Tudományos Napok 2007.* Országos Meteorológiai Szolgálat Budapest, 62 oldal.

http://www.met.hu/pages/seminars/metnapok/33_MTN_2007.pdf

34.: 2008. XI. 20-21. (MTA Székház, Nagyterem)

Az időjárás előrejelzés korszerű módszerei és alkalmazási területei.

Szervezők: Götz Gusztáv, Horányi András, Sallai Márta és Weidinger Tamás

Kiadvány: Weidinger Tamás (szerkesztő), 2009: *Az időjárás előrejelzés korszerű módszerei és alkalmazási területei. Meteorológiai Tudományos Napok 2008.* Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 174 oldal.

<http://www.met.hu/pages/seminars/metnapok/>

A Meteorológiai Tudományos napok programja, az előadások ábrái és a kiadványok elektronikus formában is megtalálhatók az OMSZ honlapján 2005-ig visszamenőleg.

http://www.met.hu/omsz.php?almenu_id=omsz&pid=seminars&pri=12&mpx=0