

Hallgatók részvétele a kutatásban

Aktuális kutatási témák meteorológus hallgatók számára



Eötvös Loránd Tudományegyetem⁽¹⁶³⁵⁾
Meteorológiai Tanszék⁽¹⁹⁴⁵⁾

Budapest, 2010.

HALLGATÓK RÉSZVÉTELE A KUTATÁSBAN

Aktuális kutatási témák meteorológus hallgatók számára

*A Meteorológiai TDK 2010. évi
nyári iskola előadásainak összefoglalói*

ELTE, Meteorológiai Tanszék, Budapest

Egyetemi Meteorológiai Füzetek
No.23

Szerkesztők: MÉSZÁROS RÓBERT és KOMJÁTHY ESZTER

A kiadásért felel: BARTHOLY JUDIT tszv. egyetemi tanár

Nyomdai kivitelezés: Xerox Magyarország Kft

ISSN 0865-7920
ISBN 978-963-284-162-5

Kiadja: ELTE METEOROLÓGIAI TANSZÉK
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/a.

Készült 120 példányban

Budapest, 2010.

Előszó	5
A 2010. évi Meteorológiai TDK nyári iskola programja	6
Bartholy Judit Kettős jubileum 2010-ben: 375 éves az Eötvös Loránd Tudományegyetem, s 65 éves az ELTE Meteorológiai Tanszéke	9
Weidinger Tamás A tudományos diákkörök szerepe a felsőoktatásban, a meteorológiai TDK tevékenysége	16
Bartholy Judit, Pongrácz Rita, Pieczka Ildikó, Torma Csaba Múlt-jelen-jövő: éghajlati modellezés különböző tér- és időskálán	27
Matyasovszky István Kutatási területek a statisztikus klimatológia és a légköri pollenkoncentráció statisztikus előrejelzése körében	35
Weidinger Tamás TDK témák általános- és mikrometeorológiából	37
Pongrácz Rita, Bartholy Judit, Dezső Zsuzsanna, Kern Anikó A műholdas mérések felhasználása a klimatológiában	45
Mészáros Róbert, Lagzi István, Komjáthy Eszter, Leelössy Ádám Légköri szennyezőanyag terjedés és terhelés modellezése különböző skálán	51
Reisz Andrej, Gaál Áron A szinoptikus időjárás-analízis és előrejelzés módszereinek korszerűsítése	57
Kovács László Meteorológiai munkaállomások, avagy térinformatikai alkalmazások a meteorológia szolgálatában	63
Radics Kornélia, Bartholy Judit, Péliné Németh Csilla Magyarország szélklímája, a szélenergia hasznosítása: múlt, jelen, jövő	69
Péliné Németh Csilla, Czender Csilla Katonameteorológiai mérőrendszerek fejlesztése, a hazai katonai repülőterek mérési eredményeinek és megfigyeléseinek elemzése	75
Bottyán Zsolt Repülésmeteorológiai kutatások a ZMNE Repülésmeteorológiai Laboratóriumában - Numerikus előrejelzési (WRF) és műholdmeteorológiai aspektusok	81
Szabó Tamás Üzemanyagcella modellezés korszerű matematikai módszerekkel	87

Vincze Miklós	
Nagyskálás óceáni áramlási jelenségek laboratóriumi modellezése a Kármán Laboratóriumban.....	93
Juhász Ágota, Tőkei László	
Kertészeti kultúrák vízfogyasztásának mérése	99
Csik András	
Miért nem lesz elég a jövőben a hokedlire felállni, ha jön az árvíz?.....	104
Dombai Ferenc	
MINI radarok meteorológiai alkalmazásai	108
Horányi András	
A meteorológia jéghegy csúcsa: a numerikus prognosztika.....	115
Horányi András, Krüzselyi Iлона, Szabó Péter, Szépszó Gabriella	
A jövő éghajlatának becslése: regionális klímamodellezés.....	121
Ihász István	
Az ensemble középtávú előrejelzések alkalmazási lehetőségei	126
Bonta Imre	
A rövid -és a középtávú időjárás előrejelzés gyakorlati módszertana.....	132
Fehér Balázs	
Csapadék-előrejelzések az Országos Meteorológiai Szolgálatnál.....	140
Tóth Katalin, Kolláth Kornél	
Tapadó hó kialakulásának feltételei, klimatológiája és mennyiségi előrejelzése.....	144
Az Egyetemi Meteorológiai Füzetek eddigi kiadványai	149

ELŐSZÓ

A hagyományokhoz híven idén is megrendezzük a Meteorológus Tudományos Diákkör kétévenkénti nyári iskoláját augusztus utolsó hetében, Szigligeten. Az idei iskola témája a hallgatók részvételi lehetőségei meteorológiai, vagy társtudományi kutatásokban. Az iskola szakmai programjának célja az aktuális, potenciális kutatási témakörök és a hallgatók kutatásokba történő bekapcsolódási lehetőségeinek bemutatása.

E témák természetesen nem fedik le teljes mértékben a hazai meteorológiai kutatásokat, hiszen a programon nem vesznek részt az összes hazai egyetemeken, intézetekben meteorológiai, klimatológiai kutatásokat folytató szakemberek. Ennek oka, hogy elsősorban az Eötvös Loránd Tudományegyetem alapképzési szakjainak meteorológus szakirányos, valamint meteorológus mesterképzés hallgatói számára kívánjuk azokat a kutatási és operatív feladatokat vázolni, melyek potenciális szakdolgozati, diplomamunka, vagy tudományos diákköri munka témául szolgálhatnak. Ezért az iskolára olyan szakembereket hívtunk meg, akik az ELTE hallgatói számára tudnak kutatási programokban való részvételt biztosítani. A nyári iskola első napján az ELTE Meteorológiai Tanszék munkatársai mutatják be kutatásaikat. A második napon a Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálat munkatársai, egyetemi tanszékek és külső intézmények képviselői, valamint az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársai tartanak előadásokat.

A nyári iskola egy másik célja, hogy hallgatók és témavezetők személyesen találkozzanak, kötetlen beszélgetések során kialakuljanak ismeretségek, melyek később a szakmai munkát is gyümölcsözőbbé tehetik. A hallgatók a konkrét témák mellett megismerhetik a tudományos munkákkal szemben támasztott elvárásokat is. Ugyanakkor reméljük, hogy a rendezvény hasznos lesz az előadók számára is. A felsőoktatási képzés átalakulása, az ELTE-n meteorológiai tanulmányokat folytató hallgatók számának utóbbi években történt drasztikus megnövekedése, valamint az a tény, hogy már az alapképzés végeztével is szakdolgozatot kell készíteni a hallgatóknak, új kihívások és kényszerek, esetenként jelentős többletmunka elé állítják a témavezetést vállaló szakembereket. Reméljük, hogy az iskola során az előadók is jobb rálátást kapnak a hallgatói kapacitásra, és az új felsőoktatási szerkezet által támasztott igényekre.

Nem titkolt szándékunk továbbá, hogy a témák bemutatásával hallgatóink ösztönzést kapjanak tudományos diákköri tevékenység folytatására is, ezzel tovább erősítve a hagyományosan erős Meteorológiai Tudományos Diákkört.

Az idei nyári iskola sajátossága, hogy 2010-ben kettős jubileumot is ünneplünk. Az ELTE Meteorológiai Tanszéke idén 65, az Eötvös Loránd Tudományegyetem pedig 375 éves. Szándékunk szerint a program keretében e jeles évfordulókról is megemlékezünk. Nem szándékos egybeesés az iskola helyszínének megválasztása, csak érdekes tény, hogy Szigliget vára idén pont kétszer olyan idős – 750 éves – mint Egyetemünk.

Köszönet illet minden munkatársat, aki részvételével, előadásával, az Egyetemi Meteorológiai Füzetek nyári iskolához kapcsolódó jelen kiadványába készített dolgozatával hozzájárul a nyári iskola sikeréhez. Köszönet Kelemen Fanni és Dobor Laura meteorológus szakos hallgatóknak, akik munkájukkal segítették e kiadvány megjelenését.

A szervezők nevében, de talán valamennyi korábbi nyári iskola résztvevője, előadója nevében külön köszönet illeti az ELTE Meteorológiai Tanszék docensét, dr. Weidinger Tamást, aki 1984 óta, negyed évszázadon keresztül szervezte és bonyolította a Meteorológiai TDK nyári iskoláit és tapasztalatával az idei rendezvény előkészítését is segítette.

Budapest, 2010. augusztus

Meteorológiai TDK Nyári Iskola programja

2010.08.25–27.

Szigliget

Hallgatók részvétele a kutatásban

(Aktuális kutatási témák meteorológus hallgatók számára)

2010.08.25. Szerda		
12.00–13.30		Ebéd
14.00–14.10	Dr. Bartholy Judit , tanszékvezető egyetemi tanár (<i>Meteorológiai Tanszék</i>)	A nyári iskola megnyitása
14.10–14.25	Dr. Michaletzky György , egyetemi tanár, az ELTE TTK dékánja	A Természettudományi Kar helyzete a 375 éves Eötvös Loránd Tudományegyetemen
14.25–14.40	Dr. Bartholy Judit , egyetemi tanár (<i>ELTE Meteorológiai Tanszék</i>)	Kettős jubileum 2010-ben: 375 éves az Eötvös Loránd Tudományegyetem, s 65 éves az ELTE Meteorológiai Tanszéke
14.40–14.55	dr. Weidinger Tamás , docens (<i>ELTE Meteorológiai Tanszék</i>)	A tudományos diákkörök szerepe a felsőoktatásban, a Meteorológiai TDK tevékenysége
14.55–15.10	Nagy Attila , meteorológiai fejlesztő, a XII. OFKD Konferencia (2010) meteorológia szekciójának I. helyezettje (<i>OMSZ, Siófoki Viharjelző Obsz.</i>)	Kistérségű (mezo-gamma skálájú) meteorológiai folyamatok modellezése a WRF-modell alkalmazásával.
15.10–15.30		Szünet
15.30–15.45	Dr. Bartholy Judit , egyetemi tanár (<i>ELTE Meteorológiai Tanszék</i>)	Múlt-jelen-jövő: éghajlati modellezés különböző tér- és időskálán
15.45–16.00	dr. Matyasovszky István , docens (<i>ELTE Meteorológiai Tanszék</i>)	Kutatási területek a statisztikus klimatológia és a légköri pollenkoncentráció statisztikus előrejelzése körében
16.00–16.15	dr. Weidinger Tamás , docens (<i>ELTE Meteorológiai Tanszék</i>)	A felszínközeli légréteg és a határréteg folyamatainak mérése és modellezése
16.15–16.30	dr. Ács Ferenc , docens (<i>ELTE Meteorológiai Tanszék</i>)	A talaj szerepe a meteorológiában és a klimatológiában
16.30–16.45	dr. Pongrácz Rita , adjunktus, (<i>ELTE Meteorológiai Tanszék</i>)	A műholdas mérések felhasználása a klimatológiában
16.45–17.00	dr. Mészáros Róbert , adjunktus, (<i>ELTE Meteorológiai Tanszék</i>) dr. Lagzi István László , tud. munkatárs (<i>Northwestern University, Chicago</i>)	Légköri szennyezőanyag terjedés és terhelés modellezése különböző skálán
17.00–		Szabad program, vacsora egyénileg

PROGRAM

2010.08.26. Csütörtök

8.00–9.00

Reggeli

- | | | |
|-------------|---|--|
| 9.30–9.45 | Kovács László , alezredes, szolgálatfőnök-helyettes
(Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálat) | Meteorológiai munkaállomások, avagy térinformatikai alkalmazások a meteorológia szolgálatában |
| 9.45–10.00 | dr. Radics Kornélia , százados
(Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálat) | Magyarország szélklímája, a szélenergia hasznosítása: múlt, jelen, jövő |
| 10.00–10.15 | Péliné Németh Csilla , százados
(Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálat) | Katonameteorológiai mérőrendszerek fejlesztése, a hazai katonai repülőterek mérési eredményeinek és megfigyeléseinek elemzése |
| 10.15–10.30 | dr. Bottyán Zsolt , docens
(ZMNE, BJKMK, RLI, Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék) | Repülésmeteorológiai kutatások a ZMNE Repülésmeteorológiai Laboratóriumában - Numerikus előrejelzési (WRF) és műholdmeteorológiai aspektusok |

10.30–10.45

Szünet

- | | | |
|-------------|--|--|
| 10.45–11.00 | Szabó Tamás , doktorjelölt
(ELTE, TTK Alkalmazott Analízis és Számításmatematikai Tanszék) | Üzemanyagcella modellezés korszerű matematikai módszerekkel |
| 11.00–11.15 | Vincze Miklós , doktorjelölt
(ELTE, TTK, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék) | Nagyskálás óceáni áramlási jelenségek laboratóriumi modellezése a Kármán Laboratóriumban |
| 11.15–11.30 | Juhász Ágota , tanársegéd, doktorjelölt
(Corvinus Egyetem, Talajtan és Vízgazdálkodás Tanszék) | Kertészeti kultúrák vízfogyasztásának mérése |
| 11.30–11.45 | Csik András , tudományos munkatárs
(VITUKI, Országos Vízjelző Szolgálat) | Miért nem lesz elég a jövőben a hokedlire felállni, ha jön az árvíz? |
| 11.45–12.00 | dr. Wantuch Ferenc , meteorológus szakértő
(NKH Légiközlekedési Igazgatóság) | Meteorológiai tárgyú tevékenység és kutatások a Nemzeti Közlekedési Hatóság Légiközlekedési Igazgatóságánál. |

12.00–13.30

Ebéd

- | | | |
|-------------|---|---|
| 13.45–14.00 | Dr. Bozó László , akadémikus, az Országos Meteorológiai Szolgálat elnöke | Kutatás és operatív feladatok az Országos Meteorológiai Szolgálatnál |
| 14.00–14.15 | Dr. Horváth László címzetes egyetemi tanár, vezető főtanácsos (OMSZ) | Nitrogénvegyületek és üvegház-gázok kicserélődése a légkör és a bioszféra között. |
| 14.15–14.30 | dr. Dombai Ferenc , vezető főtanácsos (OMSZ, Távérzékelési Osztály) | Mini radarok meteorológiai alkalmazásairól |

14.30–14.45	dr. Horányi András , meteorológus (OMSZ, Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztály)	A meteorológia jéghegy csúcsa: a numerikus prognosztika
14.45–15.15	szünet	
15.15–15.30	dr. Horányi András , meteorológus (OMSZ, Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztály)	A jövő éghajlatának becslése: regionális klímamodellezés
15.30–15.45	dr. Ihász István , vezető főtanácsos (OMSZ, Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztály)	Ensemble középtávú előrejelzés
15.45–16.00	dr. Bonta Imre , vezető főtanácsos, osztályvezető (Országos Meteorológiai Szolgálat, Időjárás-előrejelző Osztály)	Rövid- és középtávú előrejelzések készítése az OMSZ-ben
16.00–16.15	Fehér Balázs , meteorológus (OMSZ, Időjárás-előrejelző Osztály)	Csapadék-előrejelzések az Országos Meteorológiai Szolgálatnál
16.15–16.30	Tóth Katalin , meteorológus (OMSZ, Időjárás-előrejelző Osztály) Kolláth Kornél , meteorológus (OMSZ, Repülésmeteorológiai és Veszélyjelző Osztály)	Tapadó hó kialakulásának feltételei, klimatológiája és mennyiségi előrejelzése
16.30–19.00	Szabad program	
19.00–	Közös vacsora az üdülő kertjében	
2010.08.27. Péntek		
8.00–9.00	Reggeli	
10.00–18.00	Választható programok	
	1. Kirándulás autóbusszal:	2. Gyalogtúra:
	Keszthely (szabad program)– Tapolca (szabad program)– Badacsony (szabad program)	Balaton-felvidék, tanúhegyek: Szent György-hegy–Gulács–Badacsony
18.00–	Hazautazás	

**KETTŐS JUBILEUM 2010-BEN:
375 ÉVES AZ EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM, S
65 ÉVES AZ ELTE METEOROLÓGIAI TANSZÉKE**

Bartholy Judit

ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék,
e-mail: bari@ludens.elte.hu

A mindenkori hallgatók hivatottak arra, hogy megismerjék almamáterük történetét, tanulmányaik során elfogadják, s azonosuljanak az intézmény eszmeiségével, majd büszkén továbbvigyék az iskola hagyományait. Mivel a 2010-es év kettős jubileum számunkra ezért bevezetőmet egy rövid ismertetővel indítom.

375 éves az Eötvös Loránd Tudományegyetem

Büszkék lehetnek diákjaink, hogy az Eötvös Loránd Tudományegyetem hallgatói, hiszen az ELTE Magyarország legrégebbi folyamatosan működő, s egyben legnagyobb egyeteme. Az első magyar egyetemet 1395-ben Zsigmond király alapította a fővárosban, de ez az egyetem két évtizedes működés után megszűnt. Az 1480-as években I. Mátyás király tervezte a Budai Várban egy univerzitas megalakítását, de tervei megvalósítására nem maradt ideje, hiszen Pest és Buda 1541-ben a török birodalom része lett.



Ezen meghiúsult kísérletek után 1635-ben Pázmány Péter esztergomi érsek Nagyszombat városában (ma Trnava, Szlovákiában) alapította meg egyetemünk elődjét, melynek vezetését a jezsuita rendre bízta. A jellegzetesen jezsuita egyetem bölcsészeti és teológiai korból állott, jogosult volt a tudományos fokozatok adományozására és már igen korán, 1667-ben jogi karral egészült ki. A 18. században az egyetem egyre inkább állami irányítás alá került és 1769-ben megalakult negyedik, azaz orvosi fakultása és ezzel teljes szerkezetű klasszikus egyetemmé vált.

1. ábra. Pázmány Péter esztergomi érsek

A jezsuita rend feloszlata után 1777-ben az egyetemet Nagyszombatból, az ország közepébe, Buda városába, a királyi palotába költöztették. Az egyetem keretében kezdődött meg a hazai mérnökképzés, és az állatorvosképzés. Az intézményt 1784-ben Pestre költöztették, és itt nyert végleges elhelyezést. Az oktatás nyelve 1844-ig a latin volt, ami a soknemzetiségű hallgatóság számára közvetítő, semleges nyelvnek számított.

1848-ban született meg az első egyetemi törvénycikk, amely a Vallás és Közoktatásügyi Minisztérium fennhatósága alá helyezte az egyetemet, mint nemzeti intézményt és kimondta a tanszabadságot. Az 1867-es kiegyezés után kezdődött az egyetem történetének legintenzívebben fejlődő szakasza. A kari szerkezet nem változott, de új tanulmányi és klinikai épületek, Egyetemi Könyvtár, központi épület készült el, sorra szaporodott a tanszékek száma és az Egyetem Magyarország legfontosabb tudományos központjává nőtte ki magát.

Esetenként már európai és világhírű tudósok működtek katedráin, a hallgatói létszámot tekintve pedig a századfordulón a világ 15 legnagyobb egyeteme közé került. Fél évszázad alatt nyolcszorosára nőtt a hallgatói létszám (1914-ben 8185 főre) ami azért is következett be, mert Magyarországon 1914 előtt mindössze két Tudományegyetem működött. 1895-től a nők is beiratkozhattak az egyetemre.

Az egyetem neve 1921-től királyi magyar Pázmány Péter Tudományegyetem lett. A hallgatók felvételét korlátozta a numerus clausus törvény. A húszas években a budapesti Tudományegyetem fejlesztésére kisebb összegek jutottak, amivel a megcsönkített országban az újonnan létrejött vidéki egyetemek (Debrecen, Szeged, Pécs) igényelték nagyobb támogatást. A második világháború végén sikerült megakadályozni az egyetemi intézmények és hallgatók nyugatra való kitelepítését, így gyorsan megkezdődhetett az újjáépítés.

1945 után új tanárokkal egészült ki a professzori kar, megkezdődött az esti rendszerű oktatás és sok addig egyetemre nem jutó fiatal iratkozhatott be. Az 1948-as baloldali fordulat után alapvetően megváltozott az egyetem szerkezete. 1949-ben a Bölcsészeti Karból kiválva önállósult a Természettudományi Kar, ami egy évszázados terv megvalósulását jelentette. 1950-ben állami utasításra elcsatolták az egyetemtől a Római Katolikus Hittudományi Fakultást, s az önálló akadémia lett. 1951 elején államigazgatási okokból önálló egyetemmé vált az Orvostudományi Kar.

1950-ben az egyetem új neve Eötvös Loránd Tudományegyetem lett, és megszűnt évszázados joga a tudományos fokozatok adományozására. A szigorú államszocializmus időszakában a felvételnél származás szerinti kategorizálást vezettek be, ami nagyon sok igazságtalansággal járt. 1954-től önálló lett az ideológiai és az orosz nyelvi képzést végző Lenin Intézet, s 1953 és 1956 között két-két kisebb karra bomlott fel a Természettudományi és Bölcsészettudományi fakultás.

Az 1956-os forradalom a budapesti egyetemisták megmozdulásával kezdődött, s őket is sújtotta a forradalom utáni megtorlás. A kádári konszolidáció időszakában lassú nyitás kezdődött. 1963-tól eltörölték a származás szerinti felvételi rendszert, de az ELTE nem kapott számottevő fejlesztést, így épületeinek állaga igen leromlott, miközben oktatói és hallgatói létszáma egyre nagyobb lett és az itt felhalmozott szellemi kapacitás a legnagyobb volt egész Magyarországon. 1983-ban az egyetem Tanárképző Főiskolai Karral egészült ki. A nyolcvanas évek közepén kezdődött meg az új látványos egyetemi campus tervezése, majd építése.

A rendszerváltozás után az ELTE hallgatói létszáma az ország többi intézményéhez hasonlóan intenzíven nőtt, a tudományos kapcsolatai gyarapodtak. Az egyetem 1993-ban visszanyerte a tudományos fokozatadás jogát. A rendkívül szétagolt egyetemi hálózat integrálásának során 2000. január 1-jétől az ELTE részévé vált a Bárczi Gusztáv Gyógypedagógiai Főiskolai Kar, valamint a Tanító- és Óvóképző Főiskolai Kar. 2003. szeptember 1. napjától egy további átszervezés keretében további karok kezdtek meg működésüket. Az Informatikai Kar alapvetően a TTK egyes oktatási szervezeti egységeiből, illetve a TFK szakos tanszékéből alakult ki. A Pedagógiai és Pszichológiai Kar javarészt BTK szakterületen működő intézeteinek, illetve a TFK egyes szervezeti egységeinek alapján jött létre. A Társadalomtudományi Kar döntően a BTK Szociológiai Intézetére épült, de átvette a GyFK egy, illetve a BTK több más tanszékét is.

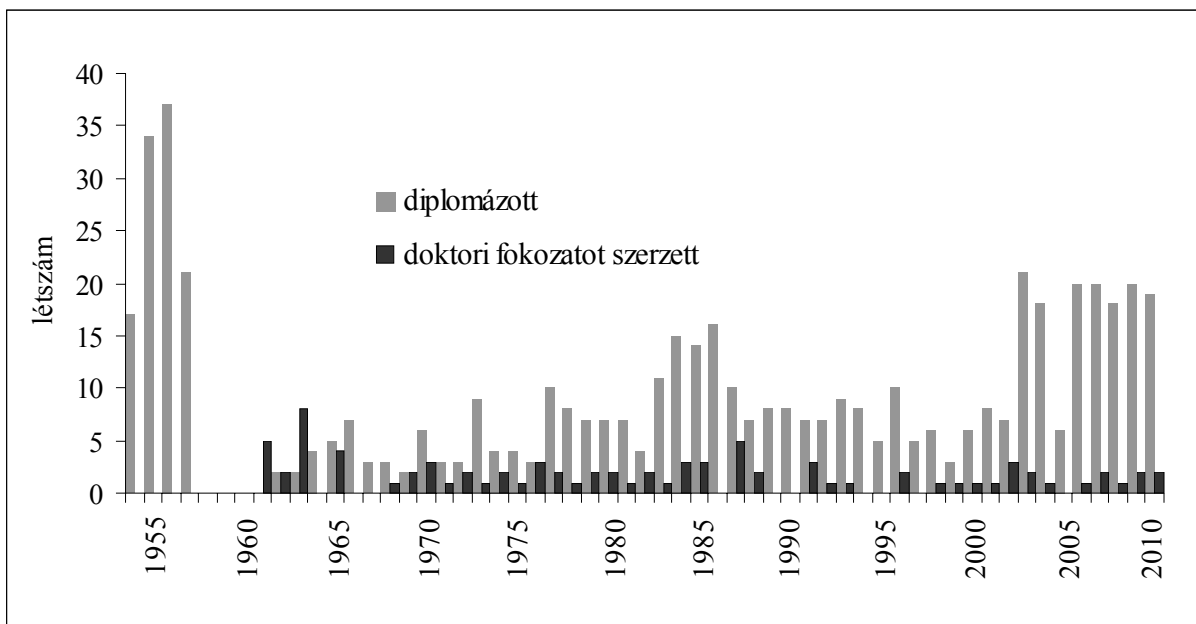
Az ELTE-én számos tudós végzett, aki később nemcsak itthon, de szerte a világban dicsőséget szerzett egyetemünknek, de az országnak is. Itt most csak az öt Nobel díjas tudósunkat sorolom fel:

- Lénárd Fülöp, fizikus (1862–1947)
- Hevesy György, kémikus (1885–1966)
- Szent-Györgyi Albert, biokémikus (1893–1986)
- Békésy György, akusztikus, biofizikus (1899–1972)
- Harsányi János, közgazdász, filozófus (1920–2000)

65 éves az ELTE Meteorológiai Tanszéke

Bár az Eötvös Loránd Tudományegyetemen már az 1890-es évektől folyik meteorológiai kurzusok oktatása, mégis a Tanszék csak 1945-ben alakult meg (ekkor, az 2. ábra/A felső fényképén látható ELTE Természettudományi Kar Múzeum körüli épületében kapott helyet tanszékünk). A meteorológus képzés beindulására még további öt évet kellett várni. 1950–1951–1952-ben – az ún. „megemelt ötéves terv” keretében – három aránytalanul nagy létszámú évfolyam indult, s így az 50-es évek közepén közel száz meteorológus hallgató szerzett diplomát. Az egyetemi oktatók létszáma nem volt elegendő, hogy ezen hallgatói létszám mellett minden elméleti tárgy oktatását, illetve a gyakorlatok vezetését ellássa, ezért az Országos Meteorológiai Intézet (OMI) szakemberei besegítettek az oktatási munkába, mely hagyomány – bár egyre csökkenő mértékben - azóta is él.

A 96 frissen végzett fiatal meteorológus mindegyikének természetesen nem tudott megfelelő szintű állást biztosítani az OMI. Ezért született meg a döntés, hogy a meteorológus képzést átmenetileg be kell szüntetni, s így 1954–1957 között nem vettek fel új hallgatókat meteorológus szakra. 1957-től egy új képzési forma lépett életbe: matematika-fizika tanár szakos, illetve matematikus és fizikus hallgatók harmadik szakként felvehették a meteorológiát. Aki teljesítette az első két év óra- és vizsgakötelezettségeit, azok dönthettek úgy, hogy meteorológus diplomát is szereznek. Ebben a képzési formában, amely 1980-ban zárult, 92 kettős diplomájú szakembert képzett a tanszék. Az 1980–81-es tanévtől ismét egyszakos meteorológiai diplomákat állít ki az Egyetem (1. ábra).



1. ábra: Meteorológus diplomát és doktori fokozatot szerzett hallgatók száma 1954-nél 2010-ig (a BSc képzés keretében diplomát szerzett hallgatókat itt nem tüntettük fel).

E változásra azért volt szükség, mert bár a több diplomával rendelkező fiatal meteorológusok szakmai színvonala megfelelő volt, mégis a meteorológiában és a klimatológiában bekövetkezett gyorsütemű fejlődés (számítógépek alkalmazása a meteorológiai folyamatok modellezésében, az időjárási folyamatok előrejelzésében, műholdas megfigyelőrendszerek) igényelte az egyszakos meteorológus szakembereket. A tanszék a 80-as évek közepén az 2. ábra/B, középső fotóján látható, patinás Ludovika téri épületbe költözött.



2. ábra/A. Múzeum körút 6–8.



2. ábra/B. Ludovika tér 2.



2. ábra/C. Pázmány Péter sétány 1/A.

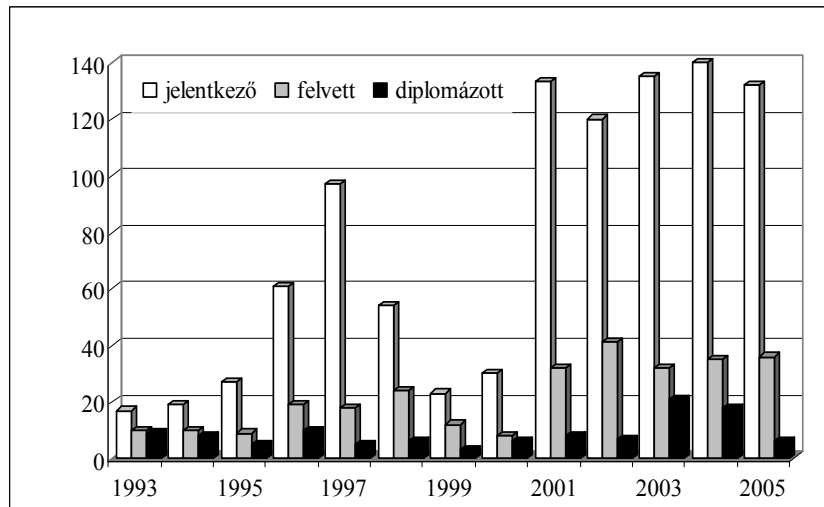
A 90-es évek elején bekövetkezett rendszerváltozás, s az egész világot érintő társadalmi és gazdasági változások az Eötvös Loránd Tudományegyetem lassú rendszerét sem hagyták érintetlenül. Az egyetemmel együtt változott a Meteorológiai Tanszék helyzete, oktatási, kutatási feladatai is. Az elmúlt néhány évben hallgatói létszámunk megduplázódott. A szakunkra jelentkezők száma, s ennek következtében a felvételi pontszámok jelentősen növekedtek. Átköltöztünk a modern, jól felszerelt Lágymányosi kampuszra (2. ábra/C, alsó kép, Pázmány Péter sétány).

A Természettudományi Kar szervezeti struktúrája is megváltozott. Tanszékcsoportok helyett Intézetekbe rendeződnek a tanszékek, ennek megfelelően a Meteorológiai Tanszék is betagozódott az újonnan alakult Földrajz- és Földtudományi Intézetbe. Áttértünk a hagyományos 5 éves képzésről az Európai Unióban egységesen elfogadott BSc + MSc (3+2 éves) képzési rendszerre. Fontos, hogy hallgatóink folyamatában lássák, kövessék, s megértsék ezeket a változásokat, melyeket mind az előadás, mind ez a kis kivonat igyekszik összefoglalni.

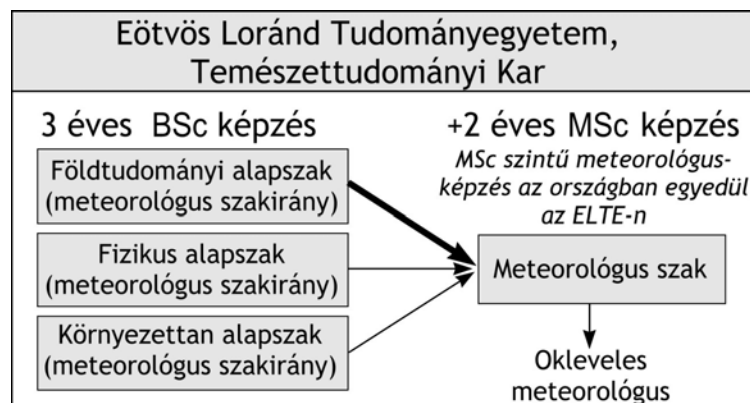
A közelmúlt változásai a Tanszék oktatási és kutatási tevékenységében:

- *A hallgatói létszám nagymértékben megnövekedett:* a BSc, MSc rendszerre való áttérést megelőző tíz évben fokozatosan 6–12 fős évfolyamok helyett a 2004/2005-ös és a 2005/2006-os tanévekben rendre 35 és 36 fővel indult a meteorológus szak első évfolyama. A BSc képzés bevezetését megelőző 13 évre vonatkozó felvételi statisztikákat a 3. ábra mutatja.
- *A bolognai folyamathoz való csatlakozás megtörtént:* az új tantervek kidolgozása – az egyetemen belüli társtanszékekkel, s az országon belüli társegyetemekkel folytatott egyeztetések befejeződött. Az alapszakok alapítási akkreditációja, valamint a szakindítási akkreditációk a Magyar Akkreditációs Bizottságon keresztül megtörténtek. A kétlépcsős oktatásra való áttérés jelentős változásokat eredményez oktatásunk struktúrájában, a tananyag sorrendiségében. A 4. ábra összefoglalja, hogy az új rendszerben mely alapszakokon lehet meteorológus szakirányt felvenni, s onnan hogyan lehet tovább menni a meteorológus MSc képzés irányába. Bár már négy év telt el az új oktatási rendszerben, még mindig nem látszik pontosan, hogy a 2006 szeptemberétől folyó új oktatási rendszerben garantálható-e, megőrizhető-e az oktatás eddigi színvonala. Elvárásaink

szerint lényeges mérföldkő lehet az első BSc évfolyamok államvizsgálója.

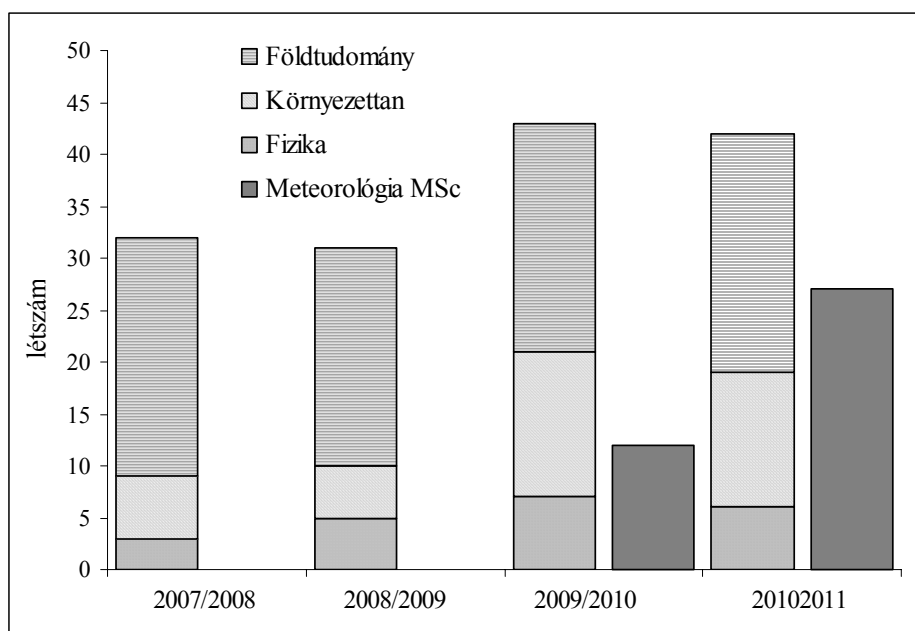


3. ábra. A BSc képzést megelőző időszak meteorológus szakra jelentkezett, felvett, illetve diplomát szerzett hallgatóinak száma.



4. ábra. Hogyan lehet egy hallgató meteorológus az új kétszintű képzési rendszerben?

- A 2006-ban indult kétszintű képzés során az alapszakokon másodévtől szakosodnak a hallgatók. A BSc képzésben a különböző alapszakokról meteorológus szakirányt választó hallgatók, valamint az meteorológus MSc-n tanulmányaikat megkezdő hallgatók létszámát az 5. ábra mutatja.
- *A Doktori iskola keretében is megindult az akkreditált képzés.* 1992-vel megalakult az ELTE TTK-n belül a Földtudományi Doktori Iskola, melynek Földrajz–Meteorológia programjában vesz részt tanszékünk. Az iskola akkreditációja 2002-ben eredményesen lezárult. Közel tizenöt a PhD fokozatot szerzett hallgatóink száma, s további négy doktori cselekmény van folyamatban. A jelenlegi doktorandusz létszám kilenc fő. Ezen adatokkal a doktori iskolánkban (de a kari összesítésben is) jó helyen állunk.



5. ábra. BSc alapszakok meteorológus szakirányos és meteorológus MSc hallgatók létszáma a évszintű képzés bevezetése óta

- *A Meteorológus Tudományos Diákkör nagyon aktívan működik.* A hagyományosan kétévenként megrendezésre kerülő nyári iskola mellett átlagosan évi 10 hallgatónk vesz részt az országos konferenciákon, s nagy hányaduk valamilyen elismeréssel, díjjal tér vissza.
- *Oktatói gárda átalakulása* (fiatalítás, előléptetések): az elmúlt tíz-tizenöt év során a Tanszék oktatói gárdájának mintegy 80%-a kicserélődött, kollégák nyugállományba vonultak, helyükre fiatalok kerültek.
- *Oktatási feladatok bővülése* (új szakok, több szervízóra, nagyobb évfolyamlétszámok, BSc képzés): az elmúlt tíz évben sok új szak indult, a geográfus és humánökológus szak után a környezettan tanári, s a környezettudományi szak, melyek további szervízóra terhelést jelentenek tanszékünk munkatársai részére. A BSc képzéssel tovább növekedett az oktatott hallgatók létszáma, s így a tanszéki munkatársak óraterhelése.
- *Megindult a tankönyvállomány megújítása:* számos új tankönyv készül, van amelyik már kiadásra is került.
- *A terepgyakorlatok profilja, tartalma bővült:* A terepgyakorlatok helyszínei ma már nem csupán (s elsődlegesen) az Országos Meteorológiai Szolgálat állomásai és obszervatóriumai, hanem hazai és határon túli társegyetemek, s azok gyakorlati telepei. Nemzetközi kooperációk keretében számos hallgatói csere-terepgyakorlat történt az elmúlt évtizedben.
- *Szinoptikus laboratórium:* újjászerveződött, s ismét beindult a tanszéken működő operatív előrejelzéseket adó, folyamatosan (minden hétköznap) üzemelő szinoptikus laboratórium.
- *A Tanszék kutatási intenzitásának növekedése:* jelentős mértékben növekedett a Tanszéken a kutatási projektek száma (az utóbbi években 5 EU-s pályázat, 7 OTKA, és 4 NKFP-s pályázat, VAHAVA, MEH), s a minőségi megméréstetés lehetősége (számos hazai és külföldi konferenciákon való szereplés, hazai és nemzetközi rangos folyóiratokban való publikációk).
- *Hallgatók részvétele a kutatómunkában:* A mind több tanszéki kutatási projekt lehetőséget nyújt a tehetségesebb, szorgalmasabb hallgatók számára, hogy már az ötéves alapképzés

időtartama alatt bekapcsolódhassanak tanszéki kutatásokba, s publikálhassák eredményeiket, részt vehessenek hazai és nemzetközi konferenciákon.

Terveink – jövő

- Az operatív előrejelző szinoptikus laboratóriumunk további fejlesztését, bővítését tervezzük.
- A tanszéki kutatási eredményeket közzétevő publikálás mennyiségének és minőségének további növelését tűztük ki célul.
- Távolsági terveink között szerepel újabb kutatási programok beindítása, s egy akadémiai kutatócsoport telepítése a Meteorológiai Tanszék mellé. A jelenlegi tanszéki kutatási témaköröket a 6. ábrán foglaltuk össze.

A Meteorológiai Tanszék fontosabb kutatási területei		
A Kárpát-medence éghajlatának múltbeli és jövőbeli tendenciái	Magyarország jövőbeli éghajlatának dinamikai vizsgálata	Szélerergia hasznosítás potenciális lehetőségeinek feltérképezése
A városi hősziget probléma új módszertani közelítései	Magyarország vegetációjának vizsgálata műholdas mérések alapján	Körkörös adatok statisztikai elemzése és meteorológiai alkalmazása
Felszín-bioszféra-légkör közötti kölcsönhatások mérése és modellezése	A bioszféra és a légkör közötti szén-dioxid forgalom mérése	A bioszféra és a légkör közötti ózon forgalom mérése és modellezése
Légköri szennyezőanyag terjedés modellezése lokális és regionális skálán	A párolgás becslése tenyészidőszakban lokális skálán	Felhőfizikai folyamatok mezoskálájú modellezése

5. ábra. A tanszéki kutatók jelentősebb kutatási projektjeihez kötődő témakörök.

Célunk, hogy mind a Tanszéken folyó kutatómunka, mind a tanszéki kutatások színvonala megfelelő minőségű legyen, s elérje az Európai Unió normáit. Kutatásaink minőségével és mennyiségével, elért eredményeinkkel a közel 380 éves Eötvös Loránd Tudományegyetem rangját, hírnevét szeretnénk megőrizni. Kívánjuk, hogy minden végzett hallgatónk büszke legyen az itt eltöltött 5 évre, s tarsolyában az európai-, illetve világszínvonalat elérő tudással kezdhesse egyéni karrierje építéséhez.

A TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRÖK SZEREPE A FELSŐOKTATÁSBAN, A METEOROLÓGIAI TDK TEVÉKENYSÉGE

Weidinger Tamás

ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest Pázmány Péter s. 1/A
e-mail: weidi@ludens.elte.hu

Bevezetés

A tudományos diákköri tevékenység, a szakkollégiumi rendszer és az ERASMUS program a tehetséggondozás meghatározó elemei a hazai felsőoktatásban. Röviden áttekintjük az önképzőköri rendszer fejlődését a XVIII. század végétől napjainkig, majd a hazai tudományos diákköri tevékenység felépítésével, a kétévente megrendezésre kerülő OTDK (Országos Tudományos Diákköri Konferencia) és az OFKD (Országos Felsőoktatási Környezettudományi Diákkonferencia) rendjével foglalkozunk. Az országos tudományos diákköri tevékenység több mint 1/8-át az ELTE adja. A legtöbb TDK dolgozat a Természettudományi, a Bölcsész és az Állam- és Jogtudományi Karon készül. Az ELTE TTK a legutóbbi OTDK 3700 dolgozatából 225 dolgozattal (6%) képviseltette magát. Megismerkedünk a Természettudományi Karon működő 12 diákkörrel, a Kari Tudományos Diákköri Tanács tevékenységével, majd a Meteorológiai TDK rövid történetével, eredményeivel foglalkozunk. Az utóbbi két évben a Meteorológiai TDK decemberi konferenciáján már 20 felett volt az előadások száma. Minden hatodik-hetedik hallgatónk készít TDK dolgozatot, ami országos összehasonlításban az egyik legjobb: az országos átlag 60–70 hallgatónként 1 dolgozat, míg a kari átlag: hozzávetőlegesen 20 hallgatónként 1 dolgozat.

A diákköri tevékenység története és szerepe a változó felsőoktatásban

A korabeli önképzőkörök

Az önképzőköri tevékenység mélyen gyökerezik a magyar oktatási rendszerben, mindenekelőtt a korabeli líceumokban. Hagyományai a XVII. századi református iskoláig illetve a jezsuita oktatásig nyúlnak vissza. Magyarországon az első önképzőkört – Magyar Társaság néven – Kis János alapította 1790-ben, a soproni líceumban. A reformkor előtti idők németesítő törekvéseivel szemben ez volt az egyetlen lehetőség a magyar nyelv művelésére. Az 1541-es alapítású Pápai Református Kollégium önképzőköre például 1841-ben alakult, s az államosításig működött. Tagjai között volt Jókai Mór és Petőfi Sándor is.

Az önképzőkörök mellett fontos szerepet játszott a diákkörmányszatiság is, különösen a protestáns iskolákban. A Sárospataki Református Kollégiumban már 1813-ban alapítottak ilyen szervezetet.

Kalandozunk egy kicsit Erdélyben is. A Gyulafehérvárott létesített, majd I. Apafy Mihály (1632–1690) által Nagyenyedre költöztetett református főiskolán (ma Bethlen Gábor Kollégium) 1791-ben Thoroczkay Pál vezetésével egy diákcsoport már az anyanyelv művelésére szervezett előadásokat. A nagyenyedi kollégiumi Ifjúsági Önképzőkör Herepei Károly professzor vezetésével a kiegyezés előtt 1859-ben alakult meg. Önképzőköri előadások, pályázatok mellett újságot is kiadtak, ami 1920-ig működött, majd 1945-ben egy rövid ideig újra indult. Az önképzőkör az 1990-es években szerveződött újjá.

Mára háttérbe szorultak, szinte eltűntek, a klasszikus önképzőkörök a középiskolákban. A szakköri tevékenység, a különböző pályázatokra, tanulmányi versenyekre történő felkészülés vették át a szerepüket (*pl. a Kutató Diákok konferenciái, ahol néhány hallgatónk is részt vett annak idején*), s ad súlyt a kötelező tananyagon felüli ismeretszerzésnek.

A szakkollégiumi rendszer

A jó kollégium több annál, hogy albérlet helyett a hallgatók ott lakjanak, s így-úgy eltöltsék az időt. A hazai felsőoktatásban a XIX. század végétől működnek tehetséggondozó kollégiumok. Gondoljunk csak a párizsi École Normale Supérieure mintájára 1985-ben báró Eötvös Loránd (1848–1919) alapította Eötvös József Kollégiumra. A ménesi úti nagy-múltú intézmény az ELTE BTK, IK, TÁTK és TTK szakkollégiuma, ami a jó képességű, széles érdeklődési körű egyetemi hallgatók minőségi tudós-tanár képzését tekintti feladatának. *A kollégium a meteorológus hallgatók számára is nyitott, élni kellene a lehetőséggel.*

Az 1945–48 között a népi kollégiumok rendszere egyedi szint vitt a hazai tehetséggondozásba egy változó, ellentmondásos korban. A mozgalom gyökerei a két világháború közötti oktatási rendszerig, a szegénysorú vidéki fiatalok felkarolásáig nyúlnak vissza. A kollégiumok életét két tényező határozta meg az önkormányzás rendje és a kollégium közösségi, szellemi műhelyként való működése. E felfogásnak nem kedvezett az 50-es 60-as évek politikája, a nosztalgia azonban megmaradt.

A mai szakkollégiumi rendszer kialakulását a Chikán Attila nevével fémjelzett, idén 40 éves Rajk László Szakkollégiumhoz köthetjük, közgazdászhallgatók alapították 1970-ben. Fontos szerep jut a közösségi életnek, az önképzésnek, s nem maradhat ki a tudományos dolgozatok, pályamunkák készítése, és a tudományos konferenciák, így az OTDK-n való részvétel sem. A cél egy fogékony, értelmiségi gondolkodás kialakítása.

Az 1970-es évek végén az ELTE budaörsi úti kollégiumban indult az a jogász szakkollégiumi kezdeményezés, ami aztán 1983-ban talált otthonra az akkor újonnan átadott ménesi úti kollégiumban, amelynek első igazgatója Stumpf István lett. A Bibó István Szakkollégium nevet 1985-ben vették fel. A mai politikai élet számos számos tagja innen indult. (*Érdemes megnézni, hogy kik és milyen címmel írtak TDK dolgozatot az 1986-os OTDK Állam- és Jogtudományi Szekciójában.*) A szakkollégium működését meghatározó alapelveket – szakmaiság, tájékozottság, önállóság, kezdeményezés, felelősség, önkormányzatiság, nyilvánosság, egyenlőség és közösségiség – igyekeznek tartalommal is megtölteni.

Az ELTE Informatikai Karos és a TTK-s hallgatók tehetséggondozását szolgálja az 1992-ben alapított Bolyai Kollégium, ami jelenleg az ELTE nándorfehérvári úti épületében működik. A cél itt is a magas fokú szakmaiság és a társadalmi kérdések iránti érdeklődés felkeltése. A kollégiumnak jelenleg tíz hallgatója van a földtudományi szakterületről, köztük egy meteorológia szakirányos BSc-s diák. A szakmai rendezvények, előadások közül kiemelkedik az évente megrendezésre kerülő Bolyai Konferencia. A kollégium Igazgatója Surján Péter egyetemi tanár az ELTE TTK Kémia Intézetéből. Korábbi hallgatóink közül Radics Kornélia (jelenleg az MH Geoinformációs Szolgálat munkatársa) volt a Kollégium tagja, PhD ösztöndíjasként. *Szeretnénk a mostani hallgatóink figyelmét is felhívni a Kollégiumra (kültagok lehetnek Budapestiek is). Ami szükséges: legalább 4,5-ös átlag és a szakmai kérdések iránti érdeklődés. A jelentkezés minden év augusztusában van.*

A kilencvenes évek második felétől ugrásszerűen megnőtt a szakkollégiumok száma. Minden nagyobb egyetemen és főiskolán létesültek ilyen intézmények. Egyre több fővárosi és a vidéki egyházi tehetséggondozó kollégium alakult, ahol a tanulás és a szakmai előadások mellett a hitélettel kapcsolatos tevékenység is fontos.

Egy-egy jó kollégium életre szóló élményt ad, segíti a szakmai munkát és az értelmiségi képzést (talán még nem elkoptatott kifejezés). Jó lenne több diákunkat látni a szakkollégisták között a mostani egy-egy helyett. Ezt a meteorológus hallgatók száma és szorgalma is lehetővé tenné, csak jobban oda kell figyelni és bátrabban jelentkezni.

A tudományos diákköri tevékenység az 1950-es évektől napjainkig

A XX. század húszas-harmincas éveitől kezdődően voltak már olyan érdeklődő egyetemi hallgatók, akik kiemelkedő tudású professzoraik hatására lelkesedésből bejártak a tanszékekre, és tudásuknak megfelelően részt vehettek az ott folyó kutatómunkában. Ez főleg az orvostudományi egyetemekre volt jellemző.

„Az ötvenes évek elején a hallgatók egy részének önképzési szándéka, a minőségi képzés iránti igény és a felsőoktatási tudományos utánpótlás elősegítése hívta életre a tudományos diákköröket. Olyan hagyományról van szó, amely a változó időkben, a körülötte zajló viták ellenére is mindig alapfeladatának megfelelően működött, s mindig értéket tudott felmutatni.” (Szendrő és Koósáné, 2002) A diákköri tevékenység, ami egy speciális tanár-diák viszony, mindig is igyekezett megőrizni függetlenségét az oktatási rendszerben.

Mára már az ország csaknem minden felsőoktatási intézményében folyik tudományos diákköri munka. Az utóbbi időben nőtt a művészeti és az egyházi intézmények diákköreinek a száma. A TDK keretei között folyó tudományos tevékenység a doktori képzés egyik legjobb előiskolája, a doktori iskolákba való felvétel fontos feltétele.

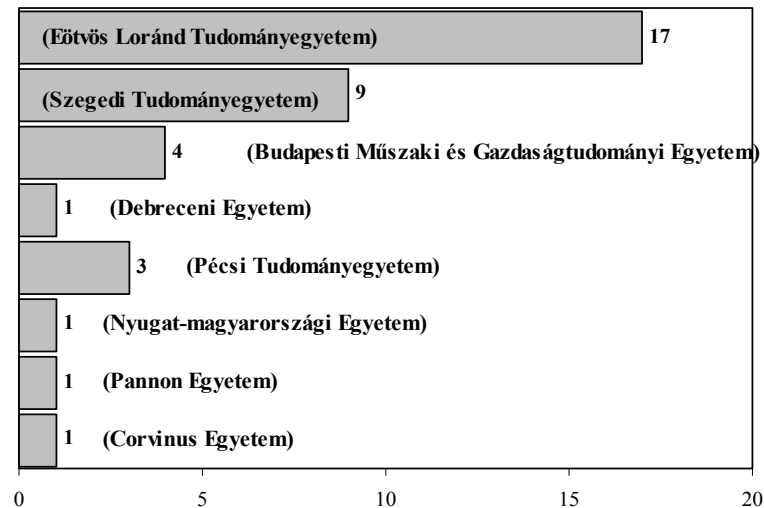
Az országos és a szakterületi tudományos diákköri tevékenység

Az intézményi, kari, illetve tanszéki szinten szerveződő tudományos diákkörök koordinálására 1973-ban jött létre az Országos Tudományos Diákköri Tanács (OTDT). Az OTDT ülések közötti folyamatos munkát, az intézményi TDK felelősökkel történő kapcsolattartást 1987 óta a Szakmai Bizottságok, az Ügyvezető Elnökség és a Titkárság működése segíti. Az OTDT célját és feladatait, valamint a működés anyagi feltételeit a felsőoktatási törvény rögzíti. Az OTDT elnöke 1987 óta Szendrő Péter professzor, a Szent István Egyetem korábbi rektora; a nemrég megválasztott egyik alelnök pedig Weiszbürg Tamás docens úr, intézetünk munkatársa.

Jelenleg 16 szakmai bizottságban folyik a munka. Ezek feladata az egyes szakterületek diákköri tevékenységének koordinálása, s a két évente megrendezésre kerülő Országos Tudományos Diákköri Konferencia adott szekciójának a megrendezése. Az ELTE TTK több Szakmai Bizottságban is érdekelt: i.) Biológia, ii.) Fizika-Földtudomány-Matematika (FiFöMa), iii.) Kémia- és Vegyipar. Rendszeresen küldünk szakmódszertani, pedagógiai és tudományfilozófiai témájú dolgozatokat a Tanulás- és Tanításmódszertani-Tudástechnológiai, illetve a Társadalomtudományi Szekcióba.

A meteorológia a FiFöMa Szakmai Bizottsághoz tartozik, amelynek vezetője Horváth Ákos docens úr az ELTE Fizikai Intézetéből. Hallgatóink jól ismerik a fizika előadásokról. Az ELTE TTK részéről a cikk szerzője is részt vesz a Szakmai Bizottság munkájában. A jubileumi XXX. OTDK konferencia sorozat 2011 tavaszán lesz. *A Fizika-Földtudomány-Matematika Szekció konferenciáját a Nyíregyházi Főiskola rendezi 2011. április 27–29 között. A dolgozatokat 2011. január 10-ig kell beküldeni, a 2010-ben végzett MSc-s hallgatóknál a határidő október 8.* Ez egyébként az egyik legnépesebb szekció.

2009-ben 315 dolgozatot mutattak be a FiFöMa 37 alszekciójában Szombathelyen. Az OTDK szabályai szerint minden alszekcióban 1 első díjat osztanak ki. A dolgozatok harmada részesül díjazásban (1., 2. vagy 3. díj), s természetesen vannak dicséretes és különdíjak is. A konferencián számarányukhoz képest (122 dolgozat) is jól szerepelt az ELTE TTK: 17 első, 18 második és 10 harmadik díj (1. ábra). A konferencián két szekcióban voltak meteorológiai előadások. A Meteorológiai TDK-t 18 dolgozat képviselte. Hallgatóink 2 első 1 második és 2 harmadik díjat, valamint 3 különdíjat kaptak. Diákjaink a korábbi konferenciákon is hasonlóan jól szerepeltek (1. táblázat).



1. ábra. A 37 első helyezés megoszlása a 2009-es OTDK Fizika-Földtudomány-Matematika Szekciójában, intézmények szerint.

1. táblázat. Az OTDK és az OFKD konferenciákon való szereplés főbb adatai a 2000-es években. (A Würth művészeti szekció résztvevőit a + után írtuk). Zárójelben a díjazottak száma (első, második, harmadik díj, valamint különdíj, vagy dicséret). * – becslés. Az OTDT kitüntetései

Konferencia, év	Helyszín	Összes	ELTE	ELTE TTK	Meteorológiai TDK
OFKD 2000	Debrecen	231	27	26	3 (1 első és 1 különdíj)
OTDK 2001	Pécs	2687	416	201	10 (1, 2, –, 3)
OFKD 2002	Veszprém	185	21	20	5 (2 második, 3 különdíj)
OTDK 2003	Miskolc	3089	436	203	5 (1, 1, –, 2)
OFKD 2004	Budapest, ELTE	263+47	49	40	6 (1, 1, –, 4)
OTDK 2005	Budapest, ELTE	3143	459	229	11 (1, 2, 1, 7)
OFKD 2006	Eger	221+36	42*	40	11 (1, –, –, 2)
OTDK 2007	Szeged	3089	405	198	9 (1, –, 1, 1)
OFKD 2008	Nyíregyháza	204+63	30	30	12 (1, 1, 1, 3)
OTDK 2009	Szombathely	3705	506	225	18 (2, 1, 2, 3)
OFKD 2010	Sopron	306+95	53	53	16 (1, 1, 1, 5)

Egy-egy kétéves OTDK periódus zárásaként a konferencia évének az őszén adják át a különböző elismeréseket. A legrangosabb hallgatói kitüntetés a **Pro Scientia Aranyérem**, amit 1989-ben alapítottak. Erre azok pályázhatnak, akik első díjat szereztek az OTDK-n, s kimagasló hallgatói tudományos teljesítményt nyújtottak a megelőző években (hazai és külföldi cikkek, konferencia részvétel, kiváló tanulmányi munka). A többlépcsős odaítélési eljárás során minden alkalommal 45 hallgató nyerheti el az érmet.

Három meteorológus hallgató is részesült a kitüntetésben. Radics Kornélia 1997-ben (témavezetője: Bartholy Judit) vehette át az Aranyérmet. Azóta megvédte a PhD fokozatát. Jelenleg a Magyar Honvédségnél dolgozik, mint katonameteorológus. Kovács Mihály 2001-ben kapta meg az elismerést (témavezetői: Faragó István, Vattai Gábor és Ács Ferenc), majd az Egyesült Államokban (Baton Rouge) szerezte meg matematikából a PhD fokozatot. Jelenleg Új-Zélandon dolgozik. Az ELTE Meteorológiai TDK nevezte 2005-ben Bartók Blankát a Babes-Bolyai Tudományegyetem földrajz szakos hallgatóját (témavezető: Mika János, OMSZ), a PhD tanulmányait Debrecenben végezte, jelenleg Kolozsvárott tanít, s a megújuló energiaforrásokkal foglalkozik.

A diáktudományos tevékenység szervezéséért, a színvonalas és sikeres tanár-diák együttműködésért, tudományos iskolateremtésért veheti át 50 oktató-kutató a **Mestertanár Aranyérem** kitüntetését. Ez a tehetséggondozás egyik legrangosabb elismerése, aminek az alapja a teljes életpálya mérlegelése. Bartholy Judit 2005-ben kapta meg a Mestertanár címet. A meteorológia szakos (illetve szakirányos) hallgatókat oktatók közül többek között Tél Tamás (2007), Cserti József és Horváth Ákos (2009) is részesült ebben a kitüntetésben.



2. ábra. Az OTDK kitüntetései a Pro Scientia és a Mestertanár Aranyérem.

Rangos elismerések között szerepel a **Honoris Causa Pro Scientia Aranyérem**, amit a tudományos diákkörökért sokat tevő iskolateremtő professzoroknak, közéleti személyiségeknek adományoznak. Ilyen elismerést kapott a Természettudományi Karról Kiss Ádám professzor úr 1999-ben, Medzihradszky Kálmán professzor emeritus 2001-ben és Weiszbürg Tamás docens úr 2009-ben. *Van kiktől tanulni.*

Az OFKD konferenciák

Szintén két évente rendezik meg az Országos Felsőoktatási Környezettudományi Diákkonferenciát (OFKD), aminek a fő támogatója a környezetvédelmi tárca, illetve most a környezet- és természetvédelmi kérdésekkel foglalkozó államtitkárság. A fő különbség a két konferencia sorozat között a dolgozatok típusában, és a jelentkezés módjában van. Az OTDK-n a kötelező oktatási feladatokon (pl. évfolyam-dolgozat, beszámoló, szakdolgozat, diplomamunka) felüli kutatási munkával lehet indulni, ami elhangzott a kari, vagy intézményi TDK konferencián. Az OFKD ezzel szemben egy „seregszemle”, ahol az elmúlt két év környezettudományi dolgozatai indulhatnak, legyen az TDK dolgozat, szakdolgozat, vagy diplomamunka. Az egyes diákkörök mellett tanszékek, intézetek is benevezhetnek dolgozatokat.

A 2010-es XII. OFKD konferenciát Sopronban rendezték. Az ELTE küldte a legtöbb dolgozatot (53), nem kis részben a meteorológus hallgatóknak (16 dolgozat) köszönhetően. Az 1990-es évek végén az ELTE még csak a harmadik-negyedik legtöbb dolgozatot küldő intézmény volt: ekkor még nem indult el a környezettudományi képzés.

Két év múlva a Pannon Egyetem rendezi a konferenciát Veszprémben. *Már most érdemes elkezdni dolgozni, hogy hasonló létszámban és sikerrel szerepeljünk 2012 tavaszán a XIII. OFKD-n.*

A TDK működése az ELTE Természettudományi Karán

Az ELTE Természettudományi Karán régi hagyománya van a szakterületi rendszerben működő tudományos diákköröknek. Tevékenységüket a kari Tudományos Diákköri Tanács koordinálja. A tanács elnöke Medzihradszky Kálmán professzor úr, aki bölcsességével, szakmai tudásával (az egyetem rektorhelyettese, karunk dékánja volt) irányítja a munkát. A titkári feladatokat Horváth Ákos, az Atomfizika Tanszék docense látja el. Tagjai a tanácsnak a szakterületi TDK vezetők és a hallgatói önkormányzat (HÖK) képviselője. Az elnököt, az elnökhelyettest és a titkárt a dékán nevezi ki.

A feladatok közé tartozik a kari diákköri konferenciák rendezése, a hallgatók részvételének szervezése az OTDK és az OFKD konferenciákra. (Eddig még mindig sikerült a Kar és a HÖK támogatásával kifizetni a konferencia részvételi költségeket a hallgatóknak és a témavezetőknek. Ez több millió forint az OTDK-ra, amit részben pályázatokból kell előteremteni.) Az Eötvös-napi TDK rendezvény megszervezése, különböző pályázatok kiírása, illetve a működéshez szükséges források előteremtése szintén a feladatok közé tartozik. A tanács évente néhány ülést tart. Ez érthető, hiszen a munka alapja az öntevékenység, a szakterületi önállóság, s nem pedig a túlzott szabályozás.

Az oktatók-kutatók diákköri tevékenységének kari elismerése a TDK Érem. Ezt a Kari Tanács adományozza – évente legfeljebb hármat –, s a dékán adja át az Eötvös-napi TDK rendezvényen, minden év májusában. A meteorológusok közül a cikk szerzőjén kívül Ambrózy Pál (OMSZ), Tasnádi Péter (ELTE Meteorológiai Tanszék) és Ihász István (OMSZ) kapott ilyen kitüntetést.

A kari Tudományos Diákköri Tanács a keretet adja a munkához, amit az egyes szakterületek töltenek ki tartalommal: TDK témákat írnak ki, konferenciákat szerveznek, s ha kell, segítik a diákok és a TDK témavezetők közötti kapcsolatfelvételt. Vannak szakterületi sajátosságok, így a geológusoknál erős az önképzőköri jelleg: előadásokat rendeznek, szeminárium jellegű foglalkozásokat tartanak. A fizikusoknál hagyománya van a TDK hétvégéknek, a biológusoknál a TDK téli iskoláknak. A Biológia és a Kémia Intézetben az egyes tanszékek, laborok szervezett módon mutatkoznak be az alsóbb éves hallgatóknak.

A Meteorológiai TDK tevékenysége, eredményei

Az ELTE Meteorológiai Tanszéke 1945-ben alakult Száva-Kováts József professzor úr vezetésével. Mellszobra az Északi épület aulájában van. Az önálló meteorológus képzés 1950-ben indult. Ezután nem sokkal a tanszék vezetőjét és munkatársát, Révész Tamást 1953-ban koholt vádak alapján eltávolították az egyetemről. A Meteorológiai Tanszék vezetését Dési Frigyes professzor vette át és irányította 1970-ig.

Az ötvenes években négy nagy meteorológus évfolyamot képeztek. 1954 és 1957 között 114 meteorológus diplomát adtak ki. A meteorológiai oktatást a meteorológiai intézet munkatársainak bevonásával egy kis létszámú tanszék végezte. Ekkor indult az országban a TDK munka. Az önképzőköri tevékenység elsősorban az akkori meteorológiai intézeti munkatársak és a diplomázó, illetve az intézeti gyakorlatokon résztvevő hallgatók szoros szakmai együttműködésében nyilvánult meg.

1960-as évektől a nyolcvanas évek közepéig

1958 és 1962 között nem adtak ki meteorológus diplomát az ELTE-n. Az új képzési rend, ahol elsősorban matematika-fizika szakról lehetett felvenni a meteorológiát a második év után, 1958-ban indult. Általában 3–8 fő közötti, kis létszámú évfolyamok voltak (3. ábra).

Az 1970-es évek közepén újabb váltás történt. Volt néhány olyan évfolyam, amelyik az akkori közös földtudományi alapképzésből választhatta a meteorológiát másodév után. Ezek is kis létszámú évfolyamok voltak. *A „kísérlet” nem vált be.* Nem volt megfelelő a matematikai-fizikai alap. Az önálló meteorológus képzés 1978-ban indult. Az első évfolyam, ahová a cikk szerzője is járt, 1983-ban végzett 11 fővel.

A Meteorológiai Tanszéket Dési Frigyes után Dobosi Zoltán professzor úr vezette 1970 és 1983 között. A Meteorológiai TDK munkáját az 1960-as évektől 1985-ig Rákóczi Ferenc irányította. A kis hallgatói létszám, illetve az Országos Meteorológiai Intézettel (majd 1970-től az Országos Meteorológiai Szolgálat) meglevő jó kapcsolat segítette a diákköri munkát. Néhány TDK dolgozat mindig készült. Hallgatóink részt vettek az OTDK konferenciákon. Voltak diákköri összejövetelek, előadások. Az 1970-es években kezdődtek a diákköri iskolák az OMSZ balatonalmádi egykori üdülőjében. A máig tartó TDK nyári iskolák elindítása Rákóczi Ferenc nevéhez fűződik. Sokat tett a TDK tevékenység fejlesztéséért. 1983/84-es tanévben, majd tanszékvezetése idején 1990/91-ben a Meteorológiai TDK a Természettudományi Kar „Kiváló Tudományos Diákköre” lett.

A szegedi egyetem (akkori József Attila Tudományegyetem, JATE) Éghajlattani Tanszékén Prof. Wagner Richárd, majd az őt követő tanszékvezető, Péczely György professzor úr fektetett nagy energiát a diákköri munkába. A debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetem (ma Debreceni Egyetem) Meteorológiai Tanszékén Prof. Berényi Dénes, majd 1968 után Justyák János professzor úr irányította a diákköri munkát. Az akkori három tudományegyetem mellett egy-egy dolgozat érkezett tanárképző főiskolákról, agráregyetemekről. A meteorológia az 1980-as években vált önálló alszekcióvá.

Érdekes lapozgatni a régi TDK kiadványokat és összevetni a mai helyzettel. Az ELTE Tudományos Diákköri Füzetek 3. száma az 1979-es XIII. OTDK-t értékelte. A természettudományi Karról 88 dolgozat indult. A meteorológiát 3 pályamunka képviselte. A legtöbb dolgozatot – szám szerint 18-at – a Matematikus és a Biológus TDK adta be, míg a fizikusokat 17 dolgozat képviselte. Ehhez hasonló dolgozatszámokat látunk az 1970-es évek többi diákköri konferenciáján is. Az 1979-es OTDK konferencia résztvevői között találkoztunk többek között Surján Péter nevével, aki ma a Bolyai Kollégium vezetője, egyetemi tanár. Az OTDK konferencia egyik fődíját egyébként Mika János (ma az MTA doktora, egyetemi tanár) hozta el „Éghajlatelmélet vizsgálatok a Gangyin-féle energiaegyensúlyi modellen” című dolgozatával. (Témavezető: Dobosi Zoltán). A Meteorológiai TDK titkára egyébként Haszpra László volt (ma az MTA doktora).

Az 1980-as évek közepétől napjainkig

Az ELTE Meteorológiai Tanszék vezetését 1983-ban vette át Rákóczi Ferenc professzor úr, majd 1996-tól Prof. Bartholy Judit egyetemi tanár irányítja a tanszéket. A diákkör vezetését 1985-től a cikk írója látja el.

Az egyre növekvő hallgatói létszám, a bővülő kutatási lehetőségek, az OMSZ-szel és a matematika, fizika, informatika tárgyakat tanító kollegákkal kialakított jó kapcsolat segíti a TDK tevékenységét, a diákköri dolgozatok elkészítését. Ehhez járul a tanszéki kollégák munkája, hallgatóink szorgalma és tehetsége. Adottak a feltételek és a kölcsönös érdekelttség.

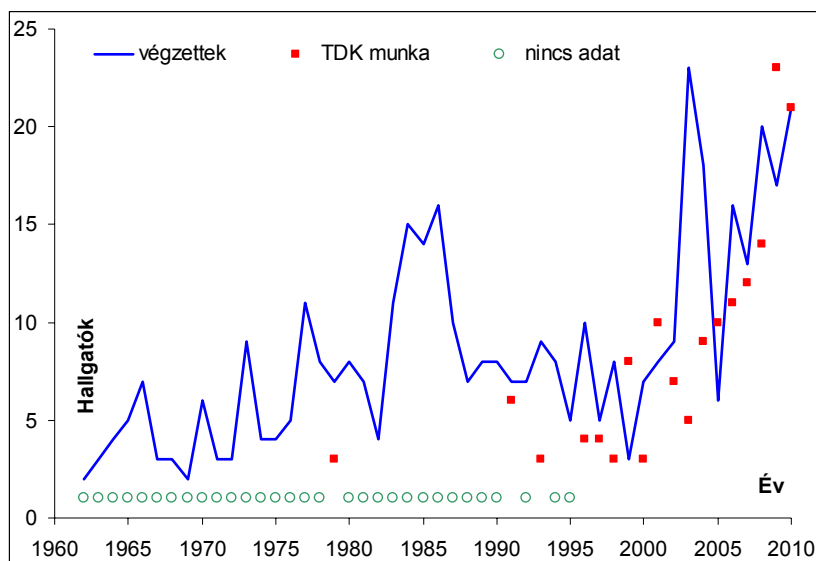
Az adott évben végzett meteorológus hallgatók számát és az elkészült diákköri dolgozatokat a 3. ábra mutatja. A TDK munkák száma jól követi a hallgatói létszám változását. Az utóbbi két évben megnövekedett dolgozat szám a kétszintű BSc-MSc képzésnek köszönhető. Egyre több harmadéves hallgató készít diákköri dolgozatot. *A BSc szakdolgozatok – ha azok önálló kutatási eredményt is tartalmaznak – továbbfejleszthetők IV. évben TDK dolgozattá.* Diákjaink eredményesen szerepelnek az OTDK és az OFKD konferenciákon (1. táblázat). Az elmúlt két évtizedben első díjat szerzett hallgatókat, témavezetőiket és a diákköri dolgozat címét a 2. táblázatban közöljük.

2. táblázat. Az OTDK és az OFKD konferenciákon első díjat kapott hallgatóink az elmúlt két évtizedben.

Konferencia	Hallgató	Témavezető	A TDK dolgozat címe
XX. OTDK, 1991	Szunyogh István	Dévényi Dezső, OMSZ	A barotróp örvényességi egyenlet véges differenciális közelítésének statisztikus mechanikai vizsgálata
XXI. OTDK, 1993	Kovács László	Ihász István, Práger Tamás, OMSZ, ELTE Met.	Peremfeltételek előállítása a hazai rövidtávú numerikus időjárás-előrejelzési modell számára
XXII. OTDK, 1995	Sárközi Szilárd	Tánczer Tibor, OMSZ	Automatikus objektív felhőosztályozás többszörös, finomfelbontású digitális műholdképen
XXIII. OTDK, 1997	Radics Kornélia	Bartholy Judit, Török László, ELTE Met., OMSZ	Statisztikai kapcsolatok vizsgálata a szinoptikus meteorológiai állomásokon megfigyelt és a domborzat figyelembevételével előrejelzett szélmező között
XXIV. OTDK, 1999	Kovács Mihály	Vattay Gábor, ELTE Fizika Intézet	Lokalizációs jelenségek légköri és talajbeli passzív transzportfolyamatokban
VII. OFKD, 2000	Tóth Helga	Ihász István, Weidinger Tamás, OMSZ, ELTE Met.	Trajektória és diszperziós modellek alkalmazása a nagyskálájú szennyezőanyag szállítás leírásában
XXV. OTDK, 2001	Hágel Edit	Jánosi Imre, Tél Tamás, ELTE Fizika Int.	Az újonnan felfedezett cikk-cakk instabilitás laboratóriumi vizsgálata erősen rétegzett folyadékokban
XXVI. OTDK, 2003	Csomós Petra	Faragó István, ELTE Matematika Intézet	Matematikai és számítógépes vizsgálatok a légköri modellezésben
IX. OFKD, 2004	Pattantyús- Ábrahám Margit	Bartholy Judit, ELTE Met.	Esetleges ciklonpálya-eltolódások elemzése a Kárpát-medence térségére a 44 éves ECMWF reanalízis adatbázis geopotenciál mezői alapján
XXVII. OTDK, 2005	Sármány Domokos	Horányi András, Faragó István, OMSZ, ELTE Matematika Intézet	Az egydimenziós spektrális barotróp modell korrekt kitűzésű peremérték-feladata
X. OFKD, 2006	Hidy Dóra	Barcza Zoltán, Haszpra László, ELTE Met., OMSZ	Biogeokémiai modell kalibrálása Bayes-becsléssel
XXVIII. OTDK, 2007	Komjáthy Eszter	Mészáros Róbert, Lagzi István, ELTE Met.	Ózonüledés becslése Magyarország területére a TREX modellel
XI. OFKD, 2008	Mile Máté	Ihász István, OMSZ	Az ECMWF ensemble előrejelzések kalibrációja
XXIX. TDK, 2009	Haszpra Tímea	Tél Tamás, ELTE Fizika Int.	Kettős örvények a légkörben: pontörvény-modell és kaotikus sodródás
XXIX. TDK, 2009	Farkas Alexandra	Mészáros Róbert, Kiricsi Ágnes, ELTE Met., PPKE	Amikor megtörik a fény. Halojelenségek
XII. OFKD, 2010	Nagy Attila	Horváth Ákos, OMSZ	A mezo- γ skálájú modellezés új kihívásai a WRF-modell alkalmazásával

A nyolcvanas-kilencvenes években a kari diákköri konferenciák mellett évente szerveztünk néhány szakmai előadást is. Mára a fő feladataink: i.) diákköri témák ajánlása és a TDK témaválasztás segítése, ii.) kari TDK konferenciák szervezése, iii.) részvétel az Eötvös-napi diákköri rendezvényen, iv.) az OTDK és OFKD konferenciákkal kapcsolatos szervezőmunka, v.) a TDK nyári iskolák megrendezése. A szervezési munkában derekasán kiveszik a részüket a felsőbb éves hallgatók. A nagyobb hallgatói létszám, a diákok lelkesedése egyre több

feladatot jelent. Hiányzik egy TDK diáktitkár, aki megvan a nagyobb diákköröknél: részt vesz a napi feladatokban, s szervezi a hallgatói tevékenységet.



3. ábra. Meteorológus diplomát szerzett, illetve az adott évben TDK munkát készítő hallgatók száma 1962 és 2010 között.

A kétevente megrendezett TDK nyári iskolák mára hagyománnyá váltak. Sokáig az OMSZ üdülője adott otthont a rendezvénynek, majd annak megszűnte után a Balatonalmádi Pedagógusüdülő. A 2008-as rendezvényünk a Magyar Meteorológiai Társaság pécsi vándorgyűléséhez kapcsolódott. Rendszeresen hívunk a TDK iskolára vendégeket Kárpátaljáról, Erdélyből és Délvidékről. Különösen jó a kapcsolatunk a beregszászi főiskolával, Molnár József tanár úrral és földrajzos diákjaival.

A nyári iskolákon részt vesznek a társtanszékek meteorológia iránt érdeklődő hallgatói: gyakori vendégek a szegedi, debreceni, pécsi veszprémi, keszthelyi és a soproni egyetemisták, de jó a kapcsolatunk a BME Áramlástan Tanszékével és a Corvinus Egyetem Kertészettudományi Karával is. Fontosnak tartjuk, hogy megismerjék egymást a hallgatók, ami a későbbi szakmai munkában hasznosulhat. A TDK iskola egy-egy témakör köré csoportosul (3. táblázat), de hallhatunk a kar, a tanszék és az OMSZ terveiről is.

Összefoglaló megjegyzések

A cikkben áttekintettük a magyarországi önképzőkörök történetét, majd a szakkollégiumi rendszerrel ismerkedtünk. Ezt követően bemutattuk a jövőre (2011-ben) 60 éves tudományos diákköri mozgalom fejlődését, az OTDT és a szakmai bizottságok munkáját.

A Meteorológiai TDK az 1960-as évektől végez aktív munkát. Diákjaink eredményesen szerepelnek az OTDK konferenciákon, s a kezdetektől részt vesznek az Országos Felsőoktatási Diákkonferenciákon (OFKD). Az utóbbi években a Meteorológiai TDK téli konferenciáján bemutatott dolgozatok száma meghaladja a 20-at. A utóbbi három OFKD konferencián az ELTE TTK-ról érkező dolgozatok több mint $\frac{1}{4}$ -e tőlünk származott.

Közel négy évtizedes hagyománya van a Meteorológiai TDK nyári iskoláinak. Fontosnak tartjuk:

- az OMSZ szakembereinek, a katona-meteorológusoknak és a meteorológiával kapcsolatban levő tudományterületek képviselőinek a meghívását,
- a társegyetemek és a határon túli hallgatók részvételét,

– a diákok és az előadók közötti információcserét.

3. táblázat. A Meteorológiai TDK nyári iskoláinak főbb témakörei és szervezői az 1980-as évek közepétől napjainkig. * – az Egyetemi Meteorológiai Füzetek (bejegyzett periodika) kötet száma: közli a TDK iskola programját, előadásait és a hallgatói poszttereket.

Év	Szervezők	Témakör	Kiadvány*
1984	Weidinger Tamás	Meteorológiai kutatások az OMSZ-ben	–
1986	Weidinger Tamás	Meteorológia és klimatológia	–
1988	Matyasovszky István, Weidinger Tamás	Éghajlatváltozás, klímamodellezés	Összefoglaló Füzet
1990	Matyasovszky István, Weidinger Tamás, Gyuró György	Különböző típusú előrejelzések	No. 2.
1992	Bartholy Judit, Weidinger Tamás	A felszín-légkör kölcsönhatások, környezetvédelem	No. 5.
1994	Bartholy Judit, Weidinger Tamás	Nemzetközi tudományos együttműködések a meteorológiában. Magyarország részvétele a nemzetközi kutatási együttműködésekben	No. 7.
1996	Bartholy Judit, Mészáros Róbert, Weidinger Tamás	Mérés, modellezés és a meteorológiai információk felhasználása	No. 8.
1997	Mészáros Róbert, Weidinger Tamás, Bartholy Judit, Tóth Ágnes	A felszín-légkör kölcsönhatások és szerepük az időjárás, illetve az éghajlat alakításában (A PhD-hallgatók I. Nyári Iskolája)	No. 10.
1998	Radics Kornélia, Weidinger Tamás, Bartholy Judit, Mészáros Róbert	Az óceán időjárás- és éghajlatalakító szerepe	No. 11.
2000	Pongrácz Rita, Weidinger Tamás, Bartholy Judit, Mészáros Róbert	A meteorológia alkalmazásai	No. 15.
2002	Weidinger Tamás, Bartholy Judit, Mészáros Róbert, Dezső Zsuzsa, Pintér Krisztina	Az időjárás előrejelzése	No. 17.
2004	Weidinger Tamás, Kugler Szilvia	A meteorológia és a társstudományok kapcsolata	No. 19.
2006	Weidinger Tamás, Tarczay Klára, Bartholy Judit	Mérések a lokális skálától a globális folyamatokig – De miért is?	No. 20.
2008	Weidinger Tamás, Tasnádi Péter, Bartholy Judit	Meteorológia és az alaptudományok	No. 22.

A Meteorológiai TDK tevékenysége elképzelhetetlen lenne a hallgatóinkkal foglalkozó tanszéki kollegák és a diákköri munkában résztvevő matematikus, fizikus és földtudományi szakemberek, oktatók segítsége nélkül. Fontos az OMSZ-szel kialakított hosszútávú együttműködés is. Az ottani kollegák is vezetnek TDK dolgozatokat, részt vesznek a diákköri konferenciák zsűrijében, a TDK iskolák munkájában. Mindezek a lehetőségek találkoztak hallgatóink szorgalmával, lelkesedésével.

A diákköri munka a TDK dolgozatok készítése a mindennapok részévé vált. Megtanít kutatási feladatok megoldására, dolgozatok, cikkek írására. Ezek az ismeretek jól kamatoznak

a szakdolgozat, illetve diplomamunka készítésénél, a szakmai pálya indulásánál. Az eredményes TDK tevékenység egyik fokmérője a PhD felvételinek.

Köszönetnyilvánítás: A cikk elkészítéséhez, a Meteorológiai TDK munkájának támogatásához hozzájárult az EU6 NitroEurope program, a Jedlik Ányos pályázat (NKFP6-00028/2005) és a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR kutatóegyetemi projekt, amiért ezúton mondunk köszönetet.

A témával kapcsolatos irodalom

- Anderle Á. (szerkesztő), 2001: A magyar tudományos diákköri konferenciák fél évszázada (1951–2001). Kiadja az Országos Tudományos Diákköri Tanács, Budapest.
- Anderle, Á. és Koósáné Török E. (szerkesztők), 2005: A tehetségről. Beszélgetések a tudományos diákkörökről. Kiadja az Országos Tudományos Diákköri Tanács. Budapest.
- Baranyainé Réti G. és Szécsi G. (szerkesztők), 2008: Képezzük őket tudósokká...” Ünnepi kötet Szendrő Péter 70. születésnapja alkalmából. Áron Kiadó, Budapest.
- Bencze Gy., 2002: TDK: önképzés, tudományos-utánpótlás nevelés, vagy verseny? *Magyar Tudomány* 7.
- Csermely P., 2003: A jövő tudósai. *Magyar Tudomány* 8.
- Erdélyi E., 2002: Önképzés – önkifejezés – öntudat Önképzőköri hagyományok Módszertani Lapok 3–4.
- Erlicsné Bogdán K. 2002: A Főiskolások helyzete a Tudományos diákköri mozgalomban. *Magyar Tudomány* 7.
- Iványi A. (szerkesztő), 1979: A XIII. Országos Tudományos Diákköri Konferencián részt vett természettudományi kari dolgozatok kivonata. ELTE Tudományos Diákköri Tanács, Budapest.
- Koósáné Török E. és Baranyainé Réti G., 2008: A TDK kézikönyve. Kiadja az Oktatáskutató és Fejlesztő Intézet, Országos Tudományos Diákköri Tanács Titkársága, Budapest.
- Kopp E., 2010: A kálvinizmus hatása a magyar oktatásügyre. *Magyar Tudomány* 2.
- Lázár I., 2000: Kollégium a magasban. *Ökotáj* 23–24.
- Simon A. és Tanczer T. (szerkesztők), 1995: Fejezetek a magyar meteorológia történetéből 1971–1995. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest.
- Szendrő P. és Koósáné Török E., 2002: Tudományos diákkörök – fél évszázad a tehetséggondozás szolgálatában. *Magyar Tudomány* 10.
- Zsolnai J., 2004: Kutatói utánpótlás már tízéves kortól. *Magyar Tudomány* 2.

Internet-es hivatkozások

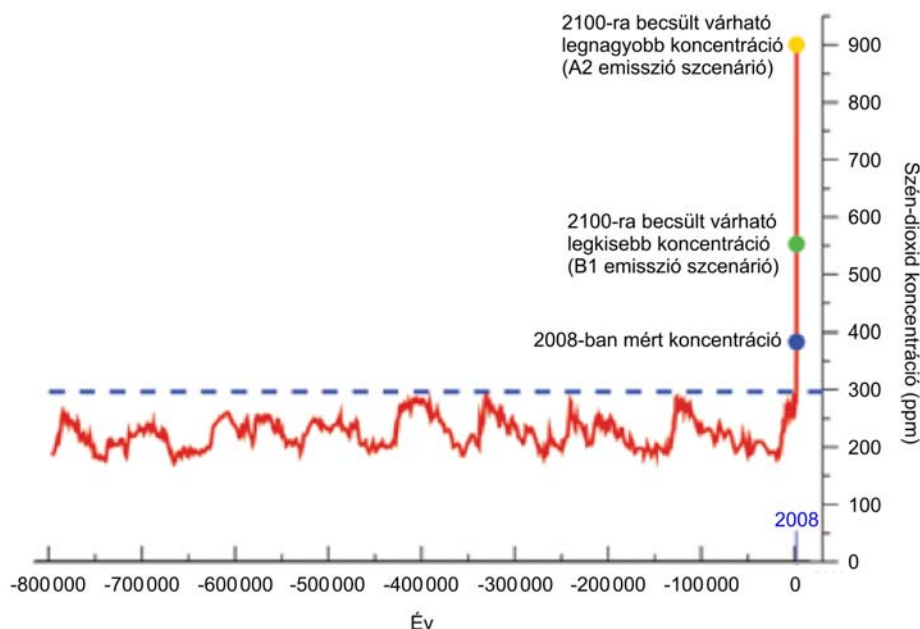
- Az ELTE TTK TDK honlapja: <http://ludens.elte.hu/~tdkinfo/tdt/szakter.html>
- Az OTDK mint hungarikum Beszélgetés Dr. Anderle Ádám egyetemi tanárral: <http://www.mindentudas.hu/mindentudasegyeteme/20050302azotdk.html>
- Az OTDT honlapja: www.otdt.hu
- Az önképzés múltja és jelene a Bethlen Gábor Kollégiumban: <http://www.bethlengabor.ro/>
- Bibó István Szakkollégium: <http://bibo.elte.hu/>
- ELTE Bolyai Kollégium: <http://www.bolyai.elte.hu/>
- Eötvös József Collégium: http://hu.wikipedia.org/wiki/E%C3%B6tv%C3%B6s_J%C3%B3zsef_Collegium
- Rajk László Szakkollégium: <http://www.rajk.uni-corvinus.hu/>

ÉGHAJLATI MODELLEZÉS KÜLÖNBÖZŐ TÉR- ÉS IDŐSKÁLÁN

Bartholy Judit, Pongrácz Rita, Pieczka Ildikó, Torma Csaba

ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.
e-mail: bari@ludens.elte.hu

Meteorológiai mérések egyértelműen bizonyítják, hogy a földi klíma melegebbé vált az elmúlt másfél évszázadban. Mára már nem kétséges, hogy ennek háttérében az üvegházhatású gázok antropogén eredetű kibocsátásának növekedése áll, mely elsősorban a fosszilis tüzelőanyagok (szén, kőolaj, földgáz) égetéséből származik. Ezen felül számottevő még az erdőirtás és a mezőgazdasági termelés (például rizstermesztés, szarvasmarha-tenyésztés) emisszióhoz való hozzájárulása is. A XXI. századra várható hőmérséklet-emelkedés előreláthatóan sokkal jelentősebb mértékű lesz, mint a múlt évszázad 0,8 °C-os globális melegebbé válása. A 2007-es IPCC-jelentésben közzétett modell-szimulációk szerint több fokos globális melegebbé válásra számíthatunk az évszázad végére. A globális átlagértékeket várhatóan számos térségben jelentős mértékben meg fogják haladni a regionális melegebbé válás becslési értékei. Ez a jelentős klímaérzékenység jellemzi a Kárpát-medence térségét is. Fontos hangsúlyoznunk, hogy az emberiség történetében példa nélküli az ilyen nagy mértékű melegebbé válás. A legújabb antarktiszi jégfurat-minták lehetővé teszik akár 800.000 évre visszamenőleg a földi klíma és a légköri szén-dioxid koncentrációjának rekonstrukcióját. A jégfurat-mintába záródott szén-dioxid elemzése alapján a légköri koncentráció 170-300 ppm között ingadozott az elmúlt közel egymillió évben (1. ábra).



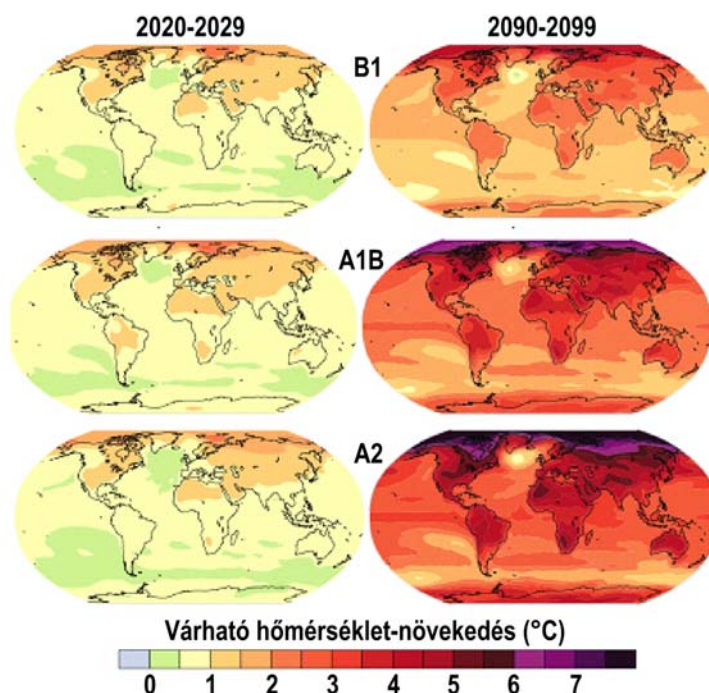
1. ábra. A légköri szén-dioxid koncentráció 800.000 éves időszaka az antarktiszi jégfurat-minták (Lüthi et al., 2008) alapján összehasonlítva a jövőben várható változásokkal. Forrás: Karl et al., 2009.

Az ipari forradalom óta az intenzív iparosodás következtében a szén-dioxid koncentrációja mintegy 30%-kal növekedett (385 ppm-re). Várhatóan ez a tendencia tovább fog folytatódni, s szolidabb becslések szerint a század végére a CO₂ koncentráció 550 ppm-re emelkedhet, de a kevésbé optimista forgatókönyv alapján akár a 900 ppm-et is elérheti. Az elmúlt évtizedek

emisszió-növekedési tendenciáit figyelembe véve sajnos inkább a magasabb koncentráció valószínűsíthető.

Globális klímamodellek

Az általános cirkulációs modellek (GCM: General Circulation Model) nem kevesebbre vállalkoznak, mint az éghajlati rendszer – azaz a légkör, az óceán, a talajfelszín, a krioszféra és a bioszféra – folyamatainak, kölcsönhatásainak leírására. Az éghajlati modellek az egyedüli eszközeink, melyekkel a jövő klímájára vonatkozó becsléseket készíthetünk. Ezek a földi légkört és a kapcsolódó szférákat mint fizikai rendszereket matematikai formulákkal írják le.



2. ábra. A várható globális melegedés mértéke különböző scenáriók felhasználásával a 2020-29 és a 2090-99 időszakra. Forrás: IPCC, 2007.

Az éghajlati rendszer numerikus modellezése az alapvető fizikai törvényszerűségeken alapszik, melyek közül a legfontosabbak a tömeg-, az energia- s az impulzusmomentum megmaradásának elve. E modellek szimulálják a légkör és az óceánok mozgásait, becslést adnak többek között a hőmérséklet, sűrűség, légnyomás várható alakulására. Leírják a hidrológiai ciklus elemeit, a sarki jégsapkák, gleccserek terjeszkedését, olvadását. Közelítik a felhő- és csapadékképződési folyamatokat. Mind több összefüggés (egyenlet) beiktatásával lehetőség van egyre több – a légkörre, az óceánra, a bioszféra vonatkozó – fizikai folyamat és kölcsönhatás figyelembevételére. Napjainkra a nagy klímakutató központokban fejlesztett globális éghajlati modellek tudományos és technikai kidolgozottsága elérte azt a szintet, hogy ezek a modellek képesek megbízhatóan leírni az éghajlati rendszer elemeinek viselkedését (a közöttük lévő összetett kölcsönhatásokkal együtt), továbbá kiválóan használhatók az éghajlatváltozás planetáris (azaz globális, nagyskalájú) jellemzőinek vizsgálatára. Komplexitásuk azonban a jelenlegi számítógépes kapacitás teljes kihasználásával sem teszi lehetővé azt, hogy egyedüli alkalmazásukkal az éghajlatváltozás regionális vonatkozásairól pontos információhoz jussunk.

Miért beszélünk éghajlati forgatókönyvekről előrejelzések helyett? Ahhoz, hogy a modellek bemenő paramétereiként megadhassuk 50–100 évre előre az üvegházgázok emisszió-, illetve koncentráció értékeit, ismernünk kellene a gazdasági és társadalmi folyamatok jövőbeni

alakulását. Ilyenek például: a népesség változása, a globalizációs folyamatok térhódításának mértéke és sebessége, a megújuló energiahordozók felhasználásának elterjedése, a környezetkímélő technológiák fejlődési üteme, a globális és regionális gazdaságpolitika iránya, a nemzetgazdaságok regionális fejlődési tendenciái, területi és elemenkénti emisszió-értékek, stb. Ilyen nagy időtávra előre azonban ezeket a folyamatokat nem ismerjük, ismerhetjük, ezért csak éghajlati forgatókönyvekben, ún. "klímaszcenáriókban" gondolkodhatunk. Az IPCC 2001-es, illetve 2007-es jelentésében lévő alapszcenáriók éghajlati rendszerre gyakorolt hatását tekintve láthatjuk, hogy a XXI. század végére a különféle emisszió-szcenáriók nagyon eltérő mértékű globális melegedést jeleznek (2. ábra). Az ábráról azonban az is látható, hogy ugyanakkor a közelebbi jövőre (2020–2029) a globális eredmények nagyon hasonlóak, azaz az elkövetkező néhány tíz év vizsgálata során nincs igazán jelentősége annak, hogy melyik forgatókönyvet alkalmazzuk.

Beágyazott regionális klímamodellek

A jelenlegi globális modellekkel lehetetlen regionális térskálán is megfelelő pontosságú becsléseket készíteni, s ezek alapján regionális hatástanulmányokat végezni. Egyrészt azért nem, mert e modellek területi felbontása általában durva, gyakran 150–250 km, ami azt jelenti, hogy egész Magyarországra mindössze néhány rácspont esik. Másrészt e közelítés nem tartalmazza a felszín, s a domborzat kellően részletes adatait. Így a globális modellekből egy adott térségre vonatkoztatott pontos információkat nem kaphatunk, ezért regionalizációs (ún. leskálarozási) eljárások alkalmazására van szükség. Számos statisztikus és dinamikus közelítésen alapuló módszert alkalmaznak világszerte a globális modellek eredményeinek regionalizálására.

A dinamikus közelítés keretein belül elsőként Giorgi és munkatársai (*Giorgi, 1990*) fejlesztettek ki egy azóta is elterjedten használt módszert, az ún. beágyazott modellekkel való szimulációt. A globális modellek tehát nem képesek sem az orográfikus, sem a felszíntípusbeli különbségek (pl. a hegységek magassági tagolódása, vagy a tengerek, szigetek, szárazföldek eltérő felszínformái) követésére, tehát a GCM eredményekből levonható következtetések erősen korlátozott érvényességűek. Ezért a globális modellek eredményeit bemenő paraméterként (kiindulásként és oldalsó peremfeltételekként) felhasználó korlátos tartományú beágyazott modellek képesek a nagyskálájú változásokat leképezni területileg finomabb skálára. A regionális modellek felbontása akár 10–25 km is lehet, mely már kisebb régiók pontos éghajlati leírását is lehetővé teszi.

A regionális éghajlati modellek megbízható fizikai tartalommal, nagy területi felbontással rendelkeznek, de a Földnek csak egy kisebb, korlátos tartományán vannak értelmezve. Általában az éghajlati rendszer komponensei közül a légkört és a földfelszín tartalmazzák, s képesek a felhő-, a sugárzási-, a csapadék-, valamint a talajhidrológiai-folyamatok leírására. Ma már számos regionális klímamodell áll rendelkezésre, melyek alkalmasak kisebb térségek XXI. századi éghajlatának finomabb térskálájú becslésére.

Az IPCC ajánlásai között kiemelten szerepel, hogy mind több térségre, mind több modellel készüljenek klímabecslések, hiszen egyetlen éghajlati projekció önmagában csak korlátozott érvényességgel bírhat. A többféle modell bizonyosan nem adja pontosan ugyanazt a becslést egy-egy térségre, de az elemzés, összehasonlítás során kirajzolódnak a Föld azon régiói, melyekre nagyobb bizonyossággal, illetve csak nagy bizonytalansággal tudjuk a jövő éghajlatát becsülni. A modell-szimulációk együttes elemzése adja meg az előrejelzések valódi értéket, s lehetőséget a modellekben rejlő bizonytalanságok számszerűsítésére a felhasználók számára.

Az elmúlt években mind az Európai Unió, mind az Amerikai Egyesült Államok szenátusa nagy erőfeszítéseket tett annak érdekében, hogy lehetővé váljon a regionális éghajlati

előrejelzések információtartalmának, minőségének, s megbízhatóságának növekedése. A korábbiakban jellemző sporadikus, nem kellően koordinált kutatások helyett megjelentek egyrészt az 5-ös és 6-os EU-keretprogramban az egész kontinenst, illetve annak egy-egy térségét átfogó projektek (PRUDENCE, ENSEMBLES, CECILIA, CLAVIER), másrészt az Amerikai Egyesült Államokban egy külön kormánybizottság létesült a klímaváltozással kapcsolatos kutatások összehangolására.

Az elmúlt néhány évben hazánkban az ELTE Meteorológiai Tanszékén, valamint az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztályán két-két regionális klímamodell hazai adaptálására is sor került, amelyek segítségével lehetőségünk nyílik becslést adni a Kárpát-medencében a XXI. századra várható éghajlatváltozás tendenciáira és a projekciókban rejlő bizonytalanságok számszerűsítésére. A hazai regionális klímamodellezési munkát egy 2007 végén lezárult NKFP projekt keretében kezdtük meg; melyről további részletek a http://www.met.hu/palyazat/nkfp_klima2005.php honlapon olvashatók.

Az ELTE Meteorológiai Tanszéken futtatott modellek közül az egyik a RegCM modell, mely kutatási célokra jelenleg a trieszti Elméleti Fizikai Kutatóintézetben (ICTP) keresztül hozzáférhető. E modell első generációjának kidolgozásául az NCAR-Pennsylvaniai Állami Egyetem (Pennsylvania State University, PSU) MM4 mezoskálájú modellje szolgált alapul, mely egy összenyomható, véges differenciál hidrosztatikus modell. A RegCM jelenlegi verziójában a dinamikai leírás már az MM5 hidrosztatikai mezoskálájú modelléhez hasonló. Az ELTE Meteorológiai Tanszéken a CECILIA (Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment, <http://www.cecilia-eu.org>) Európai Unió projekt keretében került sor a RegCM regionális modell 10 km-es horizontális felbontású adaptálására a Kárpát-medence térségére (Torma *et al.*, 2008). A RegCM modell felhasználásával az A1B scenáriót (Nakicenovic és Swart, 2000) vizsgáltuk az 1961–1990, 2021–2050 és 2071–2100 közötti időszakok alapján, melyekhez a hamburgi ECHAM5 globális modell (Roeckner *et al.*, 2003) szolgáltatta a kezdeti- és a peremfeltételeket.

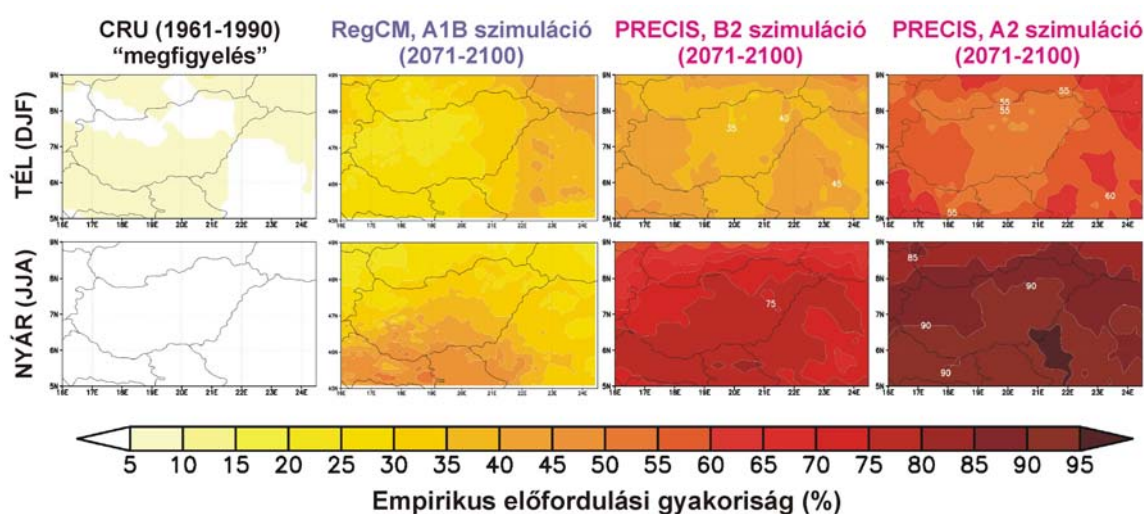
A másik tanszéki modell a PRECIS regionális klímamodell (Wilson *et al.*, 2007), melyet a Brit Meteorológiai Szolgálat Hadley Központjában fejlesztettek ki a HadCM3 globális klímamodellbe (Gordon *et al.*, 2000) beágyazva. A PRECIS egy olyan korlátozott tartományú, finom felbontású, légköri és felszíni részeket tartalmazó modell, mely a Föld bármely térségére alkalmazható. A modellel lefedhető térség kiterjedésének felső korlátja 5000×5000 km² (Jones *et al.*, 2004). Az általunk alkalmazott horizontális rácsfelbontás 25 km, s vertikálisan 19 szinttel számoltunk (Bartholy *et al.*, 2006). A 2071–2100-as időszakra két futtatást végeztünk el (Bartholy *et al.*, 2009a, Pieczka *et al.*, 2009): az A2, illetve a B2 forgatókönyv (Nakicenovic és Swart, 2000) figyelembevételével. Ezeken kívül jelenleg folyamatban van az A1B scenárió vizsgálata egy 1951–2100 közötti tranziens szimuláció alapján. A vizsgált scenáriók közül az A2 scenárióhoz társul a legmagasabb századvégi CO₂-koncentráció – 856 ppm –, ezt követi az A1B – 717 ppm –, s végül a legalacsonyabb koncentráció szint – 717 ppm – a B2 esetén várható (Nakicenovic és Swart, 2000).

A Kárpát-medencében várható klímaváltozás

A RegCM, illetve a PRECIS eredményei alapján készített elemzéseink korábbi publikációinkban (pl.: Bartholy *et al.*, 2009b, 2009c) részletesen megtalálható, itt csupán egy példát mutatunk be, mely a téli, illetve a nyári hónapokra várható változásokat emeli ki. Ebben a vizsgálatban az volt a célunk, hogy az éghajlati paraméterek megváltozásáról minél átfogóbb, komplexebb információt szolgáltatassunk. Ezért minden egyes rácspontra meghatároztuk, hogy a szimulált hőmérsékleti, illetve csapadék idősorok alapján a referencia

időszak (1961–1990) havi átlagaitól vett eltérés bizonyos küszöbértékeket milyen gyakorisággal fog meghaladni a jövőben. A kapott eredményeket évszakos bontásban, térképes formában ábrázoltuk. A szimulált mezőkből meghatározott információt kiegészítettük a referencia időszak havi anomáliáit figyelembe vevő évszakos térbeli eloszlást illusztráló térképekkel.

Itt most terjedelmi okokból csak egy-egy kiválasztott küszöbérték elemzését mutatjuk be a téli és a nyári hónapokra. A 3. ábra tartalmazza a $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál nagyobb hőmérsékleti anomáliák előfordulási valószínűségének évszakos területi eloszlását a jelen (1961–1990) klimatikus viszonyok mellett, valamint a 2071–2100 jövőbeli időszakra három különböző scenáriót tekintve: az A1B-t a RegCM szimulációk alapján, s a B2-t, illetve az A2-t a PRECIS szimulációk alapján. A felhasználók számára értékes információt nyújthat, hogy az adott küszöbérték túllépésének gyakorisága az ország mely területein milyen mértékben változhat a jövőben.

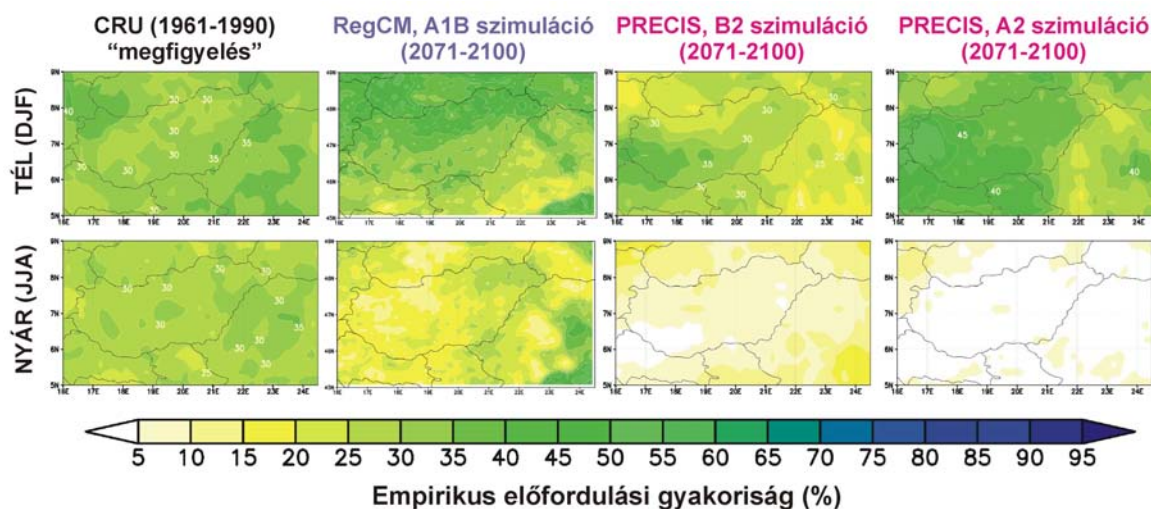


3. ábra. A $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál nagyobb havi hőmérsékleti anomáliák előfordulási gyakorisága télen és nyáron.

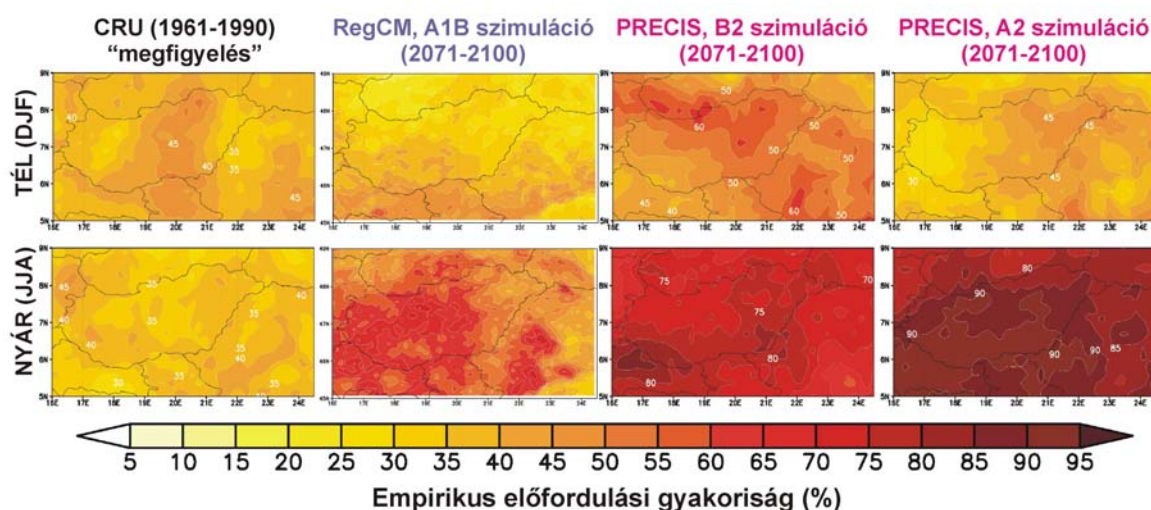
A múltban a téli hónapokban a $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot meghaladó pozitív anomáliák a teljes időszak 5-10%-ában fordultak elő, nyáron pedig egyáltalán nem. A szimulációk alapján mind télen, mind nyáron egyértelmű a pozitív hőmérsékleti anomáliák XXI. század végére várható gyakoriságnövekedése mindhárom scenárió esetén. A legkisebb növekedés az A1B globális emisszió-scenárió figyelembe vevő RegCM szimuláció szerint várható: télen 20–35%, nyáron 25–45% az 1961–1990 időszak átlagát $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal meghaladó anomáliák valószínűsíthető gyakorisága. Télen az ország keleti részein, nyáron a déli részein számíthatunk többszöri előfordulásra. A PRECIS modell szerint a század végére még jelentősebb lesz a múltbeli átlagos hőmérsékletnél legalább $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal magasabb havi átlaghőmérsékletek előfordulási gyakorisága (B2: télen 35–45%, nyáron 70–80%; A2: télen 50–60%, nyáron 85–95%). Télen a legnagyobb változás a Dunántúlon várható, ez azonban kisebb mértékű, mint a nyárra várható. A két scenárió között értékeikben figyelhetünk meg nagyobb különbséget (ami nem meglepő tekintettel arra, hogy az A2 forgatókönyv általánosságban is nagyobb mértékű melegedést vetít előre), a változások térbeli szerkezete hasonló.

A havi csapadék gyakorisági eloszlásaiban várható változásokat illusztrálандó a $+20\%$ -ot meghaladó pozitív és -20% -ot meghaladó negatív csapadék-anomáliák előfordulási valószínűségét elemezhetjük a téli és a nyári hónapokra a 4., illetve az 5. ábra segítségével. A megfigyelések alapján az 1961–90 időszakban (4. és 5. ábra bal oldali térképsora) télen és nyáron egyaránt jellemző volt, hogy az átlaghoz képest számottevően csapadékosabb

viszonyok ritkábban (az összes hónap 25–35%-ában) fordultak elő, mint az átlagosnál jelentősen szárazabb viszonyok (a hónapok 30–50%-ában).



4. ábra. A +20%-nál erősebb havi csapadékanomáliák előfordulási gyakorisága télen és nyáron.



5. ábra. A -20%-nál erősebb havi csapadékanomáliák előfordulási gyakorisága télen és nyáron.

A 4. ábra második oszlopa az A1B szcenárióra vonatkozik, mely alapján télen (felső térkép) a jelenlegi havi csapadékeloszláshoz viszonyítva hazánk északi részén egyértelműen sűrűbben számíthatunk jelentősen csapadékosabb hónapra, a +20%-ot meghaladó anomáliák relatív gyakorisága várhatóan meghaladja a 40%-ot. Ez azt jelzi, hogy a század végére teleink csapadékosabbá válására számíthatunk. Nyáron (alsó térkép) becsléseink szerint a jelenlegihez képest csapadékosabb viszonyok előfordulása szinte az egész országon belül 25% alatt marad (kivéve a Nyírséget északkeleten).

Az 5. ábra második oszlopában a -20%-ot meghaladó negatív csapadék-anomáliák 2071-2100-ra várható előfordulási gyakoriságait tekintve megállapíthatjuk, hogy az A1B szcenárió esetén télen inkább csökkenés valószínűsíthető az ország területén, a nyári hónapokban viszont jelentős nagyobb arányban számíthatunk a referencia időszakhoz képest jelentősen szárazabb éghajlati viszonyokra a RegCM-szimulációk alapján. A június-július-augusztus időszakban egy kisebb északkeleti régió kivételével hazánk egész területén várhatóan 50% fölötti lesz a jelenlegi csapadékvizonyokhoz képest szárazabb hónapok aránya (Budapest

környékén ez az arány a 70%-ot is meghaladja). Ezek a jelentősen száraz éghajlati viszonyokat jelző anomáliák a referencia időszakban csupán 30-40%-os arányban fordultak elő.

A PRECIS modell nyárra egyértelműen az éghajlat szárazabbá válását valószínűsíti a Kárpát-medence térségében, melyet jelez a negatív anomáliák gyakoriságnövekedése: 30–45%-ról 70–80%-ra a B2, 80–90%-ra az A2 esetén (4. ábra utolsó két oszlopa), s a pozitív anomáliák gyakoriságcsökkenése az ország egész területén: 25–30%-ról 0–20%-ra a B2, 0–10%-ra az A2 esetén (5. ábra utolsó két oszlopa). A térképsorozat alapján tehát elmondható, hogy az A2 forgatókönyv esetén nagyobb mértékű gyakoriságváltozásra számíthatunk, mint a B2 esetén. A téli évszakra várható változások kevésbé egyirányúak és sokkal kisebbek, az A2 scenárióra pedig leolvasható a Dunántúlra vonatkozó téli csapadéknövekedés (25–30%-ról 50%-ra). A2 esetén a téli hónapokban a csapadékosabb időszakok gyakoriságnövekedése az egész ország területén valószínűsíthető, míg a száraz időszakok gyakoriságcsökkenésére elsősorban a Dunántúl térségében számíthatunk.

További feladatok, tervek

A regionális klímaváltozással kapcsolatban a szélsőséges időjárási viszonyok (pl.: fagyok, hőség, aszály, hirtelen lezúduló esők, stb.) előfordulási gyakoriságában és intenzitásában várható változásokat is vizsgáljuk. Ezek az elemzések már elkezdődtek TDK, illetve szakdolgozati témaként több hallgató bevonásával (pl.: *Hollósi*, 2010; *Bartha*, 2010). Továbbá előttünk áll a PRECIS A1B scenárióra vonatkozó 150 éves tranzienst futtatásának eredményeinek feldolgozása. A teljes szimuláció várhatóan 2010 végére jut el 2100-ig, de közben a meglévő korábbi elemzések mintájára folyamatosan történik a feldolgozás.

Köszönetnyilvánítás: Kutatásainkat támogatta a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, az MTA TKI Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz című (2006/TKI/246) programja, az OTKA T-049824, K-78125, K-67626, K-69164 számú pályázata, az NKFP-3A/0082/2004 és az NKFP-6/079/2005 pályázat. További segítséget nyújtott az EU VI. keretprogram CECILIA projektje (GOCE-037005), az Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott CCWATERS projekt (SEE/A/022/2.1/X), valamint az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozása (TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR). Köszönet illeti az ICTP Időjárás- és Éghajlat-fizikai Osztály munkatársait (elsősorban F. Giorgit és E. Coppelát), hogy a RegCM modell futtatásához meghajtott adatbázist bocsátottak rendelkezésünkre, s az adaptációban is segítségünkre voltak.

Hivatkozások

- Bartha E.B., 2010: A globális klímaváltozás egészségügyi hatásai Európában és Magyarországon. BSc szakdolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest. 44p. Témavezető: Pongrácz R.
- Bartholy J., Pongrácz R., Torma Cs., Hunyady A., 2006: A PRECIS regionális klímamodell és adaptálása az ELTE Meteorológiai Tanszékén. In: 31. Meteorológiai Tudományos Napok – Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások. (Szerk.: Weidinger T.) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest. 99-114.
- Bartholy J., Pongrácz R., Pieczka I., Kardos P., Hunyady A., 2009a: Analysis of expected climate change in the Carpathian Basin using a dynamical climate model. *Lecture Notes in Computer Science* 5434. 176-183.
- Bartholy J., Pongrácz R., Torma Cs., Pieczka I., Hunyady A., 2009b: Regional climate model experiments for the Carpathian basin. 89th AMS Annual Meeting/21st Conference on

- Climate Variability and Change. <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/147084.pdf>. Phoenix, AZ. 5p.
- Bartholy J., Pongrácz R., Torma Cs., Pieczka I., Kardos P., Hunyady A., 2009c: Analysis of regional climate change modelling experiments for the Carpathian basin. *International Journal of Global Warming* 1, 238-252.
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *Journal of Climate* 3, 941-963.
- Gordon, C., Cooper C., Senior C.A., Banks H., Gregory J.M., Johns T.C., Mitchell J.F.B., Wood, R.A., 2000: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics* 16, 147-168.
- Hollósi B., 2010: A Kárpát-medence csapadékviszonyainak és aszályhajlamának jövőben várható tendenciái a PRECIS eredmények alapján. BSc szakdolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest. 53p. Témavezető: Pongrácz R.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Edited by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, D. Xiaosu. 2001; Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York, NY. 944p.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. 2007; Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York, NY. 996p.
- Jones, R.G., Noguer, M., Hassell, D.C., Hudson, D., Wilson, S.S., Jenkins, G.J., Mitchell, J.F.B., 2004: Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. Exeter:UK Met Office Hadley Centre.
- Karl, T.R., Melillo, J.M., Peterson, T.C., szerk., 2009: *Global Climate Change Impacts in the United States*. Cambridge University Press. 189p.
- Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K., Stocker, T.F., 2008: High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature* 453(7193), 379-382.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (Eds.), 2000: *Emissions Scenarios*. A Special Reports of IPCC Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Pieczka I., Bartholy J., Pongrácz R., Hunyady A., 2009: Climate change scenarios for Hungary based on numerical simulations with a dynamical climate model. *Lecture Notes in Computer Science* 5910, 613-620.
- Roeckner E, Bauml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kirchner I., Kornblueh L., Manzini E., Rhodin A., Schlese U., Schulzweida U., Tompkins A., 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM-5: Model description MPI Report 349, 140p, Max-Planck-Institut für Meteorologie.
- Torma Cs., Bartholy J., Pongrácz R., Barcza Z., Coppola E., Giorgi F., 2008: Adaptation and validation of the RegCM3 climate model for the Carpathian Basin. *Időjárás* 112, 233-247.
- Wilson, S., Hassell, D., Hein, D., Jones, R., Taylor, R., 2007: *Installing and using the Hadley Centre regional climate modelling system, PRECIS. Version 1.5.1*. Exeter:UK Met Office Hadley Centre.

KUTATÁSI TERÜLETEK A STATISZTIKUS KLIMATOLÓGIA ÉS A LÉGKÖRI POLLENKONCENTRÁCIÓ STATISZTIKUS ELŐREJELZÉSE KÖRÉBEN

Matyasovszky István
ELTE Meteorológiai Tanszék, e-mail: matya@ludens.elte.hu

Bevezetés

Az alábbiakban elsősorban a statisztikus klimatológia, másodsorban a légköri pollenkoncentráció előrejelzése körében áttekintem a szóba jöhető kutatási területeket. A különböző betűtípusokkal szereplő kifejezések lehetséges PHD TÉMÁRA, MSc diplomamunka témára, illetve BSc diplomamunka, vagy diákköri dolgozat témára utalnak. A egyes problémák különböző mélységű vizsgálata különböző szintű dolgozat témát hozhat. Ezt a fenti betűtípusok kombinálása jelzi.

Statisztikus klimatológia

Mivel az éghajlat alapvetően statisztikus természetű, így vizsgálata a valószínűség számítás és matematikai statisztika eszközeit igényli. Ezekkel a kérdésekkel foglalkozik a statisztikus klimatológia.

Az éghajlat lényegének megismerése szempontjából vethető fel a különböző ÉGHAJLATI ELEMÉK MEMÓRIÁJA. Ilyenkor a rendelkezésre álló idősorok alapján próbáljuk becsülni, hogy az adott idősor aktuális értékének optimális előrejelzéséhez a múltbeli értékek időben milyen hosszú szakaszára van szükség. Némiképp hasonló kérdés az ún EMBEDDING DIMENZIÓ BECSLÉSE. Ennek lényege, hogy az adott idősort egy zajjal terhelt dinamikai rendszer megfigyelésének tekintjük, és a feladat a dinamikai rendszer dimenziójának megadása. Mivel az éghajlat nagyszámú nemlineáris kölcsönhatás eredményeként jön létre, célszerű az éghajlati idősorokat a jól ismert lineáris idősor modellek helyett NEMLINEÁRIS IDŐSOR MODELLEK (Matyasovszky, 2001) segítségével elemezni.

Jól tudjuk, hogy az éghajlat valójában soha nem állandó, hanem szüntelenül változik. Hosszú évek óta nagy erőfeszítések történnek a jövő éghajlatának becslésére. A problémát az éghajlati rendszer fontos folyamatait közelítőleg leíró dinamikai modellek segítségével vizsgálják. Ezen modellek területi felbontása azonban számos gyakorlati kérdés szempontjából nem elegendő. Ezért szükség van a modellek eredményeinek a nagyobb felbontás felé mutató leskálázására. Ez a leskálázás ma már elsősorban finom felbontású beágyazott dinamikai modellekkel történik. A korábban uralkodó statisztikus leskálázás szerepe jelentősen csökkent. Meggyőződésem szerint azonban ma is találhatók új utak ezen a területen (Matyasovszky, 2006). Megjegyezzük, hogy például a hőmérséklet kezelése viszonylag egyszerű, ám a csapadék, mivel térben és időben sem folytonos, jóval problematikusabb. Ezért egy jó csapadékmodell kidolgozása elkerülhetetlen.

Részen az általános megismerés, részen a jövő éghajlatának becslési lehetőségeinek megismerése szempontjából fontos a már lezajlott, illetve zajló éghajlatváltozás detektálása és becslése. Az éghajlatváltozást legegyszerűbben a várható érték (átlag) időbeli változásával szokás leírni (trend analízis: Matyasovszky (1998), periodicitásvizsgálat: Matyasovszky, 2009a). Igen lényeges azonban a várható érték körüli ingadozás mértékének, a szórásnak a becslése is. Manapság, alapvető fontosságú gyakorlati hatásai folytán, egyre inkább előtérbe kerülnek az extrém események, illetve az ezekre való hajlam időbeli változása is. E kérdéseket a variancia regresszió, illetve a kvantilis regresszió (Matyasovszky, 2000) segítségével vizsgálhatjuk. Ez utóbbi módszer végső soron elvezethet az adott éghajlati elem valószínűségi eloszlásának időfüggő becsléséhez (Matyasovszky és Lakatos, 2002). Az éghajlatváltozás kapcsán időnként felvetődik az évszakok hosszának, illetve az egyes éveken belül az évszakok

időbeli eltolódásának lehetősége. Ezzel párhuzamosan fontos az *évszakok definíciója* is (Mika és Matyasovszky, 2009).

A meteorológiai mérések és megfigyelések hossza és homogenitása az ún proxy adatok nélkül alapvető gátat szabna az éghajlatváltozások vizsgált időskálájának. A proxy adatok (évgyűrű, pollen, jégfurat izotóp, stb) segítségével azonban akár több százezer évre visszamenőleg következtethetünk a Föld éghajlatának múltjára. Ezek a paleoklíma adatsorok egyrészt alkalmasak a korábban említett témák vizsgálatára, másrészt további speciális kérdések elemezhetőek. Ilyen például a MILANKOVICS-ELMÉLET ÁLTAL VÁRT ÉS A LEZAJLOTT ÉGHAJLATVÁLTOZÁSOK közötti egyezések és ellentmondások (Matyasovszky, 2010). Egy másik erősen kutatott kérdés A KÉT FÉLTEKE VÁLTOZÁSAINAK SZINKRONITÁSA-ASZINKRONTÁSA (Matyasovszky, 2009b). Ezekhez részben kapcsolódnak az ugrásszerű éghajlatváltozások (abrupt climate changes), melyeknek detektálása, sőt egzakt definíciója sem megoldott.

Légköri pollenkoncentráció előrejelzése

Az elmúlt években, évtizedekben drasztikusan nő az ember érzékenysége, allergiás betegségeinek mértéke a különböző növények pollenjének légköri előfordulása kapcsán. Meteorológiai szempontból három fő kérdést szokás vizsgálni. A napi összes pollen mennyiségének előrejelzése, valamilyen napi egészségügyi határérték elérésének előrejelzése, illetve az egyes évek ún pollinációs időszakának (kezdetének és végének, de főképp kezdetének) előrejelzése. Hazánkban a parlagfű okozza a legsúlyosabb tüneteket, a világszerte legmagasabb koncentrációk a Kárpát-medencében fordulnak elő. Ezért a fenti kérdéseket a parlagfű esetére már elemeztem kollégáimmal (Makra et al, 2010). Az említett növényen kívül azonban számos más allergén pollen esetében végezhető el hasonló vizsgálat, aminek gyakorlati hasznát aligha kell hangsúlyozni. Ennek során meteorológiai paraméterek és az aktuális pollen koncentrációja közötti minél pontosabb statisztikai kapcsolat felállítása a cél.

Hivatkozások

- Makra, L., Matyasovszky, I., Thibaudon, M., and Bonini, M., 2010: Forecasting ragweed pollen characteristics with nonparametric regression methods over the most polluted areas of Europe. *International Journal of Biometeorology*, Accepted
- Matyasovszky, I., 1998: Non-parametric estimation of climate trends. *Időjárás* 102, 149-158.
- Matyasovszky, I., 2000: A method to estimate temporal behaviour of extreme quantiles. *Időjárás* 104, 43–51.
- Matyasovszky, I., 2001: A nonlinear approach to modelling climatological time series. *Theoretical and Applied Climatology* 69, 139–148.
- Matyasovszky, I., 2006: Developing an optimal system of circulation pattern types for downscaling purposes. *Időjárás* 110, 125–134.
- Matyasovszky, I., 2009a: Improving the methodology for spectral analysis of climatic time series. *Theoretical and Applied Climatology*, Doi: 10.1007/s00704-009-0212-z.
- Matyasovszky, I., 2009b: Trends, time-dependent and nonlinear time series models for NGRIP and VOSTOK paleoclimate data. *Theoretical and Applied Climatology*, Doi: 10.1007/s00704-009-0229-3
- Matyasovszky, I., 2010: Milankovitch forcing in paleoclimate data. *Climate Research* 41, 151–156
- Matyasovszky, I., and Lakatos, M., 2002: Temporal behavior of the extremity of Palmer Drought Severity Index. *Forth European Conference on Applied Climatology*, Brussels, Belgium, 2002.
- Mika, J., and Matyasovszky, I., 2009: 6th General Assembly of EGU, Vienna, Austria, April 19–25, 2009, Section CL44.

TDK TÉMÁK ÁLTALÁNOS- ÉS MIKROMETEOROLÓGIÁBÓL

Weidinger Tamás

ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter s. 1/A
e-mail: weidi@ludens.elte.hu

Bevezetés

A tudományos diákköri munka sajátos együttműködés a témavezető és a hallgató között. A szakmai tudományos sikerek mellett problémamegoldásra, együttműködésre nevel. Lehetőséget ad, egy-egy témakör, kutatási módszer megismerésére. A munka során eldöntheti a hallgató, hogy érdekli-e az adott témakör, megfelelő-e az a stílus, szemlélet, kutatási módszer, amit a témavezetőtől tanulhat. S hasonlóan, a témavezető is óhatatlanul véleményt formál a diákról, a közös munka lehetőségéről. A lényeg azonban a tudományos (alkalmazott, vagy elméleti) feladat megoldása. A munka pedig akkor van elvégezve, ha abból TDK dolgozat, s lehetőség szerint cikk is készül.

Sokszor egy-egy diákköri téma kutatási pályázathoz kapcsolódik. Itt a határidőket a feladatok és a pályázati beszámolók diktálják. Természetesen ez nem mond ellent annak, hogy a TDK keretében egy jól meghatározott feladatot önállóan kell megoldani. A közös munka előrehaladtával egyre inkább számítanak a hallgatóra, egyre inkább neki is felelősséget kell vállalni a sikerért. Egyszerűbben fogalmazva: illendő dolog a közös munka elején eldönteni, hogy belevágjanak-e a komolyabb feladatokba, vagy témát, elképzelést kell váltani a jelentkezőnek, de ugyanez már nem igaz egy-egy tudományos munka, együttműködés befejezése előtt legyen az TDK, diplomamunka, vagy PhD.

Van egy másik út is a TDK munkában, amikor a hallgatónak már van egy elképzelése, tudományos kérdése, aminek a megvalósításához vár segítséget. Ez a pályázatok korában a „hobbikutatás”, ami nélkül szintén nem fejlődhet a tudomány. Itt a témavezető feladata, hogy megfelelő szakirodalmat ajánljon, s helyes mederbe terelje az elképzeléseket.

Témaajánló

A diákköri témákat az oktatási és kutatási feladatoknak megfelelően, sok ábrával, a fő kérdéseket érintve igyekszem bemutatni. Természetesen a „hobbikutatások” sem maradhatnak ki a felsorolásból. A diákköri, szakdolgozati és diplomamunka témák átfedik egymást. A különbség az, hogy szakdolgozatot és diplomamunkát mindenkinek kell készítenie, az idejében elkezdett önálló munka, az alkalmazott, vagy elméleti problémák megoldása viszont nem kötelező.

Általános meteorológia

Az általános meteorológia tárgy keretében másodévben áttekintjük a különböző skálájú légköri mozgásrendszereket, azok kialakulását, fejlődését. Sok olyan érdekes légköri folyamat van, amire kevés idő jut az egyetemen. Gondoljunk csak a trópusi, szubtrópusi folyamatokra:

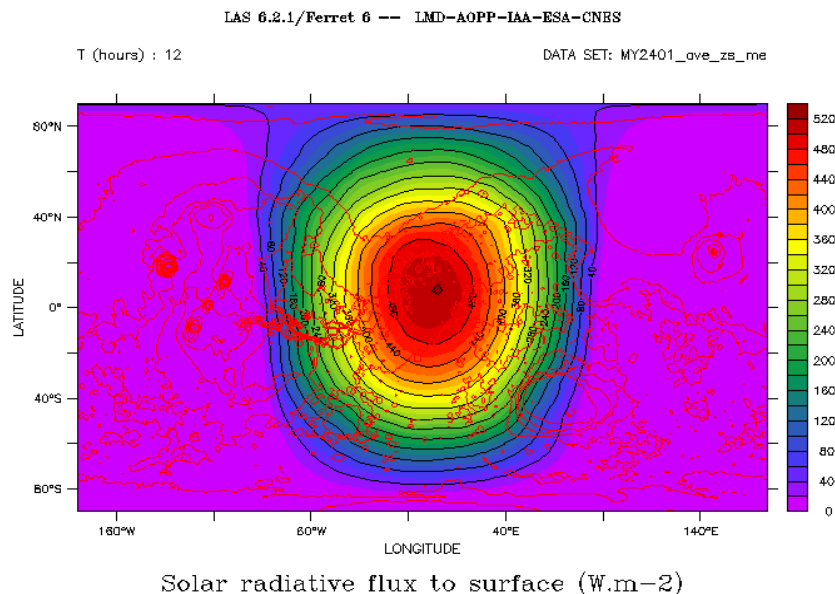
- hogyan alakulnak ki és fejlődnek a monszundepressziók az indiai szubkontinensen,
- hogyan éri el a nyári monszun India partjait, milyen áramlási kép jellemzi az Indiai óceán térségét, milyen módon lehet ezt előrejelezni,

- mi jellemzi az ausztráliai monszont, egyáltalán milyen Ausztrália és Új-Zéland időjárása és éghajlata,
- hogyan alakulnak ki a Rossby-hullámokban fejlődő mérsékeltövi ciklonokból a szubtrópusi ciklonok, és hogyan alakítják Hawaii időjárását,
- melyik trópusi ciklon közelítette meg leginkább Európát, milyen pályán haladt, várható-e trópusi ciklon Dél-Európában, vagy ennek egy megváltozott éghajlat mellett sem lehet realitása?

Egy másik érdekes témakör a különböző bolygók éghajlatának és időjárásának a vizsgálata. A hazai meteorológiai gyakorlatban egyre elterjedtebben alkalmazott mezoskálájú, nemhidrosztatikus WRF modellnek megjelent a marsi időjárást modellező változata (<http://planetwrf.com/>). A kormányzó egyenletek, a numerikus módszer ugyanaz, a légkör szerkezete, a sugárzási viszonyok, a felszín-légkör kölcsönhatások „kicsit mások”. Hogyan működik a modell, hogy kell marsi időjárás-előrejelzést készíteni? Ilyen és hasonló kérdésekre lehet választ keresni. A modell adaptálásában Gyöngyösi András Zénó tudományos segédmunkatárs tud majd segíteni.

Érdekes probléma a földi és a marsi kis porörvények (porördögök) összehasonlító vizsgálata, dinamikus modellezése is.

Vannak már kész marsi éghajlati modelleredmények is porviharos, illetve porvihar nélküli légkörre. (<http://johnson.lmd.jussieu.fr:8080/las/servlets/options>). Hogy működik az adatbázis, milyen a Mars éghajlata? Ez is egy választható témakör, ami szintén „hobbikutatás”. Az 1. ábrán a Mars felszín 0° hosszúsági körére vonatkozó déli 12 órás számított átlagos globálsugárzás értékeket láthatjuk az első marsi hónapra, porvihar-mentes esetben. A felszínre jutó energia meglepően nagy, 400 Wm^{-2} feletti az Egyenlítő térségében. Ez érthető, hiszen a légkör ritka, a felszíni nyomás 7 hPa körüli.



1. ábra. Átlagos besugárzás [Wm^{-2}] az első marsi hónapban 12 órakor (a fő hosszúsági kör, 0° mentén) porvihar-mentes esetben. Nézzük meg a besugárzás eloszlását és értékeit!

Mikrometeorológia

A mikrometeorológia a térben és időben kis skálájú folyamatokat vizsgálja, amelyek mérete 10 km-nél kisebb, s időskálájuk kevesebb, mint 1 nap (lokális folyamatok). A mikrometeorológia a planetáris határréteg (PHR) jelenségeivel foglalkozik. Kiemelt szerepet kap a felszínközeli réteg vizsgálata, az energiamérleg komponensek meghatározása, a

kicserélődési folyamatok (impulzus, hő, nyomanyagok) leírása különböző felszínek felett, de ide tartozik a PHR modellezése, ami alapvető fontosságú a mezoskálájú modellekben, a szennyezőanyag-terjedés leírásában, vagy a szélenergetikai vizsgálatokban.

Mérés-adatfeldolgozás:

A Jedlik Ányos pályázat segítségével, az OMSZ koordinálásával, kiépül egy négy állomásból álló magyarországi alapéghajlati mérőhálózat, amely alkalmas a meteorológiai állapotjelzők, profilok és energiamérleg komponensek hosszútávú változásainak feltárására. Az energiamérleg komponensek különböző módszerekkel történő meghatározásába, a most már többéves debreceni éghajlati adatbázis feldolgozásába lehet bekapcsolódni (2. ábra). Szintén érdekes feladat az idén telepítésre kerülő további állomások adatfeldolgozó rendszerének kialakítása. Az OMSZ részéről Nagy Zoltán osztályvezető és Dr. Baranka Györgyi vezető főtanácsos tud segíteni a munkában.



2. ábra. Az alapéghajlati mérőhálózat debreceni állomása (Nagy Zoltán, OMSZ felvétele). Fent: direkt árammérések (impulzus, CO₂, szenzibilis és latens hőáram), szélesebesség, hőmérséklet és nedvesség profil mérések (jobbra). Lenn: sugárzásmérő állvány (balra), talaj energiaháztartás mérések (talajhőmérséklet, -nedvesség és -hőáram), jobbra.

Az elmúlt évek műszerbeszerzéseinek eredményeként kialakult egy korszerű mobil mikrometeorológiai mérőrendszer a talaj és a felszín energiaháztartás-komponenseinek meghatározására. Több expedíciós mérést végeztünk az EU6 NitroEurope program keretében a Szegedi Egyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékével együttműködve Dániában (3. ábra) és Lengyelországban. Az ehhez kapcsolódó diákköri téma: a turbulens áramszámítás és a talajba jutó hőáram meghatározása, részvétel a mérési expedíciók adatfeldolgozásában.



3. ábra Mikrometeorológiai állomás a 2009. májusi dániai (Bjerringbro) EU6 NitroEurope mérési kampányon. Balról jobbra: szonikus anemométer, gradiens mérő oszlop, Wasul-Flux - fotoakusztikus ammóniamérő, csapadékmérő, tápegység és adatgyűjtő modul, sugárzásmérő oszlop (Pogány Andrea felvétele).

A korábbi együttműködéseknek köszönhetően további mikrometeorológiai adatfeldolgozási feladatok közül is lehet választani.

- Fontos, „kicsit futurisztikus” téma a marsi űrutazáshoz kapcsolódó földi analógias vizsgálatok kérdése. Az utahi sivatagban (USA) van egy ilyen szimulációs bázis. Kéthetente érkezik egy-egy új személyzet, 2008 tavaszán az egyik magyarokból állt (<http://planetologia.elte.hu/1cikkek.phtml?cim=hungaromars2008.html>). Több kísérletet végeztek, többek között az ELTE Meteorológiai Tanszék műszerivel egy mikrometeorológiai állomást építettek. A feladat ennek az adatbázisnak a feldolgozása, a sivatag meteorológiai, sugárzási és energiaháztartási viszonyainak a leírása, s ismerkedés az eddigi a Mars bolygón végzett meteorológiai mérésekkel. Dr. Hargitai Henrik (ELTE BTK Média Tanszék, <http://emc.elte.hu/~hargitai/>) a témakör planetológiai vonatkozásaiban segít.
- Az utóbbi években egyre több mikrometeorológiai mérés foglalkozik a tavak, nagy víztározók és a folyók párolgásának, energiaháztartásának meghatározásával. A Mississippi Állami Egyetem (Jackson State University) Fizika, Légtörfizikai és Geológiai Tanszékén 2007 óta végeznek profil és energiaháztartási méréseket a Mississippi folyó egyik nagy víztározójában (Ross Barnett Reservoir, 32° 26' N, 90° 02' W). Egy formálódó együttműködés keretében megkaphatjuk a mérési adatokat. Itt a kérdések: a profil- és a fluxus-mérések alapján számított turbulens áramok összehasonlítása, az energiamérleg lezárása, a napi szinoptikus helyzet (időjárási típus) és a párolgás közötti kapcsolat vizsgálata. Különösen érdekesek a hidegfront utáni napok nagy párolgási adatai. A munka elkezdéséhez természetesen szükséges a megfelelő elméleti alapok megszerzése.
- A mikrometeorológia foglalkozik a belső terek állapotával. Milyen mikrometeorológiai körülmények vannak egy egyetemi nagyelőadóban? Hogyan változik a hőmérséklet, a légáramlás, a CO₂ koncentráció egy-egy előadás során. Hogyan alakul az aeroszol

mennyisége? Többek között ezekre a kérdésekre kereste a választ az egyik fizika nagyelődában végzett egy hetes mérés idén tavasszal. A feladat, a mikrometeorológiai adatbázis feldolgozása. A kutatásban Dr. Salma Imre egyetemi tanár (Kémia Intézet) segít a levegőkörnyezeti vonatkozások megértésében.

- A megújuló energiaforrások alkalmazása egyre fontosabbá válik. A nagy szélgenerátorok mellett megjelentek az alacsony indulási küszöbű, kis teljesítményű (1–5 kW) szélgépek. Ezek alkalmazhatók családi házakon, farmokon, vagy magas városi épületeken, de vajon van-e megfelelő sebességű szél az adott helyen. A korábbi években az egyik fővárosi bevásárló centrum tetején mértük a szélsébséget egy 6 m-es oszlopon, ősszel pedig Budaörsön tervezünk energetikai szélmerést. Hogyan kell szélenergetikai becslést készíteni? Lehet-e, s ha igen milyen szélgépet lehet gazdaságosan alkalmazni az adott helyen? Milyen magas oszlopot javasoljunk? Az elméleti statisztikai kérdés pedig az, hogy egy rövid, néhány hónapos mérési adatsor és a környező meteorológiai állomás hosszú idősorának az összevetésével hogyan lehet optimális becslést adni a hosszútávú energiatermelésre. A statisztikai modellezésben Dr. Matyasovszky István docens úr segít.



4. ábra. Automata, mikroszámítógéppel vezérelt dinamikus kamra a talaj CO_2 áramának mérésére, éppen nyitott állapotban, valamint az N_2O és CH_4 mérésére szolgáló két kis statikus kamra (a kép alján a jobb- és baloldalon) a dániai mérési expedíción (Bordás Árpád felvétele).

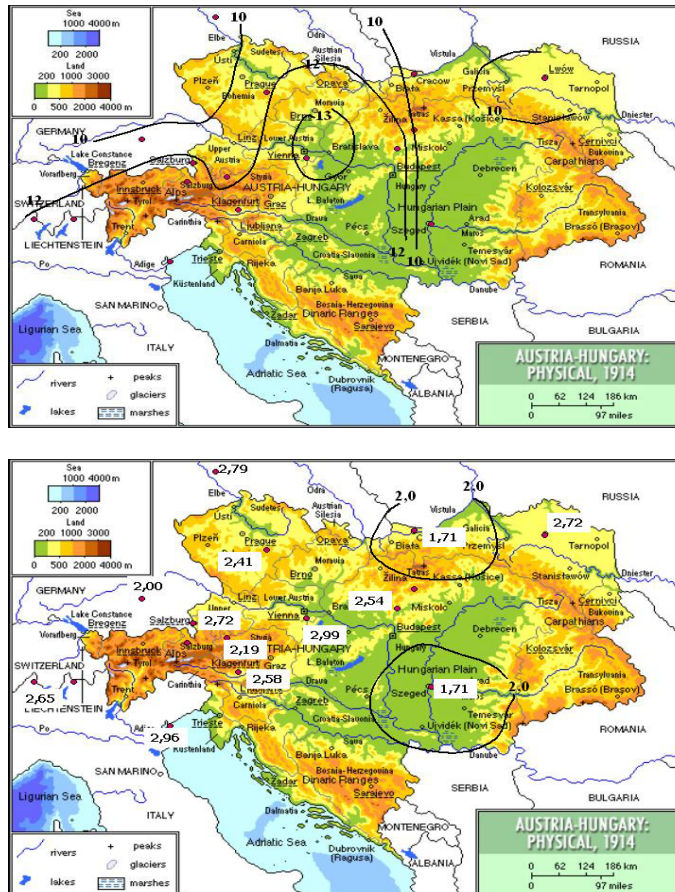
Fontos feladat a mikrometeorológiai mérőrendszer fejlesztése. Itt két elképzelésünk van a közeljövőre. A NitroEurope programhoz kapcsolódva beszereztünk több automata kamrát, amelyekkel a talaj CO_2 és radon áramát szeretnénk mérni in situ módszerekkel. Vannak olyan nyomanyagok (N_2O , CH_4) amelyeknek a talajáramához időben többször (a kamra bezárásakor, majd 10 perc és 20 perc múlva) kell mintát venni a terepen, majd azt laboratóriumban analizálni. Hogyan lehet egy mikroszámítógéppel vezérelt pneumatikus mintavevőt készíteni a meglévő automata kamrákra (4. ábra) alapozva. E témában Eredics Attila PhD hallgatóval (Nyugat-magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar) és Dr. Istenes Zoltán docens úrral (ELTE Informatikai Kar) dolgozunk együtt.

A másik kérdés, amivel az elkövetkező években szeretnénk foglalkozni, az ún. Eddy-akkumulációs technika. Hogyan lehet egy lassú nyomanyag-mérő szenzort (néhány 10 s-os átlagolás) és egy gyors szonikus anemométert (3D szélérés 10 Hz-es felbontással) összehangolni, úgy, hogy külön mérjük a fel- és a leszálló légörvényekben szállított nyomanyag koncentrációját.

Modellezés:

A mikrometeorológiai modellezés témaköréből két érdekes példát mutatok be. Az első a történeti ózon-koncentráció meghatározása és az ózonüledés számítása rekonstruált adatsorokból. E kérdés az ipari forradalom előtti háttér-koncentráció és a bioszférát ért alapterhelés meghatározása miatt fontos.

Az ózont 1839-ben fedezte fel Christian Friedrich Schönbein (1799–1886) a Baseli Egyetem kémia professzora. Az általa kifejlesztett ózonmérési eljárást a XIX. század közepétől alkalmazták a világ különböző részein egészen az 1920-as évekig.



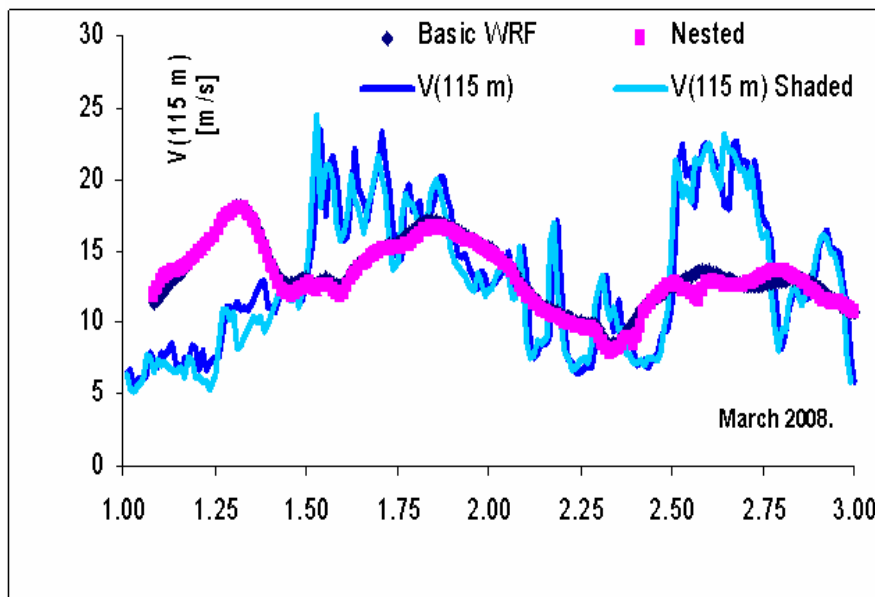
5. ábra. Az évi átlagos ózon-koncentráció (ppb) a Habsburg Birodalomban éghajlati állomásain végzett mérések alapján 1855-ben (fent) és a fenyőerdőre vonatkozó ózon-üledés értéke (lent) a vegetációs periódusban (április október) gO_3/m^2 egységben. (Az ábrákat Dr. Baranka Györgyi készítette.)

Egy impregnált papírcsík színváltozása alapján adták meg az ózon számértékét a 0–10, vagy a 0–14 közötti ún. Schönbein-skálán nappalra és éjszakára. A Habsburg Birodalom területén az 1850-es évek közepén több mint 20 helyen végeztek ilyen méréseket. Az Schönbein-szám és a relatív nedvesség értékei alapján lehetőség van a korabeli számskála ózon-koncentrációra (ppb) történő átszámítására (Pavelin-féle módszer). Az ózon-koncentráció (C , ppb, vagy mg/m^3) és az üledési sebesség (v_d) ismeretében már becsülhető a fluxus ($F_{\text{O}_3} = v_d C$).

Az április és október közötti vegetációs időszakra számított ózonüledés fenyőállományra ($v_d \approx 0,3\text{--}0,8 \text{ cm/s}$) vonatkoztatva $1,7\text{--}2,7 \text{ g}/\text{m}^2$ körüli volt másfél évszázada (5. ábra), ma ez az érték $9\text{--}11,5 \text{ g}/\text{m}^2$ Magyarországra. A koncentráció emelkedésében közel háromszoros a változás. A diákköri téma a XIX. századi ózon és meteorológiai adatok számítógépes

adatbázisának elkészítése a mai Magyarországra (a munka egy jó része már megvan), majd az ózon ülepedés modellezése, amiben Dr. Mészáros Róbert adjunktus úr nyújt segítséget.

A másik modellezési feladat a Mosonmagyaróváron működő szélérőművekre készülő szélenergetikai előrejelzések javítása. Rendelkezésre állnak a WRF modell napi futtatásai és két szélérőmű 10 perces szélesség, szélirány és termelési adatai (6. ábra). A cél a WRF modell határréteg parametrizációjának megismerése és javítása, i) az érdességi magasság figyelembevételével, ii) modell output statisztikák alkalmazásával. E vizsgálatokban Gyöngyösi András Zénó tudományos segédmunkatárs is segít.



6. ábra. A két Enercon E70 szélgenerátoron mért és a WRF modellel számított szélesség a gondola magasságában (115 m) Mosonmagyaróváron az Emma szélvihar átvonulásakor 2008. március 1–2. (A beágyazott WRF-modell futtatást Gyöngyösi András Zénó végezte.) Jobb oldalon lent a 600 KW teljesítményű E40 (65 m), fent a 2 MW teljesítményű E70 szélgenerátor.

TDK témák a most induló kutatóegyetemi pályázatban

A kutató- és kiváló egyetemi címetek 2010 áprilisában adták át: 5 kutatóegyetem (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Debreceni Egyetem, ELTE, Semmelweis Egyetem, Szegedi Tudományegyetem) és 5 kiváló egyetem lett (Budapesti Corvinus Egyetem, Miskolci Egyetem, Pannon Egyetem, Pécsi Tudományegyetem és a Szent István Egyetem). A kutatóegyetemi pályázathoz kapcsolódó közös hazai és EU finanszírozású TÁMOP pályázaton (<http://eupalyazatiportal.hu/>) egyetemünk 3 milliárd forintot nyert. A 2012. május 31-ig tartó pályázat több programja kapcsolódik a Természettudományi Karhoz. Az ELTE Meteorológiai Tanszék a „Nagy rendszerek a természettudományban és számítógépes szimulációjuk” programban vesz részt, amelynek vezetője Lovász László akadémikus. Két alprogram fut a tanszéken. Az egyik az éghajlatmodellezéssel kapcsolatos, ennek vezetője Dr. Bartholy Judit, a másik a „Skálafüggő időjárási és szennyezőanyag-terjedési folyamatok modellezése”, ennek koordinátora a cikk szerzője. Mindkét program épít a hallgatók munkájára, ennek támogatására külön pénzkeret szolgál. Nézzük az utóbbi programot:

A modellezési célok között szerepel az OMSZ-nál futtatott ALADIN program újonnan kifejlesztett oktatási változatának (*CHAPEAU – Common HARMONIE and ALADIN Package for Educational and other Academic Use*) az adaptálása és tesztelése. „A fejlesztés célja egy olyan, formájában egyszerűsített, de tartalmában a legfontosabb

szakmai elemeket tartalmazó modell kifejlesztése, ami az ALADIN modell-rendszerre épül és hozzáférési, alkalmazási lehetőséget biztosít az egyetemi és akadémiai kutatók számára. Az ALADIN kódrendszert az ALADIN (<http://www.cnrm.meteo.fr/aladin/>) és a HIRLAM (<http://www.hirlam.org>) tagországok közösen fejlesztik, melynek eredményeképpen az előrejelző modellt több mint 25 országban alkalmazzák (legtöbb helyen operatív módon).” A feladat a modell adaptációjában és tesztelésében való részvétel. E témakörben az OMSZ-ból Dr. Horányi András és Mile Máté segítségére is számíthatnak a jelentkezők.

További témát jelent a WRF és az ALADIN egyetemi változatának összehasonlító vizsgálata. Terveink szerint ezt is a Tanszéken végezzük.

A TÁMOP programban résztvevő többi oktatóhoz is fordulhatnak diákköri témákért. Dr. Tasnádi Péter professzor úr a numerikus modellekből leszármaztatott – a szinoptikus és a mezoskálájú előrejelzésekben használható – dinamikus meteorológiai paraméterekkel foglalkozik, Dr. Ács Ferenc docens úr a felszíni karakterisztikák és a talajnedvesség hatását elemzi numerikus modellkísérletekkel a planetáris határreteg magasságra és a konvektív csapadék keletkezésére, Dr. Gyuró Görgy docens úr a labilitási indexeket vizsgálja. Dr. Mészáros Róbert adjunktus úr és a programban jövő évtől dolgozó Dr. Lagzi István László (jelenleg az USA-ban kutat) a mezoskálájú terjedési modellekkel (parametrizációk, ózon-modellezés, időjárási és terjedési modellek csatolása) foglalkozik.

Összefoglaló megjegyzések

A cikkben bemutatott különböző, egymástól látszólag nagyon eltérő tématerületeket a felszínközeli és a határreteg folyamatainak vizsgálata fűzi össze, legyen az mérés, adatfeldolgozás, vagy a különböző skálájú légköri folyamatok modellezése. Sok lehetőség van, és hogy melyik válik valóra az a hallgatók érdeklődésétől és a témavezető(k) kutatási és oktatási feladataitól is függ. A témaválasztás egy iterációs folyamat, ami után már „csak” a feladatot kell megoldani, s időre elkészíteni a diákköri dolgozatot.

Köszönetnyilvánítás: A cikk elkészítéséhez hozzájárult az EU6 NitroEurope program, a Jedlik Ányos pályázat (NKFP6-00028/2005) és a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR kutatóegyetemi projekt, amiért ezúton mondunk köszönetet.

A MŰHOLDAS MÉRÉSEK FELHASZNÁLÁSA A KLIMATOLÓGIÁBAN

Pongrácz Rita, Bartholy Judit, Dezső Zsuzsanna, Kern Anikó

ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.
e-mail: prita@nimbus.elte.hu

A műholdas technológia rendkívül gyors ütemű fejlődésének köszönhetően a már rendelkezésre álló méréseket, s az új fejlesztésű szenzorokat, azok tervezett mérési programját sokféle meteorológiai és klimatológiai elemzés során lehet felhasználni. A jelenlegi tanszéki kutatások több iránya is kapcsolódik a műholdas mérésekhez.

(1) A városklimatológiai vizsgálatok célja elsősorban a városi hősziget szerkezetének, időbeli menetének, a helyi települési sajátosságoknak a megismerése (pl.: *Dezső et al.*, 2005; *Bartholy et al.*, 2009; *Pongrácz et al.*, 2006; 2010).

(2) A vegetációs indexek tendencia elemzése segítséget nyújt egyrészt az antropogén eredetű éghajlatváltozás detektálására (pl.: *Bartholy és Pongrácz*, 2005), másrészt a vegetáció változásának nyomon követésére, különös tekintettel az extrém időjárási eseményekre, hiszen a napi felbontású távérzékelte adatok segítségével a rövid távú változások is folyamatosan detektálhatók (pl.: *Kern et al.*, 2007a).

(3) Az ELTE Űrkutató Csoportja által 2002-ben telepített intézeti műholdvevő állomás (*Ferencz et al.*, 2003; *Bognár et al.*, 2005) 3,2 méter átmérőjű antennájával több kvázipoláris meteorológiai és környezetkutató műhold adata érhető el, közvetlenül az adatok mérésekor. Ilyen az amerikai NOAA kvázipoláris műholdsorozat teljes HRPT (High Resolution Picture Transmission, vagyis Nagy felbontású képtovábbítás) adása, és a Terra, illetve az Aqua műholdak MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer, vagyis közepes felbontású leképező spektrális sugárzásmérő) szenzorának adása (*Kern et al.*, 2005; *Timár et al.*, 2006). A műholdvevő berendezés által vett mérési eredmények feldolgozása például lehetővé teszi a NOAA műholdak mérései alapján a vízgőzprofil meghatározását (*Kern et al.*, 2007b); a MODIS adatok esetében az adatok automatikus vizuális megjelenítését a *Google Earth* térinformatikai szoftverben; a valós idejű tűzazonosítást (*Bognár et al.*, 2005); vagy az időjárás-előrejelzésekbe való beépítési lehetőségek (*Aune et al.*, 2008) kihasználását.

A fentiek közül a városi hőszigetre vonatkozóan mutatunk be röviden néhány kiemelt eredményt a fővárosra végzett vizsgálatainkból.

Városklimatológiai vizsgálatok

Napjainkban Magyarország népességének 67%-a él városokban, és az előrejelzések szerint 2040-re a lakosság 80%-a lesz városlakó (*ENSZ*, 2008). A városokban az emberi tevékenység természetire gyakorolt hatása koncentráltan érvényesül: nagymértékben megváltozik a felszín arculata, módosul a légkör összetétele, aminek következtében a helyi klíma is jelentősen eltér a természetes környezetétől. Az elmúlt évtizedben a városi népesség növekedésén túl a települések szerkezete is jelentősen megváltozott. Sok helyen új lakónegyedek, bevásárlóközpontok, ipari üzemek épültek, ami a mesterséges felszínek növekedését vonta maga után.

Már közel két évszázada ismert tény, hogy egy városi térség és annak környezete között hőmérsékleti különbség áll fenn, amit a kutatók városi hősziget-jelenségnek neveztek el. A városi hőszigetet intenzitásával jellemezhetjük, ami a városi és városkörnyéki hőmérséklet különbségeként definiálható. Ennek meghatározásához világszerte többféle mérési módszert alkalmaznak, pl. hagyományos, 2 m-es magasságban végzett léghőmérsékleti méréseket, műholdas felszínhőmérsékleti méréseket, gépkocsival végzett méréseket, illetve repülőgépes

méréseket. Fontos hangsúlyozni, hogy a különböző módszerekkel végzett mérésekből meghatározott városi hősziget intenzitása lényegesen eltér egymástól (*Voogt és Oke*, 2003). A hősziget-intenzitás maximuma a földfelszíni mérések esetében napnyugta után néhány órával következik be, míg a műholdas mérések esetében ez a déli, kora délutáni órákra tehető.

A műholdas adatoknak a városklimatológiában való alkalmazására az 1970-es évektől kezdve, a nagy felbontású műholdak megjelenésével nyílt lehetőség. Az első ilyen vizsgálatok még durva (8-10 km/pixel) felbontású műholdképeket használtak. Már ekkor bebizonyosodott, hogy derült égbolt esetén a műholdak alkalmasak a városi hősziget észlelésére, a hősziget változásainak vizsgálatára (*Matson et al.*, 1978). A műholdak felbontásának javulásával lehetővé vált a városi hősziget szerkezetének részletesebb feltárása. Az elmúlt évtizedekben a világ több nagyvárosára vonatkozóan történtek ilyen vizsgálatok, s az ELTE Meteorológiai Tanszékén immáron egy évtizede éve folyó kutatásaink keretében hazánk tíz legnagyobb városára (Budapest, Debrecen, Miskolc, Szeged, Pécs, Győr, Nyíregyháza, Kecskemét, Székesfehérvár, Szombathely), valamint Közép-Európa kilenc nagyvárosára (Bukarest, Varsó, Bécs, Milánó, München, Prága, Szófia, Belgrád, Zágráb) vonatkozóan végzünk átfogó városklimatológiai vizsgálatokat. Ezek keretében finom felbontású műholdas felszínhőmérsékleti adatok felhasználásával tanulmányozzuk a városi hősziget sajátosságait (*Dezső et al.*, 2005; *Pongrácz et al.*, 2009).

Adatok és módszerek

A NASA Földmegfigyelő Rendszerének részeként 1999 decemberében bocsátották pályára a Terra, majd 2002 májusában az Aqua nevű műholdat, melyekkel az emberi tevékenység éghajlatra gyakorolt hatásait kívánják vizsgálni. A Terra és az Aqua kvázipoláris pályájú műholdak, 705 km magasságban keringenek a Föld körül. A Földet mindkét műhold naponta 16-szor kerüli meg. A Terra fedélzetén öt, az Aqua fedélzetén hat műszer található, melyek különböző hullámhossztartományokban, más-más felbontással mérik a sugárzási paramétereket (Terra, 1999; Aqua, 2002).

Vizsgálatainkhoz a mindkét műholdon megtalálható MODIS szenzor méréseit használtuk fel. A MODIS szenzor a sugárzási paramétereket 36 különböző – a láthatótól a hőmérsékleti infravörösre terjedő – hullámhossztartományban méri, méréseinek térbeli felbontása a látható tartományban 250 m, az infravörös tartományban 1 km. A sugárzásmérésekből a teljes éghajlati rendszerre vonatkozóan számos paramétert meghatározhatnak, melyek segítségével vizsgálhatók a globális folyamatok és változások. Kutatásaink során a MODIS szenzor méréseiből meghatározott felszínhőmérsékleti, felszínborítottsági és vegetációs index adatsorokat használtuk fel. Ezek az adatok az Land Processes Distributed Active Archive Center (Földfelszíni folyamatok adatainak aktív archiváló központja) adatközponton keresztül érhetők el. Az adatok kalibrálásának, feldolgozásának módszerét a NASA adatfeldolgozó központjában folyamatosan fejlesztették, így ma már nagy pontosságú, földrajzilag tökéletesen illesztett adatok állnak rendelkezésre a teljes vizsgált időszakra vonatkozóan.

Vizsgálataink a Terra/MODIS adatok esetében a 2001. január 1. és 2008. december 31., az Aqua/MODIS adatok esetében a 2003. január 1. és 2008. december 31. közötti időszakra terjedtek ki. Így a 2001–2002 közötti időszakban napi kettő, ezt követően pedig napi négy mérés állt rendelkezésünkre. A vizsgált nyolc éves időszakban ritkán fordult elő a műhold hibájából adódó adathiány, ezen esetek száma csupán évi néhány napra tehető. A műholdas felszínhőmérsékleti méréseken alapuló városi hősziget-vizsgálatoknál jelentős adathiányt eredményez viszont az, hogy felhős időben a szenzor csak a felhőtető hőmérsékletét tudja érzékelni. Vizsgálatainkban csak azokra a napokra vonatkozóan határoztuk meg a városi hősziget intenzitását, melyeken a városi képpontoknak legalább a fele felhőmentes volt a

MODIS felvételeken. A magyar városok esetében az összes lehetséges nap 37-47%-án használhatók a műholdas felszínhőmérsékleti adatok a városi hősziget vizsgálatára. A használható adatok éven belüli eloszlása nem egyenletes, a téli hónapokban csupán 5-10, nyáron viszont 15–25 napon áll rendelkezésre használható műholdkép. Ha ezt az adatsűrűséget összevetjük más kutatási módszerekkel, megállapíthatjuk, hogy e módszer keretein belül még így is rendkívül nagy mennyiségű adat áll rendelkezésre. Bár a hagyományos földfelszíni városklimatológiai mérőállomások mérései minden nap tetszőleges időpontban rendelkezésre állnak, de az állomások sűrűsége soha nem lesz olyan nagy, mint a műholdfelvételek térbeli felbontása. A földfelszíni, illetve repülőgépes mobil mérések jó térbeli felbontásúak, de nagy költségigényük miatt hosszú távon nem lehet azokat megfelelő gyakorisággal végezni. E módszer létjogosultságát alátámasztja továbbá az is, hogy a hősziget kialakulásának kedvez a szélcsendes, derült időjárás, így az intenzív hősziget-jelenségek jól vizsgálhatók e módszerrel.

Vizsgálataink során az adatgyűjtést, a hibás, felhős képek kiszűrését követően meghatároztuk, hogy az egyes városok a műholdfelvételeken pontosan hol helyezkednek el, majd a teljes adatbázisból leválasztottuk a városokat és azok környékét tartalmazó kivágatokat. A kivágat mérete Budapest esetében 65×65 pixel. Az adatfeldolgozás következő lépése a városi és városkörnyéki képpontok meghatározása volt. Ehhez felhasználtuk a MODIS felszín típusok adatbázisát, a Google Earth műholdkép-adatbázist, valamint a GTOPO30 Digitális Terepmodellt. A Google Earth adatbázis műholdfelvételei lehetővé teszik a beépített és nem beépített területek vizuális elkülönítését. Ezek felhasználásával minden egyes városra lehatároltuk azt a területet, ami a város közigazgatási határán belül ténylegesen beépített. Ezt a kontúrt illesztettük rá az 1 km-es térbeli felbontású rácsra, és megszámoltuk, összesen hány képpont található e kontúrban belül. Ezután meghatároztuk a város „átlagos sugarát”, amit a városhatáron belüli képpontok száma és π hányadosának négyzetgyökeként definiáltunk. Ez a mennyiség azt fejezi ki, hogy mekkora lenne a város sugara, ha a város pontosan kör alakú lenne. A GTOPO30 adatbázist a jelentős magassági különbségek kiszűrésére használtuk.

A városi képpontok közé azok a pontok tartoznak, melyek a következő három feltétel mindegyikének megfelelnek:

- a Google Earth adatbázis alapján meghatározott beépítettségi határon belül találhatók,
- a MODIS felszín típus adatbázisban a beépített terület kategóriába esnek,
- tengerszint feletti magasságuknak az előző két feltételnek megfelelő képpontok átlagos tengerszint feletti magasságától való eltérése nem nagyobb, mint ± 50 m.

A városkörnyéki képpontokhoz való tartozás feltételei:

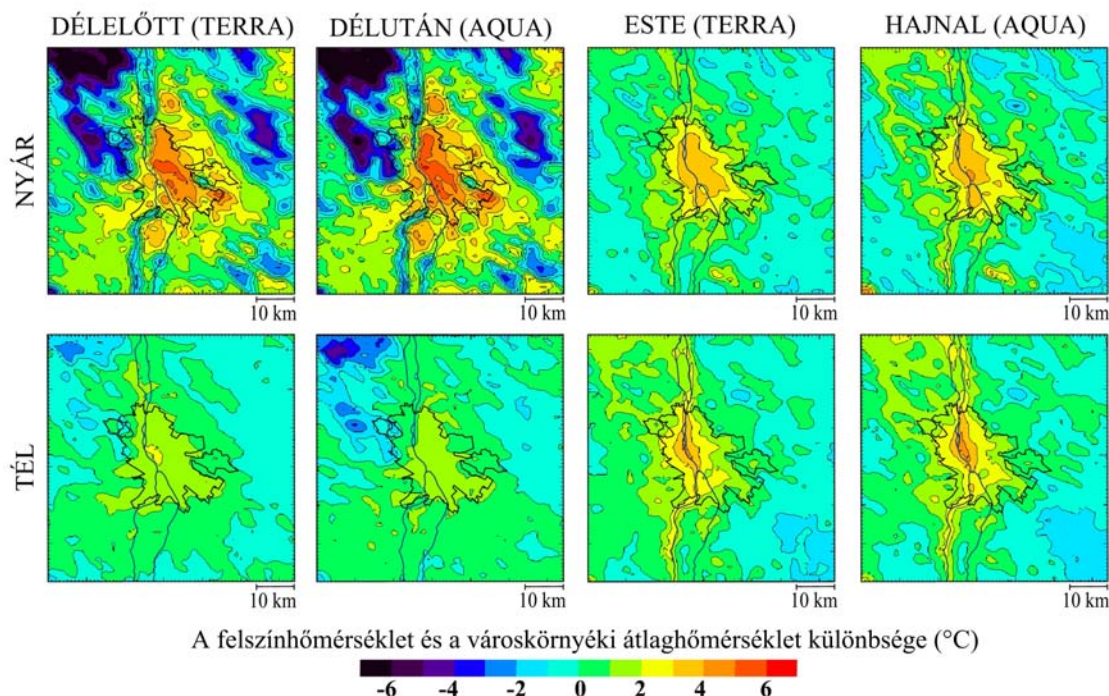
- távolságuk a Google Earth adatbázis alapján meghatározott beépítettségi határtól nem nagyobb, mint a város „átlagos sugara”,
- felszín típusuk nem tartozik a beépített terület és a víz típusához,
- tengerszint feletti magasságuknak a város átlagos tengerszint feletti magasságától vett eltérése nem nagyobb, mint ± 100 m.

Az így kapott pontok felszínhőmérsékleti adatainak felhasználásával minden városra és időpontra meghatároztuk a városi és városkörnyéki átlaghőmérsékletet, melyek különbsége adja a városi hősziget intenzitását. E paraméterek felhasználásával tanulmányozható a hősziget, valamint a különböző felszíni és meteorológiai paraméterek kapcsolata, a hősziget napszaktól, évszaktól és városmérettől való függése, továbbá annak szerkezete és keresztmetszete.

Eredmények

A műholdas felszínhőmérsékleti mérések egyedülálló lehetőséget nyújtanak a városi hősziget térbeli szerkezetének részletes feltárására. Az 1. ábra a budapesti városi hősziget szerkezetét

mutatja be. Az ábrákon az egyes képpontok hőmérsékletének a városkörnyéki átlaghőmérséklettől vett eltéréseinek nyári és téli évszakos átlaga látható nappal és éjszaka, amit a délelőtti (Terra) és délutáni (Aqua), illetve az esti (Terra) és hajnali (Aqua) adatoknak a mérések száma szerint súlyozott átlagaként határoztunk meg.



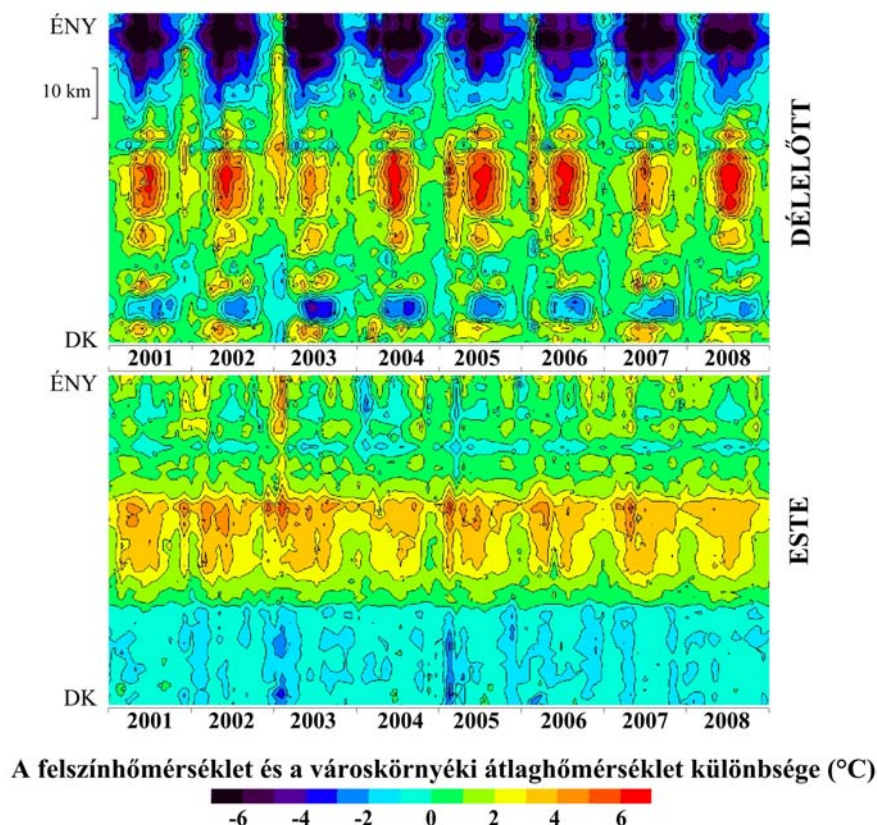
1. ábra. A városi hősziget átlagos szerkezete Budapest térségében nyáron és télen (a Terra/MODIS 2001–2008, és az Aqua/MODIS 2003–2008 közötti felszínhőmérsékleti mérései alapján)

A nappali mezőket vizsgálva megállapíthatjuk, hogy a városi hősziget magja a főváros pesti oldalán karéj alakban helyezkedik el lefedve a belvárost. A nyári időszakban a hősziget kiterjedése és intenzitása is jelentős: a városkörnyéki átlaghőmérsékletet nyáron 4–6 °C-kal meghaladó terület a fővárosnak szinte az egész pesti részére kiterjed. A budai oldalon a hősziget csak egy kisebb területet fed le, itt a domborzat, valamint a zöldfelületek nagyobb aránya mérsékli a városi hősziget erősségét. A nyári időszakban a Budai-hegység legmagasabb részeinek felszínhőmérséklete 5–6 °C-kal alacsonyabb, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet, így ebben az időszakban a fővárosban a hegyvidék és a belváros között néhány kilométeres távolságon belül kb. 15 °C-os hőmérsékletkülönbség alakul ki. A téli időszakban nappal a hősziget erőssége a belvárosban kisebb, mint nyáron, kb. 2–3 °C.

Az ábrák 1 km²-es felbontása lehetővé teszi, hogy megvizsgáljuk azoknak a felszíni elemeknek a hőszigetre gyakorolt hatását, melyek mérete meghaladja az 1 km²-t. Az ilyen elemek jellegzetes meleg, illetve hideg pontokat rajzolnak ki a hőszigeten belül, ami különösen a nyári nappali képeken szembetűnő. Ezeken a közvetlen környezetüknél több fokkal hidegebbek például a vízfelületek, erdők, parkok: az ábrákon jól láthatóan kirajzolódik a Duna vonala, a Népliget, valamint a X., XVII. és XVIII. kerületek közé ékelődő Városerdő. A meleg pontokra jó példa a Férihegyi Repülőtér, aminek felszínhőmérséklete a nagy arányú mesterséges felszínnek köszönhetően nyáron akár 5 °C-kal meghaladhatja a városkörnyéki átlaghőmérsékletet városperemi fekvése ellenére is.

Az éjszakai órákban a hősziget szerkezete jelentősen eltér a nappalitól: a főváros szinte teljes területén pozitív hőmérsékleti anomália jelenik meg, a hősziget centruma pedig a budai és pesti oldalra egyaránt kiterjed. Az éjszakai képeken – a nappaliakkal ellentétben – a budai hegyek melegebbek, mint a városkörnyéki átlaghőmérséklet.

A hősziget időbeli változékonyságát mutatja be a 2. ábra, melyen Budapest ÉNY-DK-i keresztmetszete mentén mutatja be a felszínhőmérsékletnek a városkörnyéki átlaghőmérséklettől vett eltérését, illetve ennek időbeli alakulását. A délelőtti képen megfigyelhető a városi hősziget intenzitásának nyári maximuma, aminek értéke az egyes években különböző volt. A legtöbb évben a belvárosban a felszínhőmérséklet városkörnyéki átlaghőmérséklettől vett eltéréseinek havi átlaga bizonyos nyári hónapokban a 6 °C-ot is meghaladta. Ez az állapot 2005-ben és 2008-ban állt fenn a leghosszabb ideig, ekkor három hónapon keresztül haladta meg a 6 °C-ot a városi hősziget havi átlagos intenzitása a centrumban.



2. ábra. A havi átlagos városi hősziget ÉNY-DK-i keresztmetszeti képe Budapest esetén (a Terra/MODIS 2001–2008 közötti felszínhőmérsékleti mérései alapján)

Két olyan év is volt, amikor a műholdas felszínhőmérsékleti mérések alapján a többi évhez viszonyítva kisebb hősziget-intenzitást detektáltunk: 2003-ban és 2007-ben. Ekkor a belvárosban a városkörnyéki átlaghőmérséklethez viszonyított anomália nyáron is csak 4-5 °C körül alakult, és ez az intenzitás kisebb területen, rövidebb ideig állt fenn. Ennek hátterében az akkori időjárási viszonyok állnak: a nyári hónapokban a hőmérséklet jóval az átlag felett, a csapadék mennyisége pedig az alatt alakult. Ez azt eredményezte, hogy a városon kívül sem állt rendelkezésre megfelelő mennyiségű nedvesség a párolgáshoz, így a városkörnyéki területek az átlagosnál jobban felmelegedtek. Tehát nem a város volt „hidegebb”, hanem a környék volt „melegebb”, ami e két terület átlaghőmérséklet-különbségének csökkenéséhez vezetett. Az esti idősor kiegyenlítettebb képet mutat. Itt is megfigyelhető, hogy a hősziget a téli félévben némileg visszahúzódik, de a téli és a nyári időszak között kisebb a különbség, mint nappal.

A tanszéki kutatások keretében megkezdődött a műholdas felszínhőmérsékleti mérések és az állomási léghőmérsékleti idősorok közötti összehasonlító elemzés is (Lelovics, 2010), mely az eddigi elemzések gyakorlati felhasználását segítheti elő.

Köszönetnyilvánítás: A felhasznált műholdas adatokat az USA Geológiai Hivatalának „Land Processes Distributed Active Archive Center” (LP DAAC) adatközpontja bocsátotta rendelkezésünkre (lpdaac.usgs.gov). A kutatásokat az OTKA T-038423, T-034867, T-049824, K-67626, K-69164, K-78125, az NKFP-3A/0082/2004, NKFP-6/079/2005 és a Magyar Űrkutatási Iroda TP-241, TP-258, TP-287, TP-338 számú pályázatai támogatták. További támogatók: EU VI. keretprogram CECILIA projekt (GOCE-037005), Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott CCWATERS projekt (SEE/A/022/2.1/X), az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozása (TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR), MTA TKI Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz programja (2006/TKI/246), a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, valamint az Oktatási és Kulturális Minisztérium.

Hivatkozások

- Aqua, 2002: *Science writers' guide to Aqua*. NASA Goddard Space Flight Center, Earth Observing System Project Science Office, Greenbelt, 40p.
- Aune, B., Strabala, K.I., Lindstrom, S. and Huang, A., 2008: The Direct Broadcast Version of the CIMSS Regional Assimilation System for Global Users. *International EOS/NPP Direct Readout Meeting* 2008, March 31 - April 4, 2008, Bangkok, Thailand. (http://dbmeeting.sci.gsfc.nasa.gov/files2008/DBCRAS_DB2008.ppt)
- Bartholy J. and Pongrácz R., 2005: Extremes of ground-based and satellite measurements in the vegetation period for the Carpathian Basin. *Physics and Chemistry of Earth* 30, 81-89.
- Bartholy J., Pongrácz R., Lelovics E. and Dezső Zs., 2009: Comparison of urban heat island effect using ground-based and satellite measurements. *Acta Climatologica et Chorologica Universitatis Szegediensis* 42-43, 7-15.
- Bognár, P., Timár, G., Ferencz, Cs., Lichtenberger, J., Molnár, G., Székely, B. and Kern, A., 2005: A földfelszín folyamatos monitorozása hiperspektrális műholdas adatok segítségével. *Technika* 48/9-10, 38-39.
- Dezső Zs., Bartholy J. and Pongrácz R., 2005: Satellite-based analysis of the urban heat island effect. *Időjárás* 109, 217-232.
- ENSZ, 2008: *World Urbanization Prospects: The 2007 Revision*. United Nations Population Division, Department of Economic and Social Affairs, 244p.
- Ferencz, Cs., Lichtenberger, J., Bognár, P., Molnár, G., Steinbach, P. and Timár, G., 2003: Satellite receiving station at the Eötvös Lorand University, in Hungary. *Geodézia és Kartográfia* 55(9), 30-33.
- Kern, A., Bartholy, J. és Pongrácz, R., 2005: Az ELTE Környezetfizikai Tanszékcsoport műholdvevő állomása. *Légkör* 50/1, 18-21.
- Kern A., Barcza Z., Bartholy J., Pongrácz R. and Fassang Á., 2007a: NDVI adatsorok klimatikus vizsgálatai a Kárpát-medencére. „Klíma-21” Füzetek 49, 26-37.
- Kern, A., Bartholy, J., Borbás, E.É., Barcza, Z., Pongrácz, R. and Ferencz, Cs., 2007b: Estimation of vertically integrated water vapor in Hungary using MODIS imagery. *Advances in Space Research* 41, 1933-1945.
- Lelovics, E., 2010: A hazai városi hősziget hatás összehasonlító elemzése földfelszíni és műholdas mérések felhasználásával. BSc szakdolgozat, ELTE Környezettudományi Centrum, Budapest. 36p. Témavezető: Pongrácz R., Bartholy J.
- Matson, M., McClain, E. P., McGinnis, D. F. and Pritchard J. A., 1978: Satellite detection of urban heat islands. *Monthly Weather Review* 106, 1725-1734.
- Pongrácz R., Bartholy J. and Dezső Zs., 2006: Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances in Space Research* 37, 2191-2196.
- Pongrácz R., Bartholy J. and Dezső Zs., 2010: Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities. *Physics and Chemistry of Earth* 35, 95-99.
- Terra, 1999: *Science writers' guide to Terra*. NASA Goddard Space Flight Center, Earth Observing System Project Science Office, Greenbelt, 27p.
- Timár, G., Ferencz, Cs., Lichtenberger, J., Kern, A., Molnár, G., Székely, B. és Pásztor, Sz., 2006: MODIS-adatvételezés az ELTE műholdvevő állomásán. *Geodézia és Kartográfia* 58, 11-14.
- Voogt, J. A. and Oke, T. R., 2003: Thermal remote sensing of urban climate. *Remote Sensing of Environment* 86, 370-384.

LÉGKÖRI SZENNYEZŐANYAG TERJEDÉS ÉS TERHELÉS MODELLEZÉSE KÜLÖNBÖZŐ SKÁLÁN

Mészáros Róbert(1), Lagzi István (1,2), Komjáthy Eszter (1), Leelőssy Ádám (1)

(1) ELTE Meteorológiai Tanszék
(2) Northwestern University, Evanston, USA
e-mail: mrobi@nimbus.elte.hu

Bevezetés

Az elmúlt évtized során az ELTE Meteorológiai Tanszéken létrehoztunk, és folyamatosan fejlesztünk egy szennyezőanyagok terjedésének és az általuk okozott környezeti terhelésnek a becslésére alkalmas modellcsomagot. A TREX modellel több, különböző szimulációt végeztünk lokális és regionális skálán. Ez alapvetően kétfajta vizsgálatot jelent: egyrészt eseti kibocsátások során a légkörbe jutó szennyeződések diszperziójának becslését, másrészt a folyamatos környezeti terhelés számítását (1.táblázat).

1. táblázat: Szennyezőanyagok légköri terjedésének és ülepedésének becslésére végzett modellszámítások összefoglalása

	Modell	Vizsgált terület	Meteorológiai mezők	Bemenő adatok						Eredmény	Részletek
				talaj	felszín	növény	légkör*	emisszió	immisszió		
ESETI KIBOCSÁTÁS	TREX-Euler	Közép-Európa	ALADIN modell	✓	✓	✓	✓	✓	✓	■Esettanulmányok ■Érzékenységi vizsgálat	Mészáros <i>et al.</i> , 2010
	TREX-Lagrange	100×100 km	ALADIN modell Pontbeli mérések	✓	✓	✓	✓	✓	✓	■Statisztikai elemzések ■Operatív futtatás ■Érzékenységi vizsgálat	Lagzi <i>et al.</i> , 2008 Molnár <i>et al.</i> , 2010
	A2C	Lokális skála	Pontbeli mérések	✓	✓	✓	✓	✓	✓	■Tesztfuttatások, ■Érzékenységi vizsgálat	Leelőssy, 2010
FOLYAMTOS KIBOCSÁTÁS	TREX-O3 üledés	Magyarország	ALADIN modell	✓	✓	✓	✓	✓	✓	■Tér- és időbeli eloszlás ■Érzékenységi vizsgálat	Czender <i>et al.</i> , 2009 Szinyei <i>et al.</i> , 2007 Mészáros <i>et al.</i> , 2009a,b
	TREX-O3 terhelés			✓	✓	✓	✓	✓	✓	■Kémiai modul fejl. ■Tesztfuttatások	Antal <i>et al.</i> , 2007 Juhász <i>et al.</i> , 2006 Mészáros <i>et al.</i> , 2006
	TREX-O3 üledés	Európa, Magyarország	Éghajlati modell outputok	✓	✓	✓	✓	✓	✓	■Tér- és időbeli eloszlás	Komjáthy <i>et al.</i> , 2010

*a bemenő meteorológiai adatokon felüli légköri (pl. sugárzási) paraméterek

A feltételezett baleseti kibocsátások során, pontforrásból a légkörbe jutó szennyezők terjedésének és ülepedésének szimulálását a Paksi Atomerőmű esetére végeztük. A különböző skálán végzett futtatások mellett statisztikai vizsgálatok során azt is elemeztük, hogy a Kárpát-medencére jellemző időjárási helyzetek hogyan befolyásolják a szennyezőanyag diszperziót egy esetleges baleset során. Egy baleseti kibocsátás után a modellszámításnak gyorsnak és pontosnak kell lennie. Ennek érdekében különböző, a számítások gyorsítását eredményező eljárást, technikai eszközt is kipróbáltunk.

A másik nagy témakör keretében a felszínközeli ózon ülepedését vizsgáltuk. Részletes (néhány km) térbeli felbontásban meghatároztuk az ózon koncentrációjának és ülepedésének térbeli eloszlását Magyarország területére, illetve külön-külön egyes növényállományokra is különböző időszakokra. Érzékenységi vizsgálatok során elemeztük a modellszámításokhoz szükséges talaj- felszín- növényzet- és légköri paraméterek szerepét. Éghajlati adatbázisok

felhasználásával vizsgáljuk az ózon ülepedés és klímaváltozás várható következményeként megváltozó légköri és környezeti tényezők közti összefüggéseket.

Az alábbiakban a témák rövid áttekintése után bemutatjuk az eddig végzett feladatokat és eredményeket, majd vázoljuk a további fejlesztési lehetőségeket, konkrét kutatási célokat, a hallgatók kutatásba való bekapcsolódásának lehetőségeit.

Szennyezőanyag kibocsátások hatásainak elemzése

A numerikus áramlásmodellezés egyik legösszetettebb feladata a szennyezőanyag-terjedés szimulációja. A probléma méretskálájától és a konkrét feladattól függően különböző szemléletmódokat alkalmaznak.

Az ún. gaussi modellek a legrégebbi, de sok esetben még ma is jól használható megközelítést alkalmazzák. A szennyezőanyag koncentrációjának függőlegesen és szélirányra merőlegesen a forrás tengelyétől számított Gauss-eloszlását feltételezik, amelyhez hozzáadódik a szél irányába történő transzport. A terjedés mértékét – az eloszlás szélességét – a légköri stabilitás, illetve a kibocsátástól eltelt idő alapján számítják. Ez egyszerű matematikai kezelést tesz lehetővé, de csak álló forrás esetén, stacionárius és homogén áramlásban, valamint lassan ülepedő szennyezőanyagra ad jó közelítést. A modell egyszerűsége ellenére képes figyelembe venni a felszínről és a planetáris határrétegről való visszaverődést és egyszerű kémiai reakciókat is.

Az Euler-féle szemléletmód egy adott ponton (mérőállomás vagy modellbeli rácspont) figyeli a légköri állapotváltozók változását, és ezek összesítéséből az áramlási mező pillanatnyi képéről ad információt. Valamely mennyiség teljes időbeli megváltozását Euler-féle megközelítésben a lokális időbeli megváltozás mellett az x és y irányú advekciónak, illetve a z irányú konvekciónak határozza meg. Egyszerűbb matematikai kezelhetősége és a mérési, előrejelzési pontok helyhez kötöttsége miatt a legtöbb meteorológiai modellben ezt a szemléletmódot alkalmazzák. Az euleri terjedési modellek a terjedési egyenlet numerikus megoldásán alapulnak. A módszer előnye, hogy az euleri szemlélet miatt könnyen illeszthető az általános áramlási modellekbe, továbbá a kémiai reakciók paraméterezhetők benne. Széleskörűen alkalmazzák műszaki célú ún. CFD (Computational Fluid Dynamics) szoftverekben, vagy levegőkémiai feladatok megoldásában.

A lagrange-i modellek egyes szennyezőanyag-csomagok trajektóriáját számítják. Az áramvonalmenti mozgáson felül a sűrűségkülönbségből adódó felhajtóerő és a turbulens sebesség-ingadozás miatti korrekciókat is figyelembe veszik, utóbbit sztochasztikus módszerekkel. Az egyes csomagokban általában a hagyományos terjedési modellekhez hasonlóan gaussi koncentráció-eloszlást feltételeznek, amelyek összegzéséből állítják elő a koncentrációmezőt. Matematikailag ez bonyolultabb feladat az euleri szemléletmódban felírt problémáknál, és a valós mérésekhez való illesztése is nehezebb. Alkalmazási területe elsősorban a légköri transzportfolyamatok modellezése, ahol a szennyezőanyag-trajektóriák ismeretével, azok statisztikus elemzéséből adhatunk kielégítő közelítést a koncentrációmező változására. A módszer jól használható bonyolult felszíni és áramlási viszonyok mellett is, míg stacionárius és homogén esetben visszaadja a gaussi modellek megoldásait.

Becslések különböző skálán

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 komplex szemléletre van szükség. Ehhez a kor legkorszerűbb természettudományi kutatási eredményeit és műszaki vívmányait kell hasznosítani.

A Paksi Atomerőműből történő feltételezett baleseti kibocsátások modellezéséhez kifejlesztettünk egy háromdimenziós *Euler-típusú* terjedési modellt, amely alkalmas különböző szennyezőanyagok terjedésének és kémiai reakcióinak leírására. E modellben a Kárpát-medence térségét egy rácshálózattal lefedve a terjedés leírásához használt légköri transzportegyenletekben az advekciónak, a függőleges és vízszintes diffúzió, az ülepedés, a kémiai reakció és az emisszió hatását vettük figyelembe. A bemenő meteorológiai adatokat az Országos Meteorológiai Szolgálatnál operatíván futtatott *ALADIN* előrejelzési modell 0–48 órás 6 óránkénti előrejelzései szolgáltatták. Különböző időjárási helyzetekre végzett esettanulmányok és részletes érzékenységi vizsgálatok mellett egy hosszabb időszakra (1 év) folyamatosan végeztünk szimulációkat (az év minden egyes napján egy baleseti kibocsátást feltételezve és a diszperziót szimulálva), ami már statisztikai elemzéseket is lehetővé tett. Ennek keretében a Péczely-féle makroszinoptikus helyzetek szerint rendszereztük a modellfuttatásokat. Az eredmények alapján átlagos koncentráció és kiülepedett anyagmennyiség mezőket számoltunk, illetve azt vizsgáltuk, hogy egy esetleges baleset következtében hogyan alakulna néhány nagyváros sugárterhelése. E módszernek köszönhetően lehetőség nyílik arra, hogy már a nagy pontosságú baleseti modellek lefuttatása előtt is egy elsődleges közelítést adhassunk a szennyeződés várható terjedésére és a baleset következményeire. Ez természetesen nem helyettesíti a dinamikus modelleket, de hasznos segítség lehet olyan szituációban, mikor minden pillanat számít a lakosság védelme érdekében meghozott döntéseknél.

Az erőmű térségére elkészítettünk egy háromdimenziós *Lagrange-típusú* terjedési modellt is, amely alkalmas különböző szennyezőanyagok terjedésének a leírására és képes gyorsan és pontosan előrejelezni a légszennyezési és dózis szinteket lokális skálán. A modellel a Paksi Atomerőmű területén történő baleset során a légkörbe kerülő radioaktív izotópok kibocsátását, terjedését, bomlását és ülepedését szimuláljuk. A programmal egyéb származtatott mennyiség (aktivitás-koncentráció és különböző dózisok) is számíthatók. A modell két különböző tartományon számol: az egyik a Paksi Atomerőmű 30 km-es körzete, a másik az erőmű közvetlen (10×10 km-es) 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.

A fenti vizsgálatokon túl felmerült az igény az atomerőmű üzemi területére végzett szennyezőanyag terjedés modellezésére is. Ehhez első lépésként az A2C modell CFD

szimulációra alkalmas próbaverziójával készítettünk szimulációkat a Paksi Atomerőmű környezetére, az épületek egyszerűsített geometriáját beépítve, lokális skálán. Feltételezett baleseteket követően vizsgáltuk a szennyezőanyag térbeli eloszlását a szélirány függvényében. Az elsődleges eredmények hozzájárulnak az egyes modellparaméterek érzékenységének vizsgálatához, és a részletesebb, finomabb felbontású modellszimulációk fejlesztéséhez is.

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. Eddig elsősorban az ózon felszínközeli koncentrációjának és száraz ülepedésének eloszlását becsültük. Korábbi kutatások során végzett vizsgálatok azt mutatták, hogy Közép-Európa és benne Magyarország az egyik legnagyobb troposzférikus ózonterhelésű terület Európában. Az 1990-től, K-pusztán mért ózonkoncentráció adatsor feldolgozásának eredményei szintén alátámasztották, hogy a nemzetközi megszorító intézkedések ellenére sem történt jelentős változás az ózonkoncentráció trendjében. A mérőhelyen még mindig változatlanul magas értékeket regisztrálnak, és a határérték túllépések is gyakoriak. Ez nemcsak az emberi egészségre, hanem a természetes és a mezőgazdasági növényzetre is ártalmas. A magas ózonkoncentráció gátolja a növények fejlődését, gyengíti ellenálló képességüket, ezáltal terméscsökkenést okoz. Feltételezték, hogy az ózonkoncentráció csak egy küszöbérték felett károsítja a növényeket, és hogy a növénykárosodások összeadódnak. Az ózon károsító hatásának egyik lehetséges jellemzőjeként definiálták az AOT (Accumulated exposure Over a Threshold) értékeket, melyek a 40 ppb (AOT40), illetve 60 ppb (AOT60) feletti integrált ózommennyiséget jelentik. Az utóbbi évek kutatásai azonban rámutattak, hogy ezekkel az integrált mennyiségekkel nem lehet egyértelműen jellemezni az ózonnak a növényekre gyakorolt károsító hatását, mivel az akkor érvényesül, ha a nyomgáz kapcsolatba is lép a felfogó közeggel. Ezt a tényleges terhelést sokkal pontosabban jellemzik az ózon fluxusa és az utóbbi években bevezetett különböző fluxus alapú mérőszámok. Ezek a mennyiségek az ún. ülepedési sebességen keresztül adhatók meg, ami egyaránt jelentősen függ az időjárási helyzettől, a növény fajtájától és fiziológiai tulajdonságaitól, a talajnedvességtől és a fizikai talajfésüléstől. Meghatározása bonyolult, számos bemenő adatot igényel, de segítségével pontosabb kép adható a környezeti terhelésről.

Vizsgálataink során meghatároztuk a különböző koncentráció- és fluxus alapú mérőszámokkal jellemzett terhelés mértékét is különböző vegetációs periódusokra. 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. Az eredmények során tapasztaltuk, 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. Az elemzések és részletes érzékenységi vizsgálatok azt is alátámasztották, hogy hazánk területén a felszín-légkör közti kölcsönhatásokban kiemelt szerepet játszik a talajnedvesség. Emiatt a modell legújabb verziójában finomítottuk a talajnedvesség-becslő rutint. A továbbiakban egyes almodulok finomítást, valamint más szennyezőanyagok koncentrációjának és ülepedésének becslését tervezzük a modellel.

Becslések éghajlati skálán

A légköri szennyezőanyagok kibocsátására vonatkozó hosszú távú előrejelzések alapján az ózon ún. prekursor vegyületeinek (nitrogén-oxidok, szén-monoxid, illékony szerves vegyületek) értékeiben is jelentős változások várhatók. Ez jelentősen befolyásolja az ózon koncentrációjának és ezen keresztül az ülepedésének (a felszín érő tényleges terhelésnek) a tér- és időbeli eloszlását. A meteorológiai állapothatározók (hőmérséklet, csapadék, légnedvesség, talajnedvesség) következő évtizedekre prognosztizált változásai – közvetlenül és közvetve – szintén hatnak a felszín és légkör között végbemenő kölcsönhatásokra, így az ózon ülepedésére is. A globális klímaváltozás következményeként ugyanakkor az is valószínűsíthető, hogy megváltoznak a felszínre és növényzetre jellemző időfüggő paraméterek (pl. levélfelületi-index, albedó, stb.) értékei, valamint a növények fokozatosan alkalmazkodnak az eltérő éghajlati körülményekhez, esetleg új állományok jelennek meg. Az így megváltozott fiziológiai tulajdonságok révén más lesz a növények ózonnal szembeni ellenálló képessége. A fentiekben vázolt összetett, nemlineáris folyamatok eredőjeként a növényzetet károsító ózonülepedés mértékében bekövetkező változások befolyásolják a felszín és a légkör közötti szén-dioxid forgalmat, ezáltal visszahatnak a klímaváltozásra.

E kutatás alapvető célja ezen bonyolult és sok bizonytalanságot hordozó mechanizmusok mértékének és hazai következményeinek feltárása, ennek érdekében a TREX terjedési-ülepedési modell fejlesztése, adaptálása és alkalmazása a konkrét feladatra. A modell szimulációk lehetőséget nyújtanak az ózon koncentráció és a különböző növényállományokat érő ózonterhelés és hatásainak becslésére, hosszabb időszakra, Magyarország területére, éghajlati szcenáriók alapján.

Távlati tervek

A szennyezőanyag terjedés és környezeti terhelés vizsgálata során folyamatosan merülnek fel újabb kutatási irányok és konkrét felhasználói igények a fejlesztésre, illetve új modulok kidolgozására. Az egyes részfeladatok elemzése és kidolgozása részben már folyamatban van, de több esetben lehetséges további hallgatók részvétele a kutatási munkában. A következő években az alábbi tervezett feladatokba várjuk hallgatók bekapcsolódását:

- Szennyezőanyag terhelés modellezése során alkalmazott paraméterek (pl. levélfelületi index, különböző bemenő paraméterek) tér- és időbeli felbontásának pontosítása mérések és modellek által,
- Különböző nyomgázok felszín-légkör közötti kicserélődésének modellezése,
- Légköri terjedési modellek futtatása különböző tér- és időskálán, az eredmények értékelése,
- Folyamatos kibocsátás során a légkörbe jutó szennyezőanyagok terjedésének, ülepedésének becslése és előrejelzése,
- Baleseti kibocsátási modell fejlesztése, alkalmazása konkrét igényekre,
- Szinoptikus klimatológiai vizsgálatok (makrocirkulációs időjárási helyzetek hatása a nyomgázok terjedésére és ülepedésére),
- Érzékenységi vizsgálatok.

Köszönetnyilvánítás: A szerzők köszönetet mondanak a kutatási munkában való aktív részvételért Antal Krisztina, Czender Csilla, Juhász Ágota, Kurunczi Rita, Molnár Ferenc, Richter Péter, Szakály Tamás, Szinyei Dalma, Szűcs Mihály, Üveges Zoltán és Vincze Csilla volt és jelenlegi hallgatóknak. A talajnedvesség modellezése során nyújtott segítségért és hasznos tanácsaiért külön köszönet Ács Ferencnek (ELTE Meteorológiai Tanszék). A

kutatásokhoz szükséges ALADIN meteorológiai mezőket Horányi András és Kullmann László (OMSZ) bocsátották rendelkezésünkre. Az éghajlati adatbázisok közül a PRUDENCE projekt eredményeiből Gelybó Györgyi (ELTE Meteorológiai Tanszék) állította elő a modell számára megfelelő formátumú adatbázist. Egyéb éghajlati adatbázisokért köszönet Pongrácz Ritának és Torma Csabának. A kutatásokat az OTKA K68253, K81933 és K81975, az OMFB-00786/2008 (JAP-06/2006) kutatási pályázatok, a SEE-GRID SCI RI-211338 EU 7 Keretprogram, valamint a 4500130517. sz. Kutatás-fejlesztési szerződés támogatták. A projekt az Európai Unió támogatásával és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg (TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR).

Hivatkozások

- Antal, K., Lagzi, I., Mészáros, R., Vincze, Cs., 2007: *Modeling of photochemical oxidant level in Central-Europe*, *Geophys. Res. Abs.*, 9, 00879.
- Czender, Cs., Komjáthy, E., Mészáros, R. and Lagzi, I., 2009: Spatial and temporal variability of ozone deposition. *Advances in Science and Research*, 3, 5–7.
- Juhász Á., Mészáros R., Szinyei D., Lagzi I., Horváth L. 2006: Az ózonterhelés becslése modellszámítások alapján. *Légekör 51, Különszám*, 29–31.
- Komjáthy, E., Gelybó, Gy., Lagzi, I and Mészáros, R., 2010: Estimation of ozone dry deposition over Europe for the period 2071–2100. *European Geosciences Union, General Assembly 2010*, Vienna, EGU2010-623.
- Lagzi, I., Mészáros, R., Molnár, F., Szakály, T., Szűcs, M., Kovács, T. and Nényei, Á., 2008: Parallelization and application of an Eulerian and Lagrangian models at the Paks Nuclear Power Plant. *Abstract Book of 8th Annual Meeting of the European Meteorological Society and 7th ECAC*, Amsterdam, EMS2008-A-00556.
- Leelőssy Á., 2010: Lokális szennyezőanyag terjedés modellezése. *Szakedolgozat*. ELTE Meteorológiai Tanszék
- 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*, 3–4. 365–377.
- Mészáros, R., Vincze, Cs. and Lagzi, I., 2010: Simulation of accidental release using a coupled transport (TRES) and numerical weather prediction (ALADIN) model. *Időjárás (Journal of the Hungarian Meteorological Service) 114*, 1–2, 101–120.
- Mészáros, R., Zsély, I.Gy., Szinyei, D., Vincze, Cs. and Lagzi, I., 2009: *Sensitivity analysis of an ozone deposition model*. *Atmospheric Environment* 43, 663–672.
- Mészáros, R., Szinyei, D., Vincze, Cs., Lagzi, I., Turányi, T., Haszpra, L., Tomlin A.S., 2009: Effect of the soil wetness state on the stomatal ozone fluxes over Hungary. *Int. J. Environment and Pollution* 36, 180–194.
- Molnár, F. Jr., Szakály, T., Mészáros, R. and Lagzi, I., 2010: Air pollution modelling using a Graphics Processing Unit with CUDA. *Computer Physics Communications* 181, 105–112.
- Szinyei D., Czender, Cs., Lagzi I., Mészáros R., Vincze Cs. and Zsély I. Gy., 2007: Uncertainty analysis of a dry deposition model. *7th Annual Meeting of the European Meteorological Society and 8th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM)*, San Lorenzo de El Escorial, EMS2007-A-00235

A SZINOPTIKUS IDŐJÁRÁS-ANALÍZIS ÉS ELŐREJELZÉS MÓDSZEREINEK KORSZERŰSÍTÉSE

Reisz Andrej, Gaál Áron

Országos Meteorológiai Szolgálat, 1024 Budapest Kitaibel Pál utca 1.

e-mail: reisz.a@met.hu, gaal.a@met.hu

Bevezetés

A szinoptikus időjárás-analízis és előrejelzés alapja a rendelkezésre álló meteorológiai információk **együttes elemzése**, maga a szó görög eredete, a „**szünoptikosz**” is együtt látást jelent. A hagyományos szinoptikus módszerek az 1910–1930-as években bontakoztak ki, elsősorban az ún. „bergeni iskola” vezető tudósai, de számos más kiváló személyiség munkássága nyomán. Többek között ebben az iskolában született meg a mai napig érvényes Bjerknes-féle ciklonmodell, illetve polárfönt-elmélet, amely a mérsékeltövi ciklonok szerkezetét és fejlődési fázisait leíró kezdetleges, de időtálló, ún. **konceptuális modell**. Itt láttak napvilágot a különböző időjárási frontok elvi sémái is, amelyek a mai meteorológiai tankönyvekben szinte változatlan formában jelennek meg. A már említett szinoptikus módszerek hagyományos értelmezésének lényege továbbra is az, hogy minden, a jelen és a közelmúltbeli időjárásról rendelkezésre álló információ (földfelszíni és magaslégköri mérések, megfigyelések szinoptikus térképei, távérzékelési eszközök (radarok, műholdak) széles skálájú mérési produktumai) szintézisével, a múltbeli hasonló időjárási helyzetekkel való analógiákat is kihasználva értelmezzük az aktuális időjárási helyzetet (**ANALÍZIS**), majd ebből kiindulva **becslést** készítsünk a jövőbeli állapotokra, különböző időtávra vonatkozóan (**ELŐREJELZÉS**).

A „becslés” szót nem hiába emeltük ki, hiszen fontos szerepe van, különösen a laikusok számára az időjárás-előrejelzés korlátainak, lehetőségeinek megértésekor. Ebből rögtön kiderül, hogy maguk az előrejelzések soha nem jelentették és valószínű, hogy nem is fogják jelenteni a légkör állapotának 100 %-os ismeretét akár 1 óra, vagy akár egy hét múlva, hiszen a jelenlegi állapotot sem lehet tökéletesen leírni egyrészt a mérési hibák, másrészt a légkör térbeli és időbeli reprezentációjának túlságosan diszkrétizált volta miatt. A soha nem tökéletes, de gazdaságilag és társadalmilag egyre hasznosabb célokat szolgáló időjárás-előrejelzések alapelvét Vilhelm Bjerknes fogalmazta meg 1904-ben. Ezek szerint, ha kellően ismerjük a légkör kiindulási állapotát, akkor az időjárási folyamatoknak a légkördinamika alapvető törvényei matematikai formuláinak segítségével ún. **számszerű vagy numerikus előrejelzést** készíthetünk a légkör jövőbeli állapotára vonatkozóan. Ezt a forradalmi gondolatot követően, majd fél évszázados globális méretű kutató-fejlesztő munka eredményeképpen 1950-re Charney, Fjortoft és Neumann által Bjerknes elve gyakorlati megvalósítást nyert az első sikeres számszerű időjárás-előrejelzés végrehajtása révén, amely az 500 hPa-os nyomási felület áramlási viszonyaira (örvényességi mező barotrop körülmények között) vonatkozott. Az elmúlt 60 év ezt követően a numerikus prognosztika folyamatos, gyors ütemű fejlődését hozta, amelyet nagyban elősegített a legfontosabb meteorológiai segédeszköz, a számítógép elterjedése és „számoló” kapacitásának ugrásszerű növekedése.

A szinoptika és a számszerű előrejelzés természetesen kölcsönhatásba lépett egymással, hiszen utóbbi éppen a hagyományosan használt módszerek segítségével, modernizálására fejlődött ki. A szinoptika ezáltal jelentősen átalakult az elmúlt pár évtized alatt, hiszen egyre nagyobb jelentőséget tulajdonítanak az **időjárás-előrejelző numerikus modelleknek**. Hangsúlyozni kell azonban, hogy a Meteorológiai Világszervezet által évtizedek óta folyó vizsgálat szerint a számszerű előrejelzések és a szinoptikusok együttesével, tehát a modelleredmények és egyéb információk ember által elvégzett szintézisével (ez a modern

szinoptika alapelve) lényegesen jobb minőségű prognózisokat lehet készíteni, mint akár az egyik, akár a másik úton, egymástól függetlenül.

A számítógépes előrejelzések megjelenése előtt az ember által hozzáadott érték nem lehetett kérdés, hiszen egyedül a rendelkezésre álló légkördinamikai-fizikai tudás, tapasztalat garantálhatta az akkoriban prognózist készítő szakemberek munkájának színvonalas végrehajtását. Ez azt jelenti, hogy hagyományos értelemben is a szinoptika és a dinamika (dinamikus meteorológia) soha nem különült el egymástól, a szinoptikus módszereket mindig is **szinoptiko-dinamikus módszereknek** kell tekinteni. Ezek birtokában a kvalitatív megállapítások mellett számos légkördinamikai megfontolást, kvantitatív elemzést el lehet végezni, amelyet egyre többször **konceptuális időjárás-modellezésnek** nevezünk. Ezek olyan elvi sémák, amelyek a légköri képződmények, mozgásrendszerek (Rossby-hullámok, ciklonok, frontok, mezoléptékű időjárási rendszerek) fejlődésének szerkezeti sajátosságait hivatottak leírni, ma már kihasználva a fejlett térinformatikai hátteret is. Ide sorolható a már korábban említett polárfront-elmélet vagy a Bjerknes-féle ciklonmodell is, de hasonlóan az **Eliassen-Palmén-féle kvázigeosztrofikus ciklonelmélet** is, amely például egy nálunk még alig közzismert értékelő elméletnek, a **Q-vektor elméletnek** a kiindulási alapját képezi.

A hazai mindennapi előrejelző munkában, véleményünk szerint lemaradás van a dinamikus szemléletű prognózis-készítést illetően, az előrejelző szakemberek többsége túlságosan „bízunk” a modellekben függetlenül attól, hogy megértik-e a modell által számított mezők fizikai-dinamikai okait. Ehhez természetesen rendszeresen és közérthető formában gyarapítani, illetve frissíteni kellene az előrejelző szakemberek elméleti ismerettárát, és meg kell jegyeznünk azt is, hogy a korábbihoz képest jóval több feldolgozandó információ, viszont esetenként kevesebb idő áll rendelkezésre a szinoptikus számára. Emiatt, jobb híján kénytelen pusztán a különböző modellek közti eltéréseket mérlegelni és abból valamilyen statisztikai-empirikus következtetést levonni a prognózis elkészítése érdekében.

A címben szereplő korszerűsítés célja az, hogy olyan elemzési-következtetési eljárásokat (új paraméter-mezők használata, új dinamikai alapú helyzetértékelési módszerek) vezessünk be az operatív előrejelző gyakorlatba, amelyek egyrészt nemzetközi viszonylatban is hatékonyak bizonyultak, másrészt a Kárpát-medence térségére is, mint sajátos szinoptikus-klimatológiával rendelkező földrajzi régióra is használhatók legyenek a légköri folyamatok korrektebb értelmezése és ezek alapján, reményeink szerint pontosabb előrejelzések készítése céljából.

Diagnosztikus mennyiségek, konceptuális modellek

A korszerű szinoptikus analízis a rutin talaj és topográfiai térképek, vertikális metszetek, valamint egyéb, többnyire távérzékelési eszközök mérési produktumainak használatán kívül magába foglalja, illetve kiegészül a légköri objektumok fejlődésének dinamikai folyamatait jellemző fizikai mennyiségek (örvényességi és hőmérsékleti advekciónak, vergencia, potenciális örvényesség, Q-vektor stb.) térképes megjelenítésével Bodolainé (2008). Ezeknek a mennyiségeknek egy része közvetlenül nem áll rendelkezésre, de az ún. **alap-előrejelzési mezőkből** származtatható.

A szinoptikus helyzet megértésének a **dinamikai diagnosztikán** kívül fontos eszköze az angol Browning iskola által kifejlesztett és kezdeményezett **konceptuális modellek** alkalmazása, amelyek tulajdonképpen a mennyiségileg meghatározott dinamikai folyamatokat és struktúrákat foglalják össze **szemléletes, elvi modellekbe**, elősegítve ezzel az adott időjárási képződmény (**mozgásrendszer**) fejlődése szempontjából fontos tényezők feltárását. Ilyen modellek szemléltetik például a ciklonokon belüli meleg-nedves és hideg szállítószalagokat, frontokat, a felső troposzférikus, illetve alsó sztratoszférikus száraz behatolásokat vagy kisebb skálán a különböző mezoléptékű konvektív rendszereket stb.

Ezek után röviden ismertetünk néhány fontos, és további kutatásokat, illetve elsősorban validációs vizsgálatokat igénylő módszert, végül bemutatunk egy közismert konceptuális modellt.

Q-vektor diagnosztika

Az Eliassen-Palmén-féle kvázi geosztrofikus ciklonelmélet két fő összefüggése, egy prognosztikai egyenlet a Φ geopotenciál mező tendenciájára vonatkozóan, illetve egy **diagnosztikus egyenlet az izobárikus nagytérségű függőleges sebességmező, az ω meghatározására** (1).

$$\left(\nabla^2 + \frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) \omega = \underbrace{\frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \left[\bar{v}_\zeta \nabla \left(\frac{1}{f_0} \nabla^2 \Phi + f \right) \right]}_C - \underbrace{\frac{1}{\sigma_1(p)} \nabla^2 \left(\bar{v}_\zeta \nabla \frac{\partial \Phi}{\partial p} \right)}_D. \quad (1)$$

A C tag az ún. **differentiált örvényességi advekción** vagy örvényesség-nyíródási tag, a D pedig a **horizontális hőmérsékleti advekción** fejezi ki. Az egyenlet értelmében a geopotenciál mező alapján objektíven, dinamikailag megalapozott módon lehet megbecsülni a függőleges sebesség előjelét, illetve mértékét a nagyméretű mérsékeltövi mozgásrendszerek esetén. Az operatív szinoptikus gyakorlatban való alkalmazása már az 1970-es években elkezdődött (Kurz, 1977), de bizonyos hátrányos matematikai tulajdonságai miatt egy előnyösebb, ún. **Q-vektor formalizmus** alakult ki Hoskins et al. (1978; 1980; 1990).

$$(\sigma \nabla^2 + f_0^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2}) \omega = -2 \nabla \cdot \mathbf{Q}. \quad (2)$$

(2) nem más, mint a fenti ω -egyenlet alternatív formája izobárikus rendszerben, ahol

$$\mathbf{Q} = \left(\frac{\partial \mathbf{v}_g}{\partial x} \cdot \nabla_h \Phi_p, \frac{\partial \mathbf{v}_g}{\partial y} \cdot \nabla_h \Phi_p \right). \quad (3)$$

Tehát a Q-vektor nem más, mint a geopotenciál-mező horizontális gradiensének változása a geosztrofikus szél nagyságának és irányának megfelelően Sarkadi (2010). A légkör adott szintjén, ezek szerint a vertikális sebességi mezőt a **Q-vektor divergenciája** alapján becsülhetjük meg, méghozzá konvergencia esetén fel-, divergencia esetén leáramlásra következtethetünk. Hoskins és Sanders (1990) később grafikus eljárást javasoltak a Q-vektor mező meghatározására:

$$\mathbf{Q} = - \frac{R}{p} \left| \frac{\partial T}{\partial y} \right| \mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{v}_g}{\partial x}. \quad (4)$$

(4) alapján a Q-vektort megkapjuk, ha az izotermák mentén haladva megállapítjuk a geosztrofikus szélvektor változását. Ezt a vektort az óramutató járásával megegyező irányba, 90°-kal elforgatva megkapjuk a Q-vektor irányát, amelyből következtetni lehet a vergencia előjelére. Nagysága pedig arányos a vektor-változás mértékével, amely a hőmérsékleti gradiens növekedésével erősödik Bodolainé (2008), Sarkadi (2010).

A Q-vektor és a frontok kapcsolata Kurz egyik 1990-es tanulmányában található meg, illetve Hoskins és Pedder (1980) is foglalkoztak a frontra merőleges síkban fellépő, fronttal párhuzamos tengelyű, transzverzális cirkuláció dinamikai-matematikai leírásával

Potenciális örvényesség (PV) diagnosztikai felhasználása

A potenciális örvényesség fogalmát Rossby 1940-ben vezette be egyik cikkében, melynek levezetése minden dinamikus meteorológiai tankönyvben megtalálható *Thorpe and Volkert* (1997). A legnagyobb jelentőségre az Ertel által 1942-ben bevezetett **izentropikus potenciális örvényesség (IPV)** fogalom tett szert, és ennek használata ma szinte kizárólagos *Hoskins*, *McIntire*, *Robertson* (1985), *Sepsi* (2010).

$$IPV = -g(f + \zeta_0) \frac{\partial \Theta}{\partial p}. \quad (5)$$

Az IPV (5) szerint egy adott Θ **izentrop felületen** számított **abszolút örvényesség** és a **statikus stabilitás** szorzata, amely **adiabatikus folyamatok során konzervatív mennyiség**. Az IPV növekedés adott izentrop felületen az izentrop felületek közötti réteg megnyúlását vagy fordítva az örvényesség csökkenése a rétegvastagság csökkenését okozza *Bodolainé* (2008). A szinoptikus gyakorlatban olyan izentrop felületek PV mezejét szokták elemezni, amelyek átmetszik a poláris futóáramlást (kb. 315 K télen és 330 K nyáron). Az IPV az alsó troposzférában az egyenlítőn 0, közepes szélességeken ~0,3, viszont a tropopauzán ugrik, az alsó sztratoszférában már ≥ 4 . Van egy szignifikáns felület, az ún. **IPV=2 felület** vagy más néven **dinamikus tropopauza**. Ezeken a polárfront és a kialakuló ciklonok, valamint azok frontális struktúrája a tropopauza szingularitásokkal, tehát a futóáramlás-magokkal, tropopauza áthajlásokkal és tölcsérekkel, felső szinti teknőkkel együtt különösen jól kirajzolódnak, fejlődésük jól követhető *Thorpe* (1997).

Korszerű frontelméletek

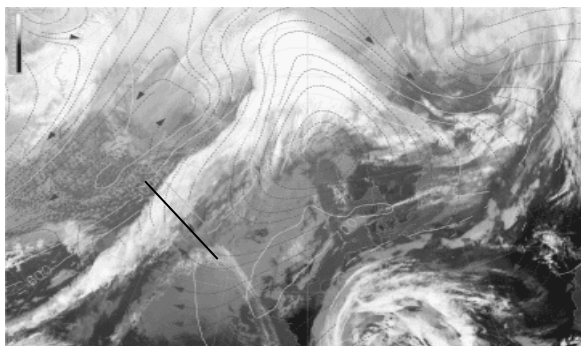
A ciklonok és anticiklonok kvázi-geosztrofikus elméletéhez hasonlóan a frontoknak is kialakult egy speciális dinamikus meteorológiai elmélete, amely szintén a nagyságrendi analízisen alapul. A frontok ugyanis olyan képződmények (mozgásrendszerek), amelyeknek a hosszirányú kiterjedése akár 10–100-szorosan is felülmúlja a keresztirányú kiterjedést. Ezen a tényen alapul a **szemi-geosztrofikus elmélet**, amelynek számos matematikai előnye is van *Hoskins és Bretherton* (1972), *Hoskins* (1975). Itt érdemes megemlíteni, hogy a frontális cirkuláció analízisét és fejlődését hivatott leírni a Sawyer–Eliassen-féle diagnosztikai egyenlet, amely Q-vektor formalizmust használ és kiválóan alkalmas az ageosztrofikus, tehát részben diabatus eredetű feláramlások elemzésére is.

Konceptuális modellek

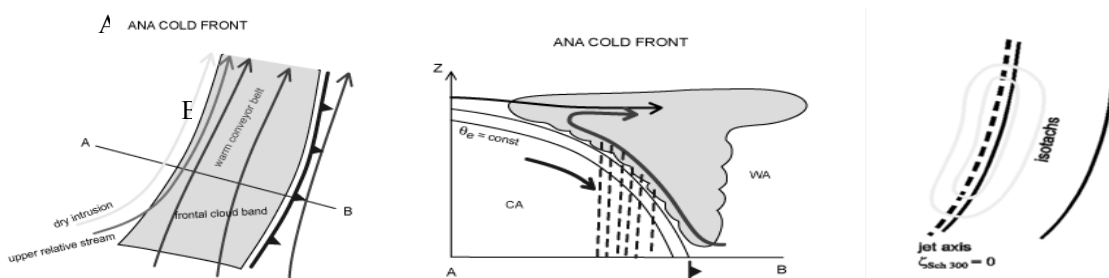
A szinoptikus analízisek és előrejelzések készítésének legvégső fázisában, az **ok-okozati összefüggések** feltárásakor mindig törekedni kell arra, hogy a légkör pillanatnyi és jövőbeli állapota **jól specifikált időjárási képződményekhez** (mozgásrendszerekhez) kötődjön. A nagy kiterjedésű, jól ismert képződményeken, a Rossby-hullámokon, illetve az abba beágyazódó ciklonokon, anticiklonokon kívül azonban egyéb, többek között a felhő- és csapadékképződés szempontjából is meghatározó jelentőségű, kisebb skálájú, de bonyolultabb struktúrájú mozgásrendszerek a meteorológiai alap-mezőkkel nehezen beazonosíthatók. Ezekben az esetekben a szinoptikus esetenként kénytelen elfogadni a numerikus modell eredményét anélkül, hogy annak fizikai-dinamikai okát, illetve realitását mérlegelte, értékelte volna. Emiatt nem derül ki, hogy például az adott területre miért ad a modell csapadékot, vagy éppen miért nő meg adott szinten a relatív nedvesség. Éppen ezekre az esetekre célszerű megszerkeszteni olyan **elvi sémákat**, amelyek jól meghatározott, speciális légköri struktúrákat

jelenítenek meg, azok horizontális és vertikális szerkezetét (*vertikális keresztmetszetek*), geometriai sajátosságait (*alakzat, méret*) és a fejlődésük szempontjából fontos tényezőket (*alap-, illetve származtatott paraméterek (örvényesség, differenciált hőmérsékleti advekció, potenciális örvényesség stb.)*).

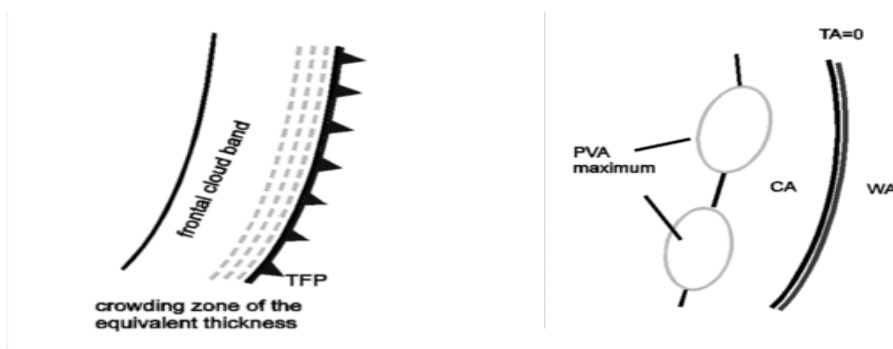
Illusztrációként tekintünk a hidegfrontok egyik típusának, az *elsőfajú hidegfrontnak (anabatikus hidegfront)* a konceptuális modelljét (forrás:ZAMG):



A bal oldali ábrán az Atlanti-óceán felett egészen Izlandig egy nagyterjedésű mérsékeltövi ciklon felhőrendszere látható a Meteosat 8 infravörös tartományában megörökítve. A fekete vonal a ciklon hullámzó frontálzónájának azon hidegfronti szakaszán keresztül húzódik, amely elsőfajú jelleget ölt és annak a következő ábrákon lévő A→B keresztmetszeit jelöli.



A felső ábrákon láthatók a front konceptuális modelljei. Bal oldalon vannak a különböző szállítószalagok, (conveyor belts), a frontális felhőzet, illetve a magassági relatív áramlás a front vonalához viszonyítva. A középső ábra már egy vertikális keresztmetszet mutat az AB szakasz mentén a vertikális síkban jellemző légáramlásokkal, például a frontfelület (Θ_e izentróp felület) mentén felsikló meleg, nedves légáramlással, amely a felhőzet és a csapadék nagy részét a frontvonal mögé „termeli ki” és ahol melegadvekció uralkodik (WA). A jobb oldali ábra azt mutatja, hogy a 300 hPa-on jellemző futóáramlás (jet) tengelye jócskán a frontvonal mögött húzódik.



Az utolsó két ábra bal oldali része az *ún. termikus frontparaméter (TFP)* izovonalait jelöli ki közvetlenül a frontvonal környezetében, ahol a legerősebb hőmérséklet-változásokat tapasztaljuk, időben és térben egyaránt. Ezzel a paraméterrel objektívebb módon meg tudjuk határozni a talajfront helyzetét. Jobb oldalon a hőmérsékleti-advekciók (WA, CA), valamint az pozitív örvényességi advekció maximuma látható. A front vonala mentén a hőmérsékleti advekció zérus (TA=0).

Összefoglalás

Rövid áttekintést nyújtottunk azokról a dinamikus-szinoptikus módszerekről, témákról, amelyek egy része nem is annyira ismeretlen, de a hazai szinoptikus gyakorlatban mégis túl szerény az alkalmazásuk. Jelenleg ugyanis, az egyre részletesebb és finomabb felbontású numerikus modellek térhódítása, valamint az esetenként túl kevés rendelkezésre álló idő miatt a prognózis készítés során praktikusabbnak tűnik a különböző modelleredmények közti különbségek statisztikus-empirikus mérlegelése, illetve a szinoptikusok sokéves tapasztalataira való hagyatkozás. A külföldi szakirodalom és gyakorlat tanulmányozása során azonban arra következtethetünk, hogy az időjárás-előrejelzések minőségének javítása, a modellek fejlesztésén túlmenően, nagyrészt a légköri képződmények fizikájának-dinamikájának kellő megértésén keresztül, az ezekre vonatkozó kutatások előmozdítása révén valósítható meg. A minőségi változás feltétele tehát az, hogy a modellek által számolt „nyers” mezőkből specifikus, jól definiált tulajdonságokkal rendelkező légköri képződményeket (mozgásrendszereket) derítsünk fel, amelynek megfelelő eszközei a már említett diagnosztikus mennyiségek, illetve konceptuális modellek lehetnek. Másrészt, ezek segítségével lehetőség van arra is, hogy többek között a műholdképeket, valamint a modellek analízis mezőit felhasználva rögtön, a diagnózis során feltárjuk a modellekben rejlő pontatlanságokat, eltéréseket is, és ezek után korrekciót hajtsunk végre a kiindulási mezőben (mezőszerkesztés).

Mindehhez további *Bodolainé-Jakus (2008)*, *Sarkadi (2010)*, *Sepsi (2010)*, illetve újabb keletű vizsgálatokat, kutatásokat kell végrehajtani annak érdekében, hogy a következő évtizedekben se valósulhasson meg az a túlzott elképzelés, mely szerint egy idő után az időjárás-előrejelzések automatikusan, emberi beavatkozás nélkül is készülhetnének.

Hivatkozások

- Bodolainé-Jakus, E.*, 2008: A szinoptikus diagnózis eszközeiről. *OMSZ Kiadvány*.
- Hoskins, B.J. and Bretherton, F.P.*, 1972: Atmospheric Frontogenesis Models: Mathematical Formulation and Solution. *J.Atmos.Sci.* 29, 11–37.
- Hoskins, B.J.*, 1975: The Geostrophic Momentum Approximation the Semi-Geostrophic Equations. *J.Atmos.Sci.* 32, 233–242.
- Hoskins, B.J. et al.* 1978: A new look at the ω -equation. *Quart.J.R.Met.Soc.* 104, 31–38.
- Hoskins, B.J. and pedder, M.A.*, 1980: The diagnosis of middle latitude synoptic development., *Quart.J.R.Met.Soc.* 106, 707–719.
- Hoskins, B.J., McIntyre, M. E. and Robertson, A. W.*, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart.J.R.Met.Soc* 111, 877–916.
- Hoskins, B.J. and Sanders, F.*, 1990: An easy method for estimation of Q-vectors from Weather maps. *Weather and Forecasting* 5, 346–353.
- Kurz, M.*, 1977: Synoptische meteorologie in: leitfaden für die Ausbildung in Deutschen Wetterdienst. 8.
- Sarkadi, N.*, 2010: A Q-vektor alkalmazása a frontogenezis leírásában. *ELTE TTK Diplomamunka*.
- Sepsi, P.*, 2010: A potenciális örvényesség alkalmazása a szinoptikus analízisben. *ELTE TTK Diplomamunka*.
- Thorpe, A. J.*, 1997: Attribution and its application to mesoscale structure associated with tropopause folds. *JCMM Internal report* 73.
- Thorpe, A. J. and Volkert, H.*, 1997: Potential Vorticity: A short history of its definitions and uses. *JCMM Internal report* 75.
- ZAMG.*, 1998: MANUAL OF SATELLITE SYNOPTIC METEOROLOGY:
<http://www.zamg.ac.at/docu/Manual/>

METEOROLÓGIAI MUNKAÁLLOMÁSOK, AVAGY TÉRINFORMATIKAI ALKALMAZÁSOK A METEOROLÓGIA SZOLGÁLATÁBAN

Kovács László

Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálat
e-mail: Kovacs.Laszlo@mhtehi.gov.hu

A meteorológia, mint tudomány fejlődését, annak dinamizálódását gyakran a számítástechnika és az informatika térnyerésével szoktuk összekapcsolni. Nem véletlenül. Hiszen a számítógépek, azok architektúrájának, processzorainak fejlődése megállíthatatlannak látszik. Amire ezek az eszközök ma még nem képesek, holnapra már megoldhatóvá válik. A számszerű időjárás-előrejelző modellek egyre finomabb részleteiben képesek „megfogni” a légköri folyamatokat, egyre pontosabb előrejelzéseikkel segítik a szakembereket feladat-orientált prognózaik elkészítésében. Mindehhez ráadásul – szintén a technikai és a technológiai fejlődésnek köszönhetően egyre több forrásból, egyre nagyobb tér- és időbeli felbontással – rengeteg (kiindulási vagy előrejelzett) adatot kell feldolgoznunk. Erre már a hagyományos eszközök – pl. kézi térképrajzolás, analízis stb. – nem alkalmasak. Ezért e területen is a számítástechnikát kellett segítségül hívni.

Kezdetben a szakemberek egy-egy feladatra koncentráltak, ahogy az igények azt megkívánták. Így készültek szinoptikus térképrajzoló alkalmazások, melyek feladata a mérési-megfigyelési adatok megadott térképvetületre történő felvitele volt. Készültek felszállási diagram megjelenítő alkalmazások is, melyek a mért adatok megjelenítésén túl gyakran – a felhasználó igényei szerint – számításokat is végeztek, ezzel is segítve az elemző munkát. A numerikus előrejelzések elterjedésével a rácsponti adatstruktúrák kezdték meg térhódításukat. A nyersadatok felvitele helyett célszerűbb megoldás terjedt el: az izovonalas ábrázolás.

A képi adatfeldolgozás területének fejlődésére nagy hatással volt a meteorológiai műholdak megjelenése, azok produktumainak az operatív munkában történő alkalmazása. A műholdak által szolgáltatott információ biztosítása eleinte képi adatátvitel formájában valósult meg, így megjelenítése is a műholdas televíziózásban megszokott eszközökkel történt. Ma már ez is – akár a radar vagy a villám-lokalizációs információ – digitális formában érkezik és számítógépek segítik a feldolgozását és megjelenítését.

A meteorológus munkája során meteorológiai mezők sokaságának együttes értelmezésével, elemzésével alakítja ki álláspontját a várható időjárással kapcsolatban. E munka hatékonyságát jelentősen növeli, ha egyedi, speciális alkalmazások helyett egy olyan térinformatikai eszköz áll a szakemberek rendelkezésére, mellyel térben és időben lehetőség van a különböző forrásból származó adatok, információk együttlátására, elemzésére. Ezek az eszközök a meteorológiai munkaállomások, melyeken lehetőség van a betöltött mezők szinkronizált időbeli léptetésére és hurokfilmek készítésére, az előrejelző által megtervezett és összeállított képi információ nyomtatására, vagy akár fájlba történő exportálására. Az így kinyert képi információ alapul szolgálhat prezentációk, tájékoztatások megtartásához, azaz a meteorológiai munkaállomás nemcsak az elemzést segítő eszköz, hanem akár prezentációs eszköz is lehet.

E publikáció célja röviden áttekinteni a meteorológiai munkaállomások főbb jellemzőit, összefoglalni az azokban általánosan alkalmazott főbb eljárásokat.

Számítástechnikai háttér

A meteorológiai munkaállomások számára a megfelelő számítástechnikai környezetet elsősorban a feldolgozandó adatok mennyisége, azok elő-feldolgozottságának foka határozza meg. Ha például olyan helyen telepítjük ezeket, ahol a megjelenítésre tervezett adatok nagyfokú előkészítésen, feldolgozáson esnek át, mielőtt a munkaállomásunkra érkeznek, akkor

kisebb teljesítményű processzor is elegendő lehet, de ugyanakkor megnövekedhet a tárhely iránti igény. Ha nagy részletességű, időben gyorsan változó, látványos – például térhatású – megjelenítést tervezünk, akkor erős grafikus processzorra lehet szükségünk. Ha az adatok csak minimális feldolgozáson estek át, akkor a megjelenítés zavartalan, gyors biztosítása érdekében többprocesszoros architektúrájú számítógépet célszerű terveznünk.

Mindezek mellett elmondható, hogy az esetek többségében egy ma már egyáltalán nem csúcskategóriásnak számító 3 GHz-es processzorral rendelkező PC 1–2 Gbyte központi memóriával és 512 Gbyte háttértárral már alkalmas lehet a feladatra, hogy meteorológiai munkaállomássá változtassuk.

A meteorológiai munkaállomások operációs rendszereiket tekintve eltérőek lehetnek. Kezdetben a meteorológiában népszerű UNIX és az efelett futó X-Windows terjedt el (HAWK-I), de később a Microsoft Windows alapú személyi számítógépek térhódításának köszönhetően a Windows NT/2000/XP/Vista operációs rendszerek felett is fejlesztettek ki meteorológiai munkaállomásokat (NAMIS). Sőt van rá példa, hogy az Apple Macintosh operációs rendszerein is megoldható a feladat (MeteoCenter).

Időközben a szabad-felhasználású LINUX elterjedésével a UNIX háttérbe, a személyi számítógépek pedig előtérbe kerültek a meteorológiai munkaállomások piacán (HAWK-II).

Adatbázis

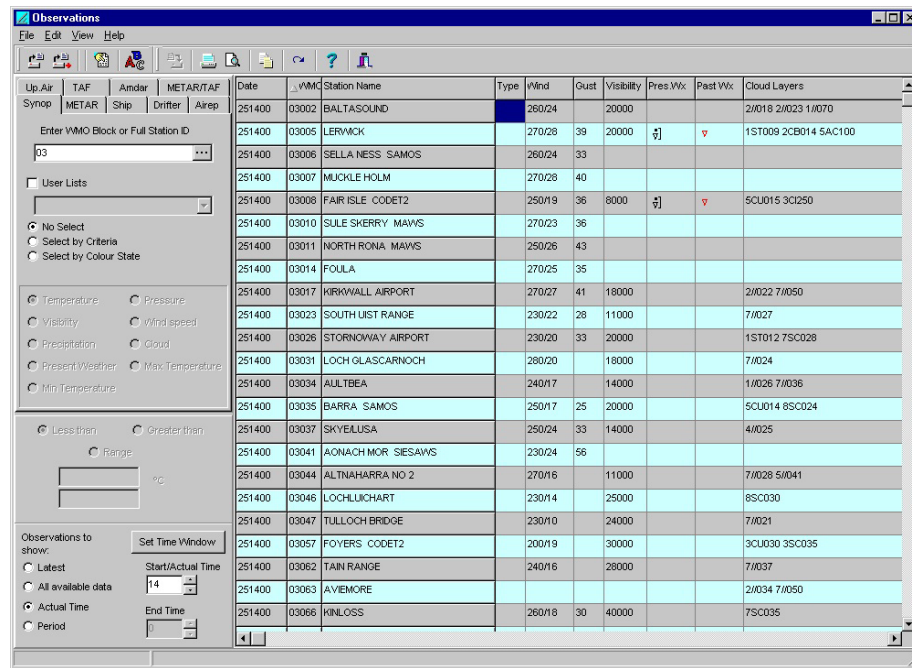
A meteorológiai munkaállomások adatbázis kialakítása, struktúrája elérő lehet. Egy dologban azonban általában azonosak: a meteorológia területén meghonosított kommunikációs eljárások valamelyikét (vagy akár többet is) támogatják és egyezményesített WMO szabványokra épülnek. Ez nagy előny, mert kis munkával, de szinte valamennyi meteorológiai munkaállomás adaptálható az általunk már megszokott informatikai környezethez.

Az egyszerűbb megoldásokban az alkalmazások a beérkező és fájlrendszerben tárolt WMO szabványú meteorológiai üzeneteket – előfeldolgozás nélkül – közvetlenül kezelik (KMIR). Ennek a megoldásnak addig van előnye, amíg az adatok megjelenítéséhez szükséges számítások és az adatok mennyisége nem indokolja egy erőforrás-igényes adatbázis-kezelő rendszer működtetését.

Ha azonban nagy mennyiségű adatot kell kezelnünk minden egyes képernyőtartalom frissítéskor, változáskor, illetve gyakran van szükségünk ugyanarra a típusú adatra (például felszínhőmérséklet), akkor nem célszerű feleslegesen elvégeztetni a számítógéppel azokat a műveleteket, melyek a WMO szabványú üzenetek, táviratok előfeldolgozása révén a megjelenítésre tervezett információ előállítását célozzák. Ilyenkor megfelelő adatbázis működtetésével – melyben a feldolgozott információ is helyet kap – felgyorsíthatjuk a hozzáférést az adatokhoz. Éppen ezért általában relációs adatbázisokba szervezik az állomáshálózat alapadatait, a földfelszíni megfigyelő hálózat, a polgári és katonai repülőterek és a légiközlekedés meteorológiai adatait (METEOSTATION).

A meteorológiai munkaállomások gyakran felületet biztosítanak az adatbázisokhoz történő közvetlen – általában lekérdezések útján szűrt – hozzáférésre, adatgyűjtésre, adattáblák előállítására (NAMIS – 1. ábra).

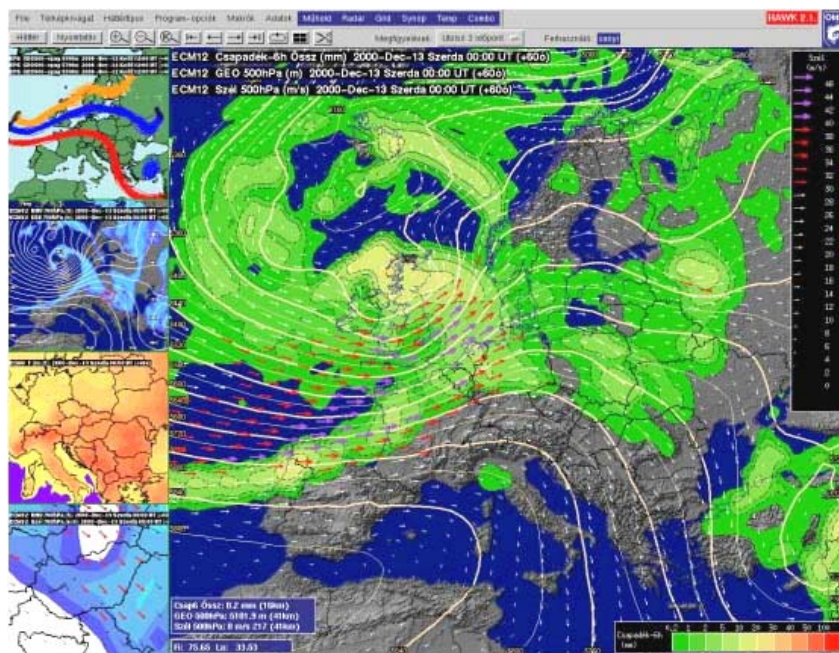
A numerikus előrejelzési produktumok, vagy a távérzékelő rendszerek adatai olyan nagy mennyiségben állnak rendelkezésre, hogy adatbázisba történő integrálásuk meglehetősen bonyolult feladat. Általában ezek esetén legfeljebb csak a feldolgozásukat elősegítő információk kerülnek be az adatbázisokba (elérési útvonal, azonosító, beérkezés rögzítése stb.). Az ennél nagyobb fokú integrációt célzó megoldások már annyira speciális eljárásokat tartalmaznak, hogy a különböző rendszerek közti adatcsere vagy adatbázis-szinkronizáció nem, vagy csak nehezen megvalósítható.



1. ábra: Adatbázis-lekérdezés a NAMIS munkaállomáson (Forrás: UK Met Office)

Térképes megjelenítés

Az előrejelző munka legfontosabb kelléktára a szinoptikus térkép. Természetesen a meteorológiai munkaállomások sem nélkülözhetik ezt az eszközt.



2. ábra: A HAWK-2 főablaka (Forrás: Németh Ákos, OMSZ)

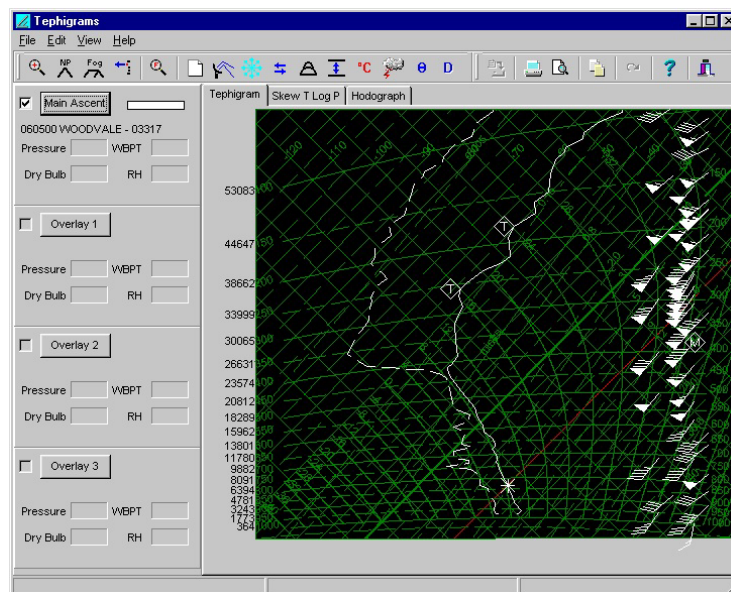
A megjelenítés alapját általában egy szabadon választható térképvetület adja, melyre igényünk szerint felvihetjük a partvonalakat, országhatárokat, a vízrajzi elemeket, vagy akár a domborzatot is. Igényeink szerint a meteorológiai munkaállomás képes lehet még további térképi elemek megjelenítésére is: mint pl. főbb útvonalak, települések vagy repülési körzetek, légterek, stb.

Az alaptérképünkre ezután többféle – általában ugyanarra az időpontra, vagy időtartamra vonatkozó meteorológiai mezőt „vihetünk fel”. Ennek gyakorlatilag csak a munkaállomás számítástechnikai kapacitása szab határt. Olyan mezők együttlátására nyílik lehetőség, mint pl. a műholdkép, a radarkép, a villám-lokalizációs helyzetkép, ezek előrejelzett mezői, a földfelszíni megfigyelő hálózat, a repülőtéri megfigyelőrendszerek és a magaslégköri mérések adatai, a numerikus előrejelzési modellek produktumai stb. Ráadásul ilyen térképből akár többet is megjeleníthetünk egyszerre.

Ma már a legtöbb munkaállomás lehetőséget biztosít az előrejelző számára, hogy a mezők elemzésén túl – a szinoptikus objektumok eszköztárát felvonultató grafikus szerkesztő segítségével – saját maga is alkotó módon információt (frontok, ciklonok-anticiklonok helyzete stb.) vigyen be a rendszerbe.

Felszállási diagramok

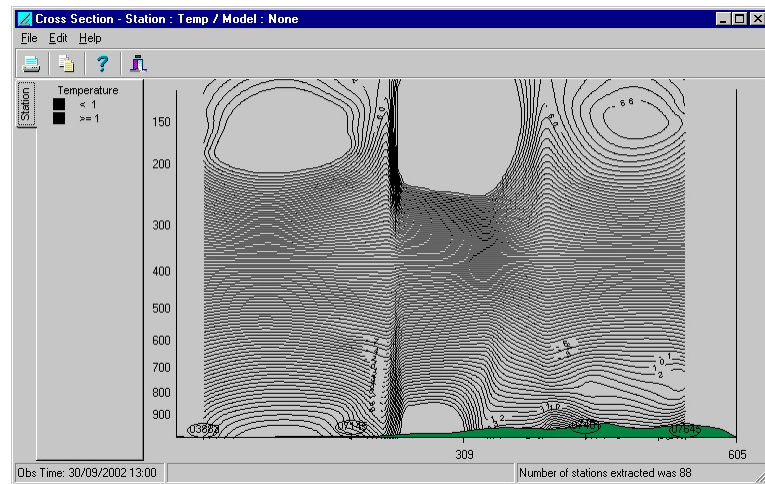
Az elemző munka másik nagyon fontos szegmense a légkör vertikális rétegződésének, a légkör instabilitásának tanulmányozása. Ennek eszközei a felszállási diagramok, melyek közül a leggyakoribbak az Emagramok, vagy a Skew-T-diagrammok. Tekintettel a felhasználók megosztottságára e téren, a legtöbb munkaállomás minimum e két típus megjelenítésére alkalmas. A diagramok képesek több állomás felszállási görbéinek egyidejű megjelenítésére, de lehetőség van ugyanannak az állomásnak egymást követő időpontokban mért adatainak együttlátására. Manapság ezek a diagramok nem csak mérési eredményekből állíthatók elő a munkaállomásokon, hanem előrejelzett mezőkből, ún. pszeudó-TEMP-ekből is. A diagramok „kötelező” adatain kívül számos a légkör instabilitását, nedvességtartalmát, a légköri turbulencia, a jegesedés fokát jelző mérőszámot is előállít ez az alkalmazás.



3. ábra: Felszállási diagram a NAMIS munkaállomáson (Forrás: UK Met Office)

Vertikális keresztmetszetek

Egy repülési útvonalra szóló prognózis készítésekor szükségünk lehet az útvonalon jellemző meteorológiai viszonyok feltérképezésére, együttlátására. Ehhez is adnak kezünkbe eszközt a meteorológiai munkaállomások. A térképes megjelenítésben az útvonal kezdő és záró pontjainak kijelölését követően a rendszer előállítja a kért keresztmetszetet. Ezzel a módszerrel egy közeledő frontrendszer tulajdonságait is elemezhetjük a frontot metsző egyenesre előállított metszet révén.



4. ábra: Keresztmetszet a NAMIS munkaállomáson (Forrás: UK Met Office)

Meteogramok

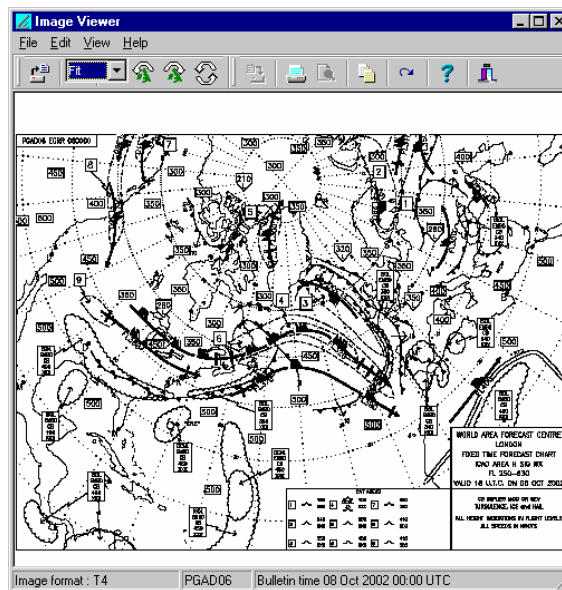
A meteogramok időben ábrázolják egy meteorológiai paraméter, vagy egy időjárási jelenség (várható helyzetkép) alakulását. Ilyen meteogramokat általában a nagy előrejelző központok bocsátanak ki a felelősségi körzeteikbe tartozó nagyobb városokra, de egyes meteorológiai munkaállomások – a rendelkezésükre álló adatok alapján – képesek saját maguk is meteogramokat előállítani.



5. ábra: Meteogram előállítása a HAWK munkaállomáson (Forrás: OMSZ)

Képmegjelenítők

Amikor olyan információ áll rendelkezésünkre, ahol a geo-referálás utólag nehezen vagy egyáltalán nem megoldható, akkor nincs lehetőség más produktumokkal való együttábrázolására, térképes megjelenítésére. Ilyen információk pl. az ICAO által előírt, vagy egyéb speciális célból készült szignifikáns térképek, melyek általában T4 (DFAX), vagy PNG, esetleg valamilyen vektoros grafikus formátumban állnak a felhasználók rendelkezésére. Éppen ezért a meteorológiai alkalmazások általában tartalmaznak egy olyan képmegjelenítő alkalmazást, mely képes a legismertebb grafikus szabványok kezelésére.



6. ábra: Szignifikáns térkép a NAMIS képmegjelenítőjében (Forrás: UK Met Office)

1. táblázat: a hivatkozott meteorológiai munkaállomások

Munkaállomás neve	Alkalmazó szervezet	Operatív alkalmazás időszaka
HAWK-I Hungarian Advanced Workstation 1. verzió	Országos Meteorológiai Szolgálat	1998–2000
HAWK-II Hungarian Advanced Workstation 2. verzió	Országos Meteorológiai Szolgálat	2000-től
MeteoCenter	Magyar Honvédség	1997–2000
NAMIS NATO Automated Meteorological and Oceanographical Information System	Magyar Honvédség	1999-től
MeteoStation	Magyar Honvédség	2000–2003
KMIR Katonai Meteorológiai Információs Rendszer	Magyar Honvédség	2002-től

További célok

Az itt bemutatott modulok csak a meteorológiai munkaállomásokon alkalmazott legfontosabb eszközöket tartalmazzák. A továbbiakban az ismert rendszerek elemzésével csokorba kívánjuk szedni azokat a speciális alkalmazásokat, melyek egy-egy felhasználói célcsoport (pl. repülésmeteorológia, katonameteorológia) munkáját segítik, majd ezek alapján – mintegy étlapról szemezgetve – összeállítanánk egy adott célcsoport ideális munkaállomását.

Felhasznált irodalom

Németh Ákos: [A térinformatika gyakorlati alkalmazása az Országos Meteorológiai Szolgálatnál](#), XIV. Országos Térinformatikai Konferencia

([http://www.otk.hu/cd04/1szek/Németh %20Ákos.htm](http://www.otk.hu/cd04/1szek/Németh%20Ákos.htm))

NAMIS User Guide for NAMIS Version 5, Uk Met Office, 17 March 2003

A HAWK-2 meteorológiai munkaállomás, OMSZ (http://www.met.hu/omsz.php?almenu_id=homepages&pid=numprog&pri=2)

MAGYARORSZÁG SZÉLKLÍMÁJA, A SZÉLERGIA HASZNOSÍTÁSA: MÚLT, JELEN, JÖVŐ

Radics Kornélia (1,2), Bartholy Judit (2), Péliné Németh Csilla (1,2)

(1) MH Geoinformációs Szolgálat, 1024 Budapest, Szilágyi E. fasor 7-9.

(2) ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány s. 1/A.

e-mail: kornelia.radics@mil.hu

Napjainkban – amikor már közismert ténynek tekinthető, hogy az emberi tevékenység befolyásolja a Föld éghajlatának alakulását – megnövekedett az igény a klímaváltozás globális és regionális hatásainak elemzésére, következményeinek becslésére. A globális éghajlatváltozás várhatóan jelentős hatást gyakorol az extrém időjárási események gyakoriságára és amplitúdójára, valamint feltételezhető, hogy a magasabb hőmérsékleti értékek, az intenzívebbé váló hidrológiai ciklus, s a megélénkülő légköri mozgások a regionális éghajlat megváltozását eredményezik. Az egyes meteorológiai paraméterek átlagos értékeinek elmozdulása mellett tehát kiemelt figyelmet igényel a szélsőséges időjárási és éghajlati események esetleges gyakorisági változása is. Az 1990-es években megkezdett hazai szélergetikai vizsgálatokból is hiányoznak még a szélerőművek optimális elhelyezését szolgáló szélsőérték-vizsgálatok és tendenciaelemzések, melyek nélkülözhetetlenek a várható energiatermelés becsléséhez. Ezért az ELTE Meteorológiai Tanszékén tizenöt éve elindult szélklimatológiai kutatások egyik fő célja a regionális szélklíma átlagos értékeinek, szélsőségeinek és tendenciáinak részletes elemzése volt.

Bevezetés

Az elmúlt évszázadok során robbanásszerűen megnövekedett energiafelhasználás minden igényt kielégítő biztosítása napjainkban jelentős környezetterhelést eredményez. A folyamatos gazdasági növekedést és – ezzel párhuzamosan – a környezetünkre gyakorolt pusztító hatások mérséklését jelenlegi tudásunk szerint csupán az egy főre jutó energiafelhasználás jelentős mértékű csökkentésével és a megújuló energiaforrások (így például a szélergia) egyre nagyobb mértékű felhasználásával érhetjük el.

A potenciális szélergia regionális változékonyságának becslése során a természetes felszínek, így a domborzat és az érdesség áramlásmódosító hatásának becslését a dán fejlesztésű Wind Atlas Analysis and Application Program (WASP) felhasználásával végeztük. A WASP a mért széladatokat horizontális és vertikális extrapolációjára szolgáló, Jackson és Hunt elméletére alapozott, lineáris, spektrális modell (*Mortensen et al*, 1993), melynek alkalmazásával készült az Európai szélátlasz (*Troen és Petersen*, 1989) is. Svédországi mérési adatsorok felhasználásával feltártuk a WASP modellezési korlátjait (*Bartholy és Radics*, 2001; *Radics*, 2004), majd a hegyhátsági toronymérés négy szinten (10 m-en, 48 m-en, 82 m-en és 115 m-en) mért széladatainak segítségével igazoltuk a WASP modell hazai adaptálhatóságát. Így lehetőség nyílt a modellezési eredmények verifikálására. A széladatokat horizontális és vertikális extrapolációját esettanulmányok során végeztük el (*Radics és Bartholy*, 2002, *Bartholy et al*, 2003), továbbá a domborzat és az érdesség áramlásmódosító hatását elemeztük azzal a céllal, hogy megismerjük a rendelkezésre álló szélmező legfontosabb sajátosságait. A szélergetikai kutatások befejező részében az ország egész területére modelleztük és megszerkesztettük az átlagos szélergességet és rendelkezésre álló szélergiát ábrázoló térképeket (*Radics*, 2004).

Magyarországon a potenciális készletek megbízható becsléseinek hiánya is nehezíti a szélenergia hasznosítását. E becslések csupán abban az esetben készíthetők el, ha megfelelő minőségű, egységes, homogenizált mérési adatsor áll rendelkezésre. Kutatásaink során a hazai szinoptikus meteorológiai állomások (36 mérőhely) jelenleg 35 éves (1975–2009) adatsorainak szélenergetikai szempontú komplex statisztikai elemzését végeztük el. Az adatsorokra vonatkozó minőségi és mennyiségi ellenőrzés, majd homogenizációs és adatkorrekciós feladatok megoldása után – a globális klímaváltozás regionális hatásainak becslése céljából – átfogóan elemeztük a szélmérő klimatológiai szempontból lényeges átlagos és szélsőértékeit (*Radics és Bartholy, 2008*). Az óras szélsősebesség, szélirány és széllevegő adatokat tartalmazó idősor felhasználásával becsültük a szélklíma legfontosabb paramétereinek és szélsőértékeinek évek közötti változékonyságát, azok térbeli és időbeli tendenciáit (*Radics et al, 2010*).

A regionális skálán várható éghajlatváltozás is befolyásolhatja hazánk szélklímáját, illetve az extrémumok előfordulásának gyakoriságait. Ezért kutatásaink következő szakaszában a sem térben, sem időben nem homogén, pontszerűen mért állomásadatok és az ERA-40 adatbázis által rendelkezésre álló homogén reanalízis mezők összehasonlítását végeztük el. Vizsgálataink során arra a kérdésre kerestük a választ, hogy a térben és időben hiányos szélmérési adatsorokat helyettesíthetjük-e a hiánymentesen rendelkezésre álló, s számos nemzetközi forrás által minőséginek értékelt ERA-40 reanalízis idősorokkal (*Radics et al, 2010*). Ennek ismeretében meghatározható, hogy a XXI. század közepére, végére készült modellszimulációk mennyire alkalmazhatóak a regionális szélklíma tendenciáinak, illetve a – változó klimatikus viszonyokkal együttesen módosuló – megújuló energiaforrások potenciáljainak becslésére.

Ebben a másfél évtizede megkezdett szélklíma és szélenergetikai kutatásainkat ismertető összefoglalóban – a terjedelmi korlátok miatt – csupán néhány legfrissebb, legfontosabb eredmény kerül bemutatásra az alábbiakban.

A vizsgálatokhoz felhasznált adatok

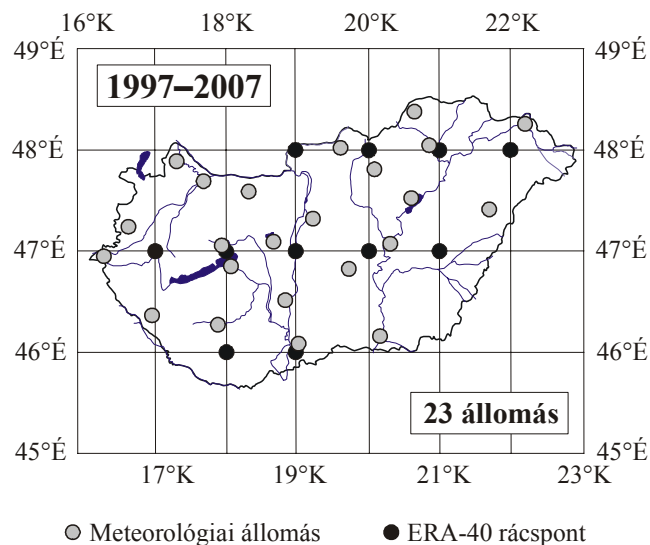
A dolgozatban bemutatott vizsgálatainkhoz 36 magyarországi szinoptikus meteorológiai állomás 1997–2007-ig terjedő, óras adatsorai álltak rendelkezésünkre, melyet az Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálat biztosított részünkre. A földfelszíni megfigyelési adatbázis (SYNOP távirat) óras szélsősebesség, szélirány és széllevegő értékeket – egészen kerekített sebességet (m/s-ban) és tíz fokra kerekített szélirányt – tartalmaz.

A fenti időszak folyamán azonban több állomást más helyszínre költöztettek, illetve esetenként új állomásokat is telepítettek. A közvetlen és távoli környezet és a mérési magasság időközbeni megváltozása tovább nehezítette a homogén adatbázis létrehozását. E tényeknek köszönhetően az adatsorok teljes időszakra vonatkozó egységes vizsgálata – az inhomogenitások miatt – lehetetlenné vált. Így a hazai szélklíma szélsőségeinek e dolgozatban bemutatásra kerülő elemzését 23 szinoptikus meteorológiai állomás – melyek földrajzi elhelyezkedése a *1. ábrán* látható – tizenegy éves (1997–2007) idősorán végeztük. Kivételt képeznek ez alól Miskolc és Kecskemét állomások, ahol 1997 júliusával, illetve 1998 januárjával kezdődött meg az automata adatszolgáltatás. Kilenc éves (1997–2005) adatbázist használtunk Taszár esetén az állomás 2005-ben történt bezárása miatt. Külön figyelmet szenteltünk a Szombathely és Szeged állomásokról származó adatoknak. Szombathely esetén az állomást 2002-ben – a szélmérési magasság megváltoztatása nélkül – áthelyezték. Szegeden pedig 2004-ben a mérési magasságot 8,76 m-ről 10 m-re növelték.

Első lépésként az adatsorok minőségi ellenőrzését végeztük el. A hibás értékek kiszűrése több lépcsőben, számos szempont figyelembe vételével történt (*Radics et al, 2008*). Ezután az adatsorok tartalmi ellenőrzését és az extrém értékek szűrését hajtottuk végre. A kutatás

következő fázisában az adathiányok esetleges pótlásával foglalkoztunk, az idősorokban fellelhető adathiányokat, azok időbeli eloszlását elemeztük. Általánosságban elmondható, hogy jelentős mennyiségű adat egyetlen állomás esetén sem hiányzik. Az adathiányok rendezetlen időbeli eloszlása miatt nem alkalmaztunk adatpótló technikát. A fenti döntésünket szakirodalmi eredmények is alátámasztották (Molly, 1990; Hau, 1996; Dobesch és Kury, 1999).

Az ún. ERA-40 reanalízis-adatbázist az európai ECMWF központ állította össze azzal a céllal, hogy a meteorológiai változók megbízható, több évtizedes (1957–2002) adatsorai a nemzetközi kutatások számára az egész Földre vonatkozóan rendelkezésre álljanak. Vizsgálatainkhoz a 10 m-es szélkomponensek (u, v) 1997–2001. időszakra vonatkozó, $1^\circ \times 1^\circ$ felbontású (1. ábra), hat órás (0, 6, 12, 18 UTC) rácsponti idősorait használtuk fel, melyhez az Országos Meteorológiai Szolgálat közreműködésével jutottunk hozzá.



1. ábra. A vizsgálatba (1997–2007) bevont meteorológiai állomások földrajzi elhelyezkedése, és az ERA-40 hazánk területére eső rácspontjai

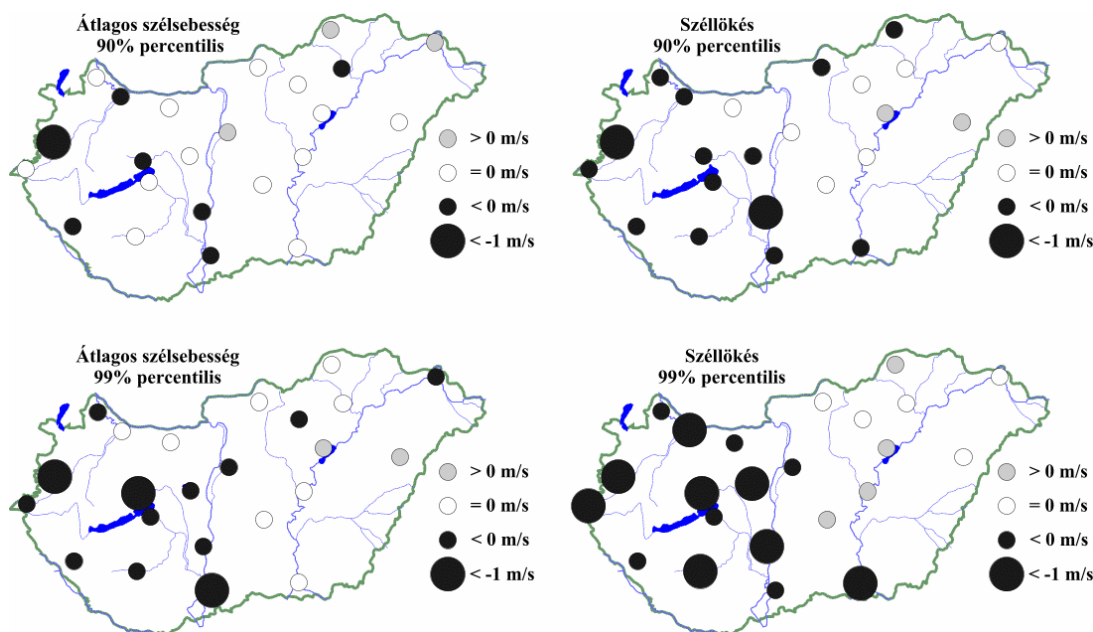
Vizsgálatok, eredmények, következtetések

Első lépésként hazánk szélklímájának legfontosabb jellemzőit tekintettük át. Az 1997–2007-ig terjedő idősorok elemzésével az alábbi elsődleges következtetések vonhatók le (Radics és Bartholy, 2008, Radics et al, 2010):

- A mérőhelyek által reprezentált területeken az éves átlagos szélsébség 1,47 m/s (Jósvafő) és 3,84 m/s (Szentkirályszabadja) között változik. Hazánk az európai szélosztályozás kategóriáit követve mérsékelt szél tartományba sorolható.
- Az átlagos és maximális szélsébség nagy térbeli változékonyságot mutat. A legszelesebb vidék az északnyugati, míg a legkevésbé szeles a délnyugati és az északkeleti országrész. Az uralkodó szélirány relatív gyakorisága alacsony. A szélszél időszakok aránya néhány térségben kifejezetten magas értéket vesz fel.
- A szélsébség napi és az éves változékonyság mértéke 1–2 m/s. A szélsébség havi anomáliái általában 1 m/s-on belül maradnak, azaz szélklímánk az év során kiegyenlítettnek mondható.
- A szélsébség és szélsebesség abszolút maximuma 15–40 m/s közé esik. A legnagyobb értékek 2000 előtt fordultak elő.

- Az ország területén belül jelentős eltérések mutatkoznak a szélsőértékek előfordulásának gyakoriságában, azok területi eloszlása azonban jól követi az átlagos szélsébségi mezőt.

A szinoptikus meteorológiai állomásokon mért szélsébség és a szélökés értékek hároméves csúszó átlagainak felhasználásával elemeztük a szélsőértékek meghatározott szintátlépéseinek (medián, 90 %, 95 %, 99 %) számát és időbeli változásának területi eloszlását (2. ábra). Az 1997–2007-es időszakra vonatkozó percentilis értékek vizsgálata során csupán néhány állomás esetén találtunk emelkedő tendenciát. Míg az átlagos szélsébség 90 %-os percentilise az ország jelentős részén változatlan értéket vesz fel, addig a szélökés esetén valamint a vizsgált percentilis értékének növelésével az ország egyre nagyobb területén jelenik meg a csökkenő tendencia. Sőt a percentilis érték növelésével a csökkenés mértéke is jelentősen nő. Minden esetben kirajzolódik a Dunántúlt és az alföldi régiókat jellemző eltérő viselkedés. Míg a dunántúli területeken a szélsőértékek általában csökkenő tendenciát mutatnak, addig az Alföld jelentős részén nem mutatható ki a percentilis értékek időbeli változása, illetve azok növekedése jelenik meg.

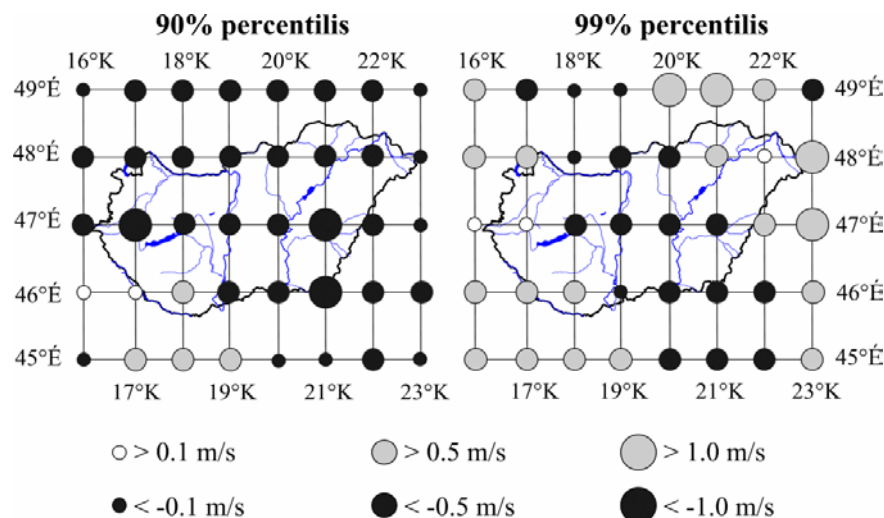


2. ábra. Az átlagos szélsébségre és a szélökésre vonatkozó percentilis értékek (90 %, 99 %) tendenciájának (1997–2007) területi eloszlása hazánkban

Az ERA-40 adatbázis hatóránkénti szélsébség komponenseiből meghatároztuk a rácspontokra vonatkozó szélvektorok nagyságát, majd – a mért értékekhez hasonlóan – a hároméves csúszó átlagok felhasználásával elemeztük a szélsőértékek meghatározott szintátlépéseinek (90 %, 99 %) számát és időbeli változásuk területi eloszlását (3. ábra) az 1997–2002. időszak során. A hazánk területére eső 11 rácspontra vonatkozó 90 %-os percentilis döntően csökkenő tendenciát mutat. A vizsgált percentilis értékének növelésével azonban – a mért értékekhez hasonlóan – néhány esetben már a növekvő tendencia is megjelenik. 1 m/s-nál nagyobb növekedés csupán Magyarország határain kívül található.

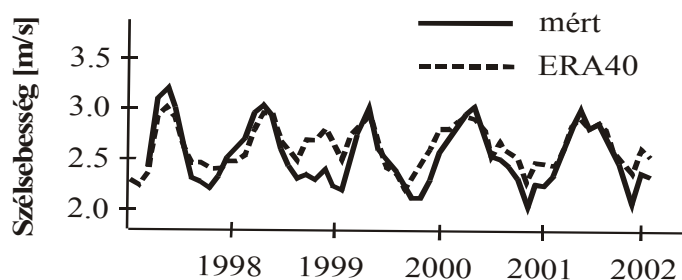
Az ERA-40 adatbázisából és a meteorológiai állomásokon mért széladatokból – összehasonlítás céljából – havi átlagokat számoltunk az 1997–2002-es időszakra. A két adatbázis objektív összehasonlításához a havi átlagokból ún. „rácátlagot”, illetve „állomási átlagot” számoltunk. Az ERA-40 adatok esetében a Magyarország határain belül található tizenegy rácspont átlagát vettük minden egyes hónapra (továbbiakban ERA-40 átlag). A hazai

mért széladatokat esetében pedig az állomások átlagát számítottuk ki az adott hónapra vonatkozóan (továbbiakban állomási átlag).



3. ábra. Az ERA-40 adatbázis rácsponti szélesebesség értékeire vonatkozó percentilisek (90 %, 99 %) tendenciájának (1997–2002) területi eloszlása

Az 4. ábrán a két adatbázis ERA-40 és állomási háromhavi csúszóátlagainak időszora látható. Az 1997–2001 közötti időszak során az ERA-40 átlag jól közelíti az állomási átlagot, a görbék maximum és minimumhelyei megegyeznek. Az 1998. év második felétől kezdve – a maximumokat kivéve (ahol pár százalékos alulbecslés jellemző) – állandóan felülbecsli az állomási átlag idősorát. A minimumok esetében több mint 10 %-os eltérés is található. A vizsgált időszak során az állomási átlagot csökkenő tendencia jellemzi, mely azonban az ERA-40 átlag esetében nem mutatható ki.



4. ábra. Az ERA-40 és a mért szélesebességek átlagaiból képzett háromhavi csúszóátlagok összehasonlítása (1997–2002)

További elemzéseink alapján (Radics *et al*, 2010) – melyek e dolgozatban történő bemutatásától a terjedelmi korlátok miatt eltekintünk – levonható az alapvető következtetés, hogy a potenciális szélenergia becsléséhez a magyarországi mért állomási adatok mellett eredményesen alkalmazható a pontosabb területi lefedettséget biztosító ERA-40 reanalízis adatbázis is.

Későbbi vizsgálataink során egyrészt arra keressük a választ, hogy az átlag- és szélsőértékek esetén tapasztalt időbeli eltolódás hosszabb mérési adatsor esetén kimutatható-e. Másrészt, hogy ezen tendencia a regionális skálán jelentkező éghajlatváltozás (mely befolyásolhatja hazánk szélklímáját, az extrémumok előfordulásának gyakoriságait) következménye, vagy a hazai szélviszonyok természetes változékonyságának eredménye.

Köszönetnyilvánítás: Köszönetünket fejezzük ki a Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálatának a szinoptikus meteorológiai állomások, az Országos Meteorológiai Szolgálatnak az ERA-40 adatbázis széladatainak használatáért.

Az elvégzett kutatásokat részlegesen az alábbi pályázatok támogatták: OTKA T-049824, K-67626, K-69164, K-78125, az Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott CCWATERS projekt (SEE/A/022/2.1/X), valamint az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozása (TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR). Köszönjük a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíjának támogatását.

Hivatkozások

- Bartholy J. and Radics K., 2001: Selected wind characteristics and potential use of wind energy in Hungary. Part I. *Időjárás* 105, 109-126.
- Bartholy J., Radics K. and Bohoczky F., 2003: Present state of wind energy utilisation in Hungary: policy, wind climate, and modelling studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 7, 175-186.
- Dobesh, H. and Kury, G., 1999: Basic meteorological concepts and recommendations for the exploitation of wind energy in the atmospheric boundary layer. *Working report*, Vienna, 117p.
- Hau, E., 1996: *Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. Springer Verlag, 792p.
- Molly, J.P., 1990: *Windenergie. Theorie and Praxis*. C.F. Müller, Kalsruhe.
- Mortensen, N.G., Landsberg, L., Troen, I. and Petersen, E.L., 1993: *Wind Atlas Analysis and Application Program (WASP)*. Risø Nat. Labs, Roskilde, Denmark, 126p.
- Radics K., 2004: A szélenergia hasznosításának lehetőségei Magyarországon: hazánk szélklímája, a rendelkezésre álló szélenergia becslése és modellezése. *Doktori értekezés*, ELTE Meteorológiai Tanszék, 137p.
- Radics K. and Bartholy J., 2002: Selected wind characteristics and potential use of wind energy in Hungary. Part II. *Időjárás* 106, 59-74
- Radics K. and Bartholy J., 2008: Estimating and modelling the wind resource of Hungary. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 874-882.
- Radics K., Bartholy J. and Péliné N. Cs., 2008: A szélmező átlagos és extrém értékeinek térbeli és időbeli változása hazánkban. *EU Szélnap kötet*, Debrecen.
- Radics K., Bartholy J. and Péliné N. Cs., 2010: Regional tendencies of extreme wind characteristics in Hungary. *Advances in Science and Research* 4, 43-46.
- Troen, I. and Petersen, L., 1989: *European Wind Atlas*. Risø Nat. Labs, Roskilde, Denmark, 656p.

KATONAMETEOROLÓGIAI MÉRŐRENDSZEREK FEJLESZTÉSE ÉS A HAZAI KATONAI REPÜLŐTEREK MÉRÉSI ÉS MEGFIGYELÉSI EREDMÉNYEINEK ELEMZÉSE

Péliné Németh Csilla, Czender Csilla
MH Geoinformációs Szolgálat
e-mail: pelinenemeth.csilla@mhtehi.gov.hu,
czendercsilla@gmail.com

1. Bevezetés

A Magyar Honvédség meteorológiai támogatását, kiszolgálását az MH Geoinformációs Szolgálat végzi. Alapfeladatai között szerepel a meteorológiai és oceanográfiai információáramlás biztosítása a hazai és nemzetközi hálózatokban, valamint a mérések és megfigyelések technikai feltételeinek tervezése, szervezése, fejlesztése. A szolgálat meteorológiai osztályainak szerteágazó feladatrendszere számos területen és témában lehetőséget nyújthat a hallgatók számára a gyakorlati szemléletet is igénylő tudományos munkában való részvételhez.

Jelen dolgozatban két fő témakör köré csoportosítottuk a lehetséges vizsgálatokat. Egyrészt foglalkozunk a repülőtéri és mobil mérőrendszerek fejlesztési lehetőségeivel a veszélyes időjárási jelenségek felismerése, valamint az ultrarövidtávú helyi előrejelzések javítása érdekében. Másrészt a teljesség igénye nélkül bemutatunk néhány, a hazai katonai repülőterek földfelszíni időjárás-megfigyelési mérőrendszereiből (MAWOS) származó meteorológiai paraméterek elemzéseivel megválaszolható kérdést.

A hazai katonai repülőterek meteorológiai mérőrendszereinek fejlesztési lehetőségei

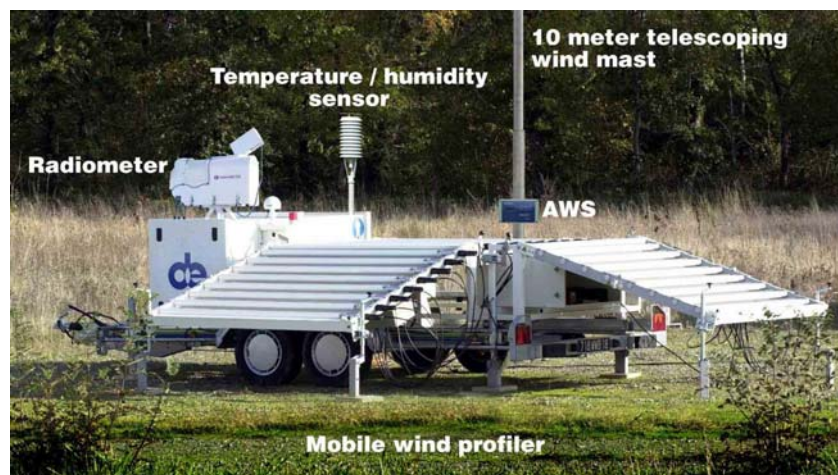
A technikai fejlesztések témakörének keretein belül elsősorban olyan tanulmányok készítését várjuk, melyek hasznos információt adhatnak a meglévő rendszereinkhez illeszkedő eszközök beszerzéséhez, illetve újabb produktumok előállítását célozzák meg.

A mobil wind profilerek katonai alkalmazásának lehetőségei

Különböző tanulmányokban bemutatott gyakorlati tapasztalatok alapján kijelenthetjük, hogy a közepes-erős vertikális szélnyírás és az alacsony szintű, horizontális szélnyírás a repülőgépek fel- és leszállásánál jelentenek igazán veszélyt. A szél horizontális és vertikális szerkezetének pontosabb megértésével és ismeretével – melyhez alkalmas eszköz lehet a wind profiler – a meteorológus tájékoztatása hozzájárulhat a repülési műveletek hatékonyságának és biztonságának növeléséhez.

A wind profilerek mellett, hogy információt szolgáltatnak a légköri stabilitásról, a nedvességi mezőkről és a legalább közepes intenzitású turbulenciáról, egy másik hasznos lehetőséget is kínálnak. Méréseik által betekintést engednek a határréteg szerkezetébe, lehetővé teszik a hőmérsékleti inverziók pontos meghatározását. Például a Graph-XMTM (Vaisala) megjelenítő szoftver segítségével elkészíthető a virtuális hőmérséklet vertikális profilja is. Az inverziós magasság csökkenése erősen korlátozza a függőleges keveredést, ezért a levegőminőséget jellemző faktorként is alkalmazható, így a mobil wind profiler a különböző szennyező-, és veszélyes anyagok, vagy a harcanyagok terjedésének monitorozására is kiválóan alkalmas lehet. A kémiai, biológiai, radiológiai és nukleáris anyagok terjedésének katonai vonatkozásai – akár békefenntartó, akár háborús körülmények között – számos hazai

és nemzetközi tanulmány és gyakorlat részét képezik, melyekben a meteorológusoknak is kiemelt szerepe van. Az eszköz mérési adatai jelentősen hozzájárulhatnak a rövidtávú előrejelzések jobb beválásához, valamint az alkalmazott terjedési modellek számára bemenő paraméterként is használhatóak. Mindezek jelentősen segíthetik a katonai műveletek során nélkülözhetetlen, helyes és gyors reagálást. Az 1. ábra a mobil rendszer egy lehetséges kialakítását szemlélteti.



1. ábra. Példa egy mobil wind profiler rendszer kialakítására

A technikai fejlesztés témakörében további, az alább felsorolt kérdések részletes elemzése is kézzelfogható eredményeket hozhat:

- A TACMET mobil harcászati meteorológiai állomás missziós alkalmazásának lehetőségei. Például az MH GEOSZ tulajdonában lévő TACMET állomások jelenleg az afganisztáni misszióban szolgálatot teljesítő Tartományi Újjáépítési Csoport munkáját segítik.
- A meteorológiában használatos szenzorok összehasonlító elemzése (működési elv, előnyei, hátrányai), optimális elhelyezése, tesztmérések kiértékelése.
- Repülőtéri mérőrendszerek optimális kialakítása (WMO dokumentumok), hazai és külföldi tapasztalatok.
- Az Integrált Geoinformációs Adatbázison (IGDB) alapuló katonameteorológiai célú térinformatikai alkalmazások megvalósítása az ArcGIS szoftver segítségével. Az IGDB webes publikálási felületeinek kialakítása a MH Intranet hálózaton.

Mérések és megfigyelések elemzése

A repülések meteorológiai támogatásának része a repülőterek éghajlati jellemzőinek mélyreható ismerete. A folyamatos méréseket egyrészt azzal a céllal végezzük, hogy a helyi időjárásról egzakt információkhoz jussunk, másrészt, hogy a mért adatsorokból későbbi feldolgozásra alkalmas archív adatbázist alakítsunk ki. A tárolt adatbázisból utólag visszakereshetők a kérdéses időpontra a mért adatok, melyek például a repülőbalesetek kivizsgálásánál is fontos szerephez jutnak. Továbbá, az idősorok rendszeres, módszeres elemzéséből következtetni tudunk egy-egy szenzor hibás működésére, valamint feltárhatjuk a repülőter helyi meteorológiai jellemzőit.

Egy korábbi dolgozatunkban (Péliné et al., 2009) a hazai katonai repülőterek földfelszíni időjárás-megfigyelési mérőrendszereiből (MAWOS) származó elemi és perces szélesség, szélirány és maximális szélesség adatsorokat vizsgáltuk Kecskeméten, Szolnokon és Pápán. Összehasonlítottuk az óras szinoptikus táviratokban kódolt, egész értékekre kerekített

szélsebességek előfordulási gyakoriságát az elemi széladatok gyakoriságával azzal a céllal, hogy megvizsgáljuk, a sűrűbb mintavétellel milyen többlet információkat nyerhetünk a környezeti hatásokra érzékeny szélsébségi adatokból.

A MAWOS rendszerek mérési programja (1. táblázat) szerint előállított adatok „valós” időben láthatóak a rendszerek megjelenítő termináljain, és tárolásukról is a mérési programnak megfelelően kell gondoskodni. A MAWOS rendszerek mérési adatai – a szélmérést kivéve – egyperces átlagolási idővel percenként íródnak a Microsoft Access adatbázis-kezelő szoftver tábláiba.

1. táblázat. A MAWOS rendszerek mérési programja

Mért / származtatott mennyiségek
Szélirány és szélsébség
Szélleőkés
Légnyomás a leszállómező küszöbének szintjében
Tenger szintjére a standard atmoszféra alapján átszámított légnyomás
Hőmérséklettel korrigált tengerszintre redukált légnyomás
2 m-es szinten mért hőmérséklet
Relatív nedvesség
2 m-es szinten mért harmatpont
Komfort hőmérséklet
Meteorological Optical Range
Runway Visual Range
Felhőalap, illetve a függőleges látás
Gomoly kondenzációs szint magassága
Futópálya betonhőmérséklet
Globálsugárzás
Napfénytartam
Csapadékmennyiség
Csapadék státusz

Vizsgálataink során a két másodperces és perces átlagolási időtartamból származó szélsébség, szélirány és az adott percben előforduló szélmaximum értékek egyéves idősortát elemeztük a 2008. évre. Ezen Access táblákban tárolt mért adatok részletes vizsgálata technikai és személyi feltételek miatt csak tavaly indult meg. A munka kezdetekor a kitűzött cél az volt, hogy a rendelkezésre álló, nagymennyiségű mért adathalmaz kínálta lehetőségeket kihasználjuk. Nevezetesen, az adatokat ne csak az évek óta megszokott módon és a szokásos módszerek alkalmazásával ellenőrizzük, az óras szinoptikus táviratokra szabott ellenőrző algoritmusok rutinszerű futtatásával, hanem használjuk ki azt, hogy a percenkénti adatsűrűséggel több információt nyerhetünk ki az adathalmazból. A kidolgozott és bevezetett újabb módszerek – melyek kisebb programok, makrók futtatását jelenti MS Windows környezetben – a mérőeszközök rendellenes működését hivatottak kiszűrni, hozzájárulva a MAWOS rendszerek megbízható működéséhez. A munka további hozadéka az alábbiakban részben bemutatott eredményeink az egyes repülőterek 2008. évi szélviszonyaira vonatkozóan.

Szélirány vizsgálatok

Elsőként a szélirányok havi és éves relatív gyakoriságát vizsgáltuk mindhárom repülőtérről. Várakozásaink szerint Kecskeméten a leggyakrabban előforduló, uralkodó szélirány az északnyugati volt a 2008. évben is. Egy év alatt hétszer is a 300°-os irány volt adott hónapban a leggyakoribb. A 300°-ról fújó szél az esetek 14,6%-ában júliusban, 14,3%-ában augusztusban, és 13,2%-ában a kevésbé szeles október hónapban fordult elő, de a 2008. év legszelesebb hónapjában, márciusban is elérte a 12,6%-ot (2. táblázat). Januárban a délkeleti

szél volt a leggyakoribb, a 160°-os irány 13,1%-os, miközben a 150°-os irány is meglehetősen magas, 11,6%-os gyakoriságú volt.

Dolgozatunkban a szélirány vizsgálatok során feltételeztük, hogy a leszállás délről északra történik (főirány). A futópályákhoz képesti szélirányok tanulmányozásakor azokat az eseteket vizsgáltuk, amikor a szélesség értéke nem nulla. A hátszél, a szembeszél és az oldalszél általunk definiált szögtartományait a 3. táblázatban foglaltuk össze.

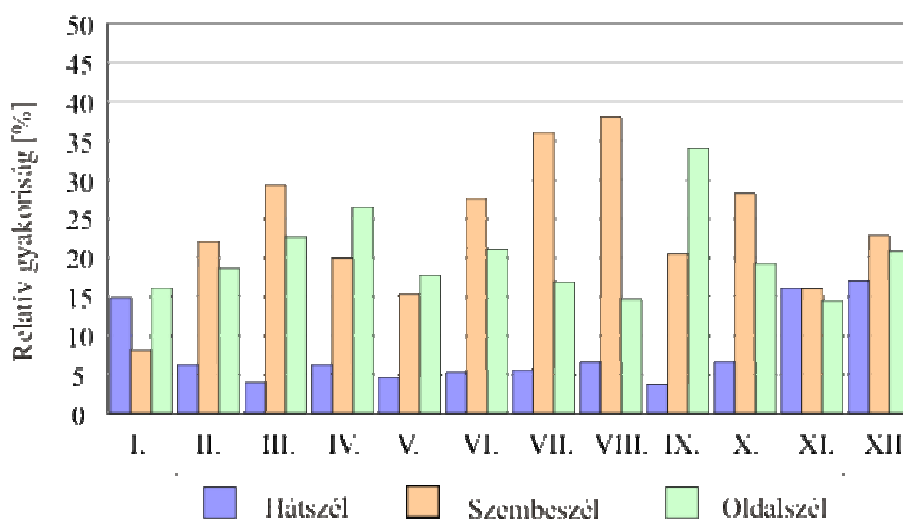
2. táblázat. Szélirányok maximális relatív gyakoriságai Kecskeméten 2008-ban.

	Jan.	Febr.	Már.	Ápr.	Máj.	Jún.	Júl.	Aug.	Szept.	Okt.	Nov.	Dec.	Éves
Szélirány [°]	160	320	300	300	310	310	300	300	300	300	160	140	300
Relatív gyakoriság [%]	13,1	6,5	12,6	6,5	9,2	9,1	14,6	14,3	6,9	13,2	7,2	8,0	8,3

3. táblázat. Futópályák iránya, valamint a szembe-, hát- és oldalszél szögtartományai az egyes hazai katonai repülőtereken.

	Kecskemét	Pápa	Szolnok
Futópálya iránya	300° és 120°	340° és 160°	20° és 200°
Szembeszél	280°–320°	320°–360°	360°–40°
Hátszél	100°–140°	140°–180°	180°–220°
Oldalszél	10°–50° és 190°–230°	50°–90° és 230°–270°	90°–130° és 270°–310°

A főirányhoz viszonyított szélirányok relatív gyakoriságának Kecskemétre vonatkozó értékeit, melyek megfelelnek a térségre jellemző makroszinoptikus helyzeteknek, a 2. ábrán mutatjuk be. A kis relatív gyakoriságú hátszél és a domináns szembeszél az év során egymáshoz képest ellentétesen változott, a hátszélnek novemberben és a téli hónapokban, míg a szembeszélnek nyáron volt a maximuma 2008-ban. Az oldalszél ősszel, amikor a kis szélességek jellemzőek, volt a leggyakoribb, 34% szeptemberben, de a legszelesebb hónapokban (áprilisban 26%, márciusban 23%) is jelentős számú esetben fordult elő.



2. ábra. A főirányhoz viszonyított szélirányok relatív gyakorisága Kecskeméten 2008-ban a két másodperces adatsor alapján.

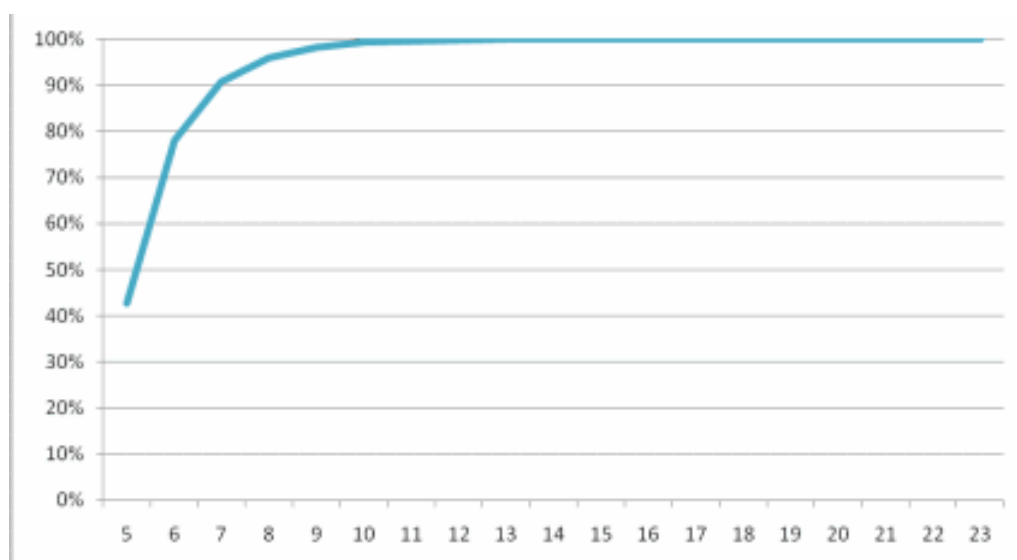
Szolnokon az oldalszél havi időtartamai rendkívül magas értékeket vesznek fel, minden hónapban meghaladják a 100 órát. Március hónapban 247 órán keresztül fújt oldalirányú szél,

és még az 5 m/s vagy annál nagyobb átlagos szélességek is 147 órát tettek ki ebben a hónapban.

Várakozásainknak megfelelően a szembeszél időtartama magas volt szeptemberben Pápán, csaknem tíz nap (236 óra), miközben a többi hónapban is jelentős, 75-186 óra között alakult. Nagysága évszakokhoz nem köthető. Kecskeméten, két nyári hónapban volt a legmagasabb a szembeszél gyakorisága, augusztusban 274 óra, júliusban 260 óra, de júniusban is megközelítette a 200 órát. Szolnokon a szembeszél májusban volt a leggyakoribb, de ekkor is csak 142 óra volt. A nyári hónapok az ezen a repülőtéren jellemző közepes értékeket vették fel (76-106 óra), ősszel pedig rendkívül alacsony, csak 1-2 nap volt a havi szembeszél időtartama (októberben 40 óra, novemberben 34 óra).

Szélnyírás vizsgálatok

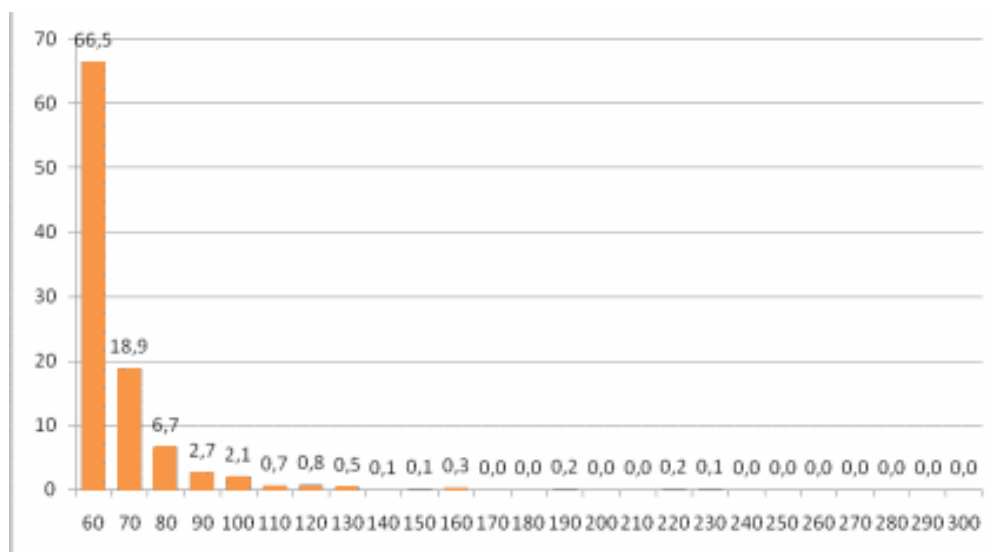
A szélnyírás jelensége különösen hátrányos lehet a repülőgépek le- és felszállásakor. A levegő áramlása sosem lehet teljesen lamináris, örvénymenetes, mert minden léptékben turbulencia jellemzi, ezért bizonyos mértékű szélnyírás mindig fellép. A megkezdett szélnyírás vizsgálataink során a leszállópálya északi és déli végeiben elhelyezett szélmérők adatait vetettük össze egymással. A szélnyírás kritériumainak meghatározásához az ICAO (International Civil Aviation Organization) előírásait vettük alapul, amelyek meghatároznak egy határértéket a szélességre és egy küszöbértéket a szélirányra, mely felett szélnyírásról beszélünk. Ha a szélesség a két mérőhelyen 5 m/s-nál nagyobb eltérést mutat (és természetesen mindkét mérőn van adat), vagy ha a mért szélirányok között legalább 60° a szögeltérés és a szél mindkét helyen legalább 5 m/s, akkor a repülés szempontjából veszélyes szélnyírás állhat fenn. A 3. ábrán vázolt eloszlás szerint a sebességkülönbségre vonatkozó kritérium majdnem felét (42%) az 5 m/s küszöbértéknél éri el, miközben 90%-a 7 m/s vagy annál kisebb sebességkülönbségnél fordul elő. Az ilyen és az ehhez hasonló esetek fennmaradási ideje néhány mérés időtartama, maximum 10 másodperc. Az irányeltérésre megfogalmazott kritérium bekövetkezésének esélye jóval kisebb, mint a sebességeltérés esetén. Az ilyen esetek száma 2008. évben átlagosan 10%, bár az egyes hónapok között nagy eltérések vannak. A szélnyírás relatív gyakorisága az irányeltérés függvényében a 4. ábrán látható.



3. ábra. A szélnyírás relatív gyakorisága a futópálya északi és déli szélmérője közti szélesség különbsége függvényében Pápán.

A fenti eredményeken felül vizsgáltuk a rendelkezésünkre álló idősorok elemzésével a szélesség- és a szélirányváltozás havi és éves relatív gyakoriságát, a szélesség havi és

éves átlagos napi menetét, a perces adatsorból számított átlagos havi és éves szélsőértékeket, perces maximális szélsőérték megváltozásának relatív gyakoriságát, illetve az elemi széladatok felhasználásával a szélnyírást.



4. ábra. A szélnyírás relatív gyakorisága a futópálya északi és déli szélmérője közti szélirányeltérés függvényében Pápán.

Kutatásaink során az egyik legfontosabb meteorológiai elem, a szél, melynek szakszerű mérése elengedhetetlen, viselkedésének elemzését kezdtük meg a katonai repülőtereinken. Azonban egyéb, jelen dolgozatban nem tárgyalt, mért és észlelt meteorológiai paraméter vizsgálata is hasznos információval bír a repülőtéren meteorológiai csoportok számára.

Hivatkozások

- Brock, F. V. and Richardson, S. J., 2001: Meteorological measurement systems, *Oxford University Press*
- Jordan, J.R., Leach, J.L. and Wolfe, D.E., 2008: Operation of a mobile wind profiler in severe clutter environments, *NOAA Environmental Technology Laboratory Boulder*
- Háy Gy., 2006: Amit a repülésről tudni kell. *Typotex kiadó*
- Péliné N. Cs., Kocsis F. és Czender Cs., 2009: Automata mérőállomások széladatainak vizsgálata a hazai katonai repülőtereken, *Repüléstudományi Konferencia 2009*, Szolnok
- Péliné N. Cs. and Radics K., 2009: Repülésre veszélyes időjárási jelenségek mérése a XXI. században (hazai katonai repülőterek meteorológiai mérőrendszereinek fejlesztési lehetőségei), *Repüléstudományi Konferencia 2009*, Szolnok
- Sándor V. and Wantuch F., 2004: Repülésmeteorológia, *Országos Meteorológiai Szolgálat*, Budapest
- World Meteorological Organisation No-08 Part I, 2003: Measurement of meteorological variables
- World Meteorological Organisation No-08 Part II, 2003: Observing systems
- World Meteorological Organisation No-08 Part III, 2003: Quality assurance and management of observing systems
- World Meteorological Organisation No-544, 2003: Manual on the Global Observing System

REPÜLSMETEOROLÓGIAI KUTATÁSOK A ZMNE REPÜLSMETEOROLÓGIAI LABORATÓRIUMÁBAN - NUMERIKUS ELŐREJELZÉSI (WRF) ÉS MŰHOLDMETEOROLÓGIAI ASPEKTUSOK

Bottyán Zsolt

ZMNE, BJKMK, RLI, Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék
E-mail: bottyan.zsolt@zmne.hu

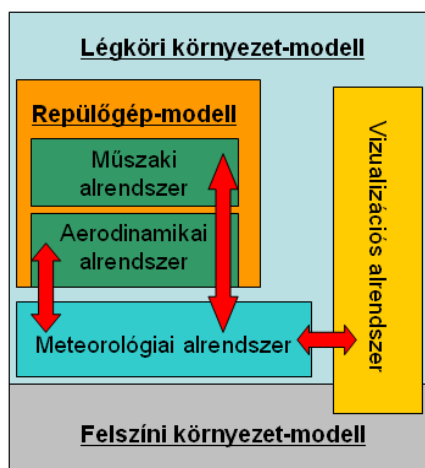
Bevezetés

Az operatív repülésmeteorológiai előrejelzés (nowcasting) alapvető feladata a repülési feladatok időjárási körülményeinek prognózisa és az időjárás folyamatos nyomon követése a repülés biztonságos végrehajtása érdekében. Számos olyan – elsősorban mezo- és ezekhez kapcsolódó mikro-léptékű – meteorológiai jelenség, folyamat létezik, amely konkrét veszélyforrást jelent a repülésre, ugyanakkor megfigyelésük, nyomon követésük és előrejelzésük egyaránt problémás: pl. a köd/alacsony stratus monitoring (Bottyán, 2010), a látástávolság alakulásának problematikája (Wantuch *et al.*, 2010) és ezek numerikus prognosztikai megközelítése (Bottyán, 2009a).

Munkánkban röviden áttekintést adunk a ZMNE Repülésmeteorológiai Laboratórium bázisán jelenleg végzett numerikus prognosztikai és műholdmeteorológiai kutatásokról illetve ezek távlati lehetőségeiről.

A repülőgép-szimulátorok meteorológiai aspektusairól

A korszerű repülőgép-szimulátorok egyszerűsített elvi felépítését az 1. ábrán mutatjuk be. A *légköri környezet-modellben* jelennek meg az időjárási helyzet tulajdonságai és jelenségei, a további repülőeszközök (célok) illetve azok vizuális, valamint audio jellemzői. A *repülőgép-modell* a szimulációs rendszer központi része. Ebben több alrendszer van beágyazva, melyek a repülőgép geometriai jellemzőit, aerodinamikai tulajdonságait és viselkedését, a vezérlés módját, a hajtóművek karakterisztikáit, a kommunikációs és műszeres rendszer működését és katonai repülés esetében a fegyverrendszert stb. határozzák meg. A *felszíni környezet-modell* tartalmazza a domborzat háromdimenziós modelljét és az erre épülő mesterséges tereptárgyakat, mint pl. városokat, épületeket, növényzetet, repülőtereket és azok kiszolgáló objektumait, valamint katonai alkalmazás esetén a földi célokat stb. (Rolfe and Staples, 1988).



1. ábra. A repülőgép-szimulátorok egyszerűsített elvi modellje (Rolfe és Staples, 1988 után módosítva)

A repülési szimuláció során a virtuális térben ki kell alakítani és meg kell jeleníteni egy konkrét meteorológiai helyzetnek megfelelő környezetet, mely hatással van a repülőgép repülési (aerodinamikai) tulajdonságaira, és műszaki berendezéseinek működésére. Ezt a munkát a szimulátor *meteorológiai alrendszere* végzi, melynek konkrétan a következő feladatokat kell elvégeznie:

- az adott időjárási helyzet fizikai állapotjelzőinek beviteléhez szükséges felület megjelenítése és kezelése,
- az atmoszféra állapotából eredő hatások csatolása a repülőgép-modell aerodinamikai és műszaki alrendszeréhez,
- a bevitt meteorológiai adatok alapján generált virtuális légköri környezet és a hozzá kapcsolódó jelenségek jellemző tulajdonságainak illesztése a vizualizációs alrendszerhez (Bottyán, 2009b).

Valós, nagy felbontású 3D meteorológiai környezet adaptációja a repülőgép-szimulátorhoz

A meteorológiai alrendszer fejlett input felülettel rendelkezik, melynek segítségével lehetőségünk van a ténylegesen *mért (archív) időjárási adatok* bevitelével, a valóságban előfordult meteorológiai szituációkat mesterségesen előállítani a szimulátorban. Ennek a ténynek óriási jelentősége van, hiszen a szimulátorban oktató személyzet részére szinte majdnem minden – repülésre veszélyes – időjárási szituáció szimulálható magas fokú valósághűséggel. Másrészt, repülésesemények kivizsgálásában is nagy segítséget nyújthat a valós környezet előállítása és ebben a repülőgép útvonalának rekonstruálása (Bottyán, 2008). A rekonstrukcióhoz szükséges meteorológiai adatokat az adott útvonalra vonatkozóan három dimenzióban kell inputként megadni a meteorológiai alrendszernek (Lane-Cummings and VanWest, 2007).

Az adaptáció egy megközelítése: WRF bázison történő leskálázási módszer

Az említett feladat megoldásához kiindulásként az NCEP GFS 0,5 fokos horizontális felbontású numerikus modelljének outputját használjuk fel, melyet nyilvános FTP szerverről töltünk le, és 3 órás időlépcsőben rendelkezésünkre áll az analízistől kezdve. A modellt naponta négyszer futtatják és vertikálisan 64 szintet foglal magában. Munkánk során a 00 UTC időpontra készített futtatás eredményeivel dolgozunk, mert kora reggelre elérhetőek és az adatasszimiláció a legszélesebb körből kap mérési adatokat.

Az előre meghatározott prognosztikai tartományra történő leskálázást a WRF mezo-skálájú modell ARW 3.1-es implementációjának segítségével végezzük, mely rugalmas környezetet biztosít a feladat végrehajtásához (Skamarock et al., 2005). Figyelembe véve a repülésre veszélyes időjárási jelenségek és a repülési folyamatok tér- és időskáláját, a WRF modellt általában 5×5 km-es horizontális rácson futtatjuk az ehhez tartozó 30 másodperces időlépcsővel, hogy teljesüljön a CFL-kritérium a stabilitásra vonatkozóan (Wicker and Skamarock, 2002; Wendl, 2009).

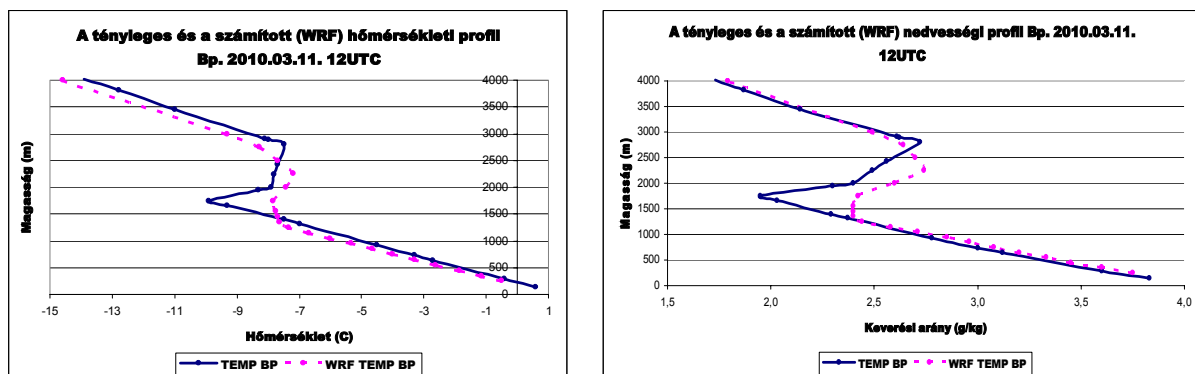
Az általunk alkalmazott WRF parametrizációt az 1. táblázat tartalmazza, melynek választása során a fentebb leírtakat messzemenőleg figyelembe vettük.

Jelenleg kísérleteket folytatunk a Magyar Honvédség ÖHP, RFO, repülőgép-szimulátora meteorológiai alrendszerének leskálázott meteorológiai adatokkal történő ellátására. A repülési útvonal mentén adott koordinátájú pontokra elkészítjük az állapothatározók profilját, és a szimulátor ezekből előállítja a virtuális időjárási környezetet (beleértve a látványt is).

1. táblázat: A WRF modellben általunk alkalmazott parametrizációk típusai	
Légköri folyamatok	Választott WRF parametrizáció
Sugárzás	Hosszúhullámú: RRTM; Rövidhullámú: Goddard
Felszínközeli réteg	Monin-Obukhov
Határreteg	MYJ
Cumulus fejlődés	Grell – Devenyi ensemble
Mikrofizika	WSM – 6
Szárazföldi felszín	Noah

Esettanulmány: közepes erősségű jegesedés Nimbostratus (Ns) felhőzetben

Hogy bemutassuk a módszerben rejlő repülésmeteorológiai lehetőségeket, elkészítettük a meteorológiai helyzet WRF leskálázását a Kárpát-medence területére a 2010.03.11. 00 UTC-kor történt GFS futtatás alapján. Ezen a napon hazánk időjárását erős ciklonális (melegfronti) hatás alakította, vastag *nimbostratus* (Ns) felhőzettel, melyből hó, havas eső is hullott. A WRF futtatást 24 órára végeztük el és két fontos prognosztizált légköri állapotjelző (hőmérséklet és vízgőz keverési arány) vertikális profilját összevetettük a 12 UTC-kor Budapest-Pestszentlőrincről felbocsátott rádiószonda mérési eredményeivel (2. ábra). Az egyszerű összehasonlításból kiderül, hogy mindkét profil jellege (futása) megegyező, a hőmérséklet esetében a legnagyobb abszolút eltérés $2,4^{\circ}\text{C}$, míg a vízgőz keverési arány esetében $0,49\text{ g/kg}$ az alsó 4000 méteres rétegben, a 19 rádiószondás mérési szintet figyelembe véve. A teljes említett rétegre vonatkoztatott átlagos abszolút eltérés $0,8^{\circ}\text{C}$, illetve $0,13\text{ g/kg}$, ami igen jónak mondható frontális jellegű szituációban (2. ábra).

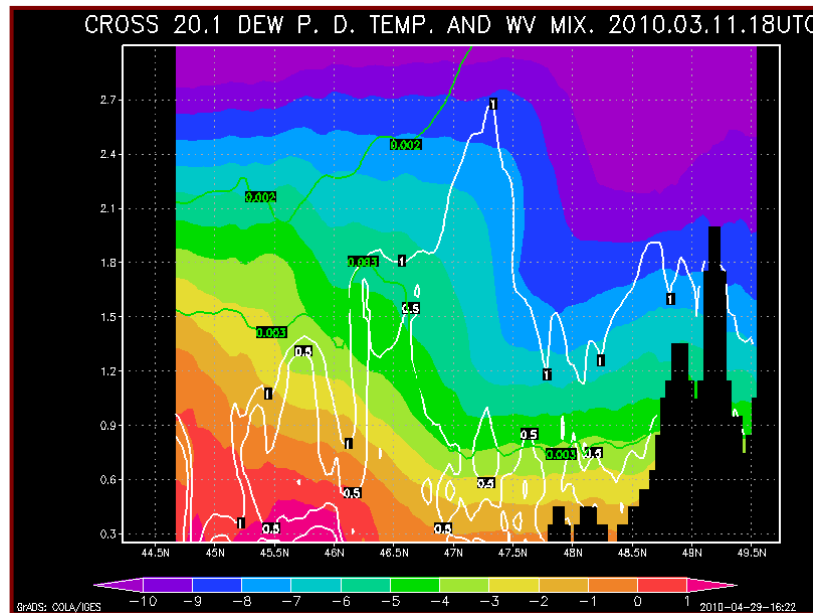


2. ábra. A mért és a WRF modellből származó hőmérsékleti (balra) és nedvességi profil (jobbra) alakulása Budapesten 2010.03.11-én 12 UTC-kor. A mért értékeket folytonos, míg a prognosztizált adatokat szaggatott görbék jelzik.

Repülési szempontból egy nagyon markáns, de egyben veszélyes jelenséget hordoz magában ez a kiterjedt felhőzet: a repülőgépek potenciális felületi és hajtómű *jegesedését*. A 0°C alatti hőmérséklet a felhőzetben mindig magában hordozza a jegesedést, hiszen a túlhumid vízcseppek ütközve a repülőgép felületével, azonnal ráfagynak arra (ónos eső effektus). A 3. ábrán az említett időpontra vonatkozó metszetet látunk a WRF outputból szerkesztve, 18 UTC időpontban, a $20,1^{\circ}\text{K}$ hosszúsági kör mentén. Jól látható, hogy a metszet szinte teljes É-D kiterjedésében mutatja a felhőzet jegesítő hatását, hiszen a hőmérséklet zéró alatti, a vízgőz keverési aránya pedig $0,003\text{ g/kg}$ feletti az alsó 700–800 méteren a Kárpát-medencében (3. ábra). Kisebbszámú jegesedést egészen 4000 méter magasságig tapasztalhattunk az

említett időpontban hazánk felett, ami megerősíti ennek a meteorológiai szituációnak a veszélyességét repülésmeteorológiai szempontból.

A kapott adatokat a repülőgép-szimulátorhoz illesztve, valós jegesedési helyzetet tudunk teremteni oktatási célból, de ezek akár időjárási elemzéshez is felhasználhatóak.



3. ábra. A 2010.03.11-i 00 UTC GFS outputból történt WRF leskálázás eredményeképpen előállított É-D irányú (20,1° K délkör mentén) harmatpontdeficit (fehér görbe), hőmérséklet (árnyalt szürke színskála) és vízgőz keverési arány (középszürke görbe) metszet. Jól látható a délről északra elmozduló melegfronti hatás és a vastag, túlhűlt vízcseppeket tartalmazó Ns felhőzet kiterjedése.

MSG-2 RGB kompozit képek alkalmazása

A repülési feladatok végrehajtásának fontos meteorológiai feltétele, hogy a látástávolság és a felhőalap konkrét határértékek felett legyenek. E két paraméter előrejelzéséhez, megfigyeléséhez elengedhetetlen a térben és időben történő nagy felbontású lefedettség, amit leginkább a műholdas produktumok nyújtanak (Bottyán, 2010). Az említett két repülésmeteorológiai paraméter értékét elsősorban a párásság, a köd és az alacsony stratus (St) felhőzet képes jelentősen és gyorsan csökkenteni. A nyári félévben pedig a gyorsan fejlődő zivatarok kialakulása és nyomon követése a kiemelt feladat.

Az EUMETSAT MSG-2 műhold 12 csatornán készít 15 percenként képeket az általa látott területről, míg az MSG-1 hold 5 percenként az európai régiót térképezi (Schmetz et al., 2002; Putsay és Kocsis, 2009; Bottyán, 2010). A kapott ún. „nyers” képekből számos RGB kompozit képet készíthetünk, melyek több csatornán készült felvételek összedolgozásának eredményeképpen állnak elő, és rendkívül sok információt képesek hordozni az adott csatornán készült képekhez viszonyítva (Lensky and Rosenfeld, 2008; Bottyán, 2010).

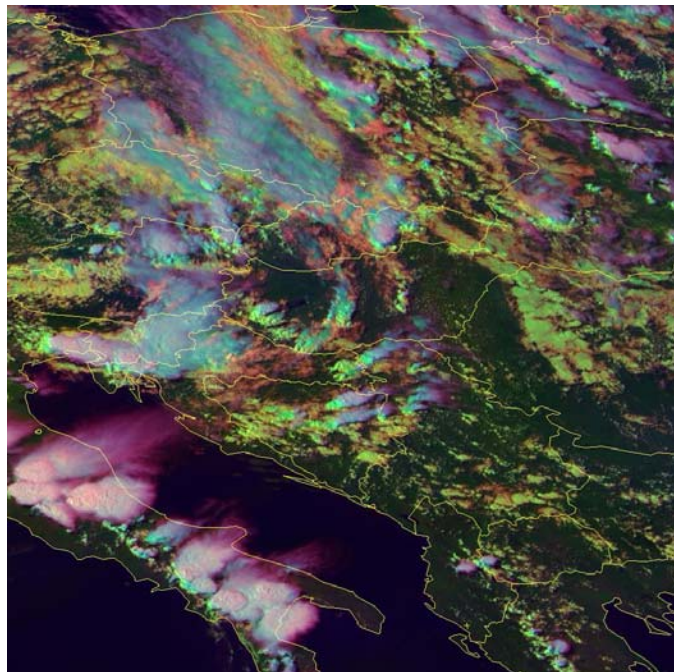
Több speciális célra fejlesztett RGB kompozit műholdképet használ maga az EUMETSAT is, melyek adott jelenség, folyamat láttatását szolgálják: pl. éjszakai köd (night microphysical), légtömeg (airmass), vulkáni hamu (volcanic ash), konvektív RGB kompozit (convective stream) stb.

Speciálisan a repülésmeteorológiában is jól használhatóak ezek az említett produktumok, de szükség van bizonyos jelenségek (pl. a konvekció) sajátos tulajdonságainak kiemelését elvégző RGB kompozit képekre, melyek lehetővé teszik a fejlődés finomabb nyomon követését is.

A ZMNE Repülésmeteorológiai Laboratóriumában 2010 márciusa óta működik egy real-time EUMETCast műholdvevő berendezés, melynek segítségével venni tudjuk a „nyers” MSG képeket (RSS is) és fel is tudjuk azokat dolgozni (pl. RGB kompozitok, kivágatok, videók készítése). Kísérleti fejlesztéseink között szerepel a konvektív folyamatok nyomon követésére alkalmas speciális RGB kompozit kép kidolgozása, mely egyben nyújt információt a folyamatban részt vevő felhőzet víztartalmáról, annak halmazállapotáról, mikrofizikájáról (cseppméret, koncentráció, optikai mélység stb.) és természetesen vizuális megjelenéséről (Hess *et al.*, 1998).

Az első kísérlet: konvektív-mikrofizikai RGB kompozit műholdkép

A korábban említetteket figyelembe véve, az általunk fejlesztett RGB kompozit képbe a *mikrofizikát* az IR3.9 – IR10.8 infravörös sávok fényességi hőmérsékleti különbségéből (BTD), a *vizuális látványt* a VIS0.8 reflektanciájából és a *vízgőztartalmat* a két vízgőz csatorna BTD különbségéből (WV6.2 – WV7.3) vesszük be. A megjelenítendő érték-intervallumok kijelöléséhez felhasználtuk a korábban kifejlesztett „convective storm” RGB kompozit kép adatait is (Lensky and Rosenfeld, 2008). Az RGB színmodulációt a fentebb leírt sorrendben végeztük el.



4. ábra. Konvektív-mikrofizikai RGB kompozit műholdkép Közép-Európa kivágat (Copyright 2010. Eumetsat, ZMNE Repülésmeteorológiai Laboratórium).

Egy adott – konvekciónak kedvező – időjárási helyzetben kialakuló gomoly (Cu), tornyos gomoly (TCu), zivatarfelhőket (Cb) illetve mezo-léptékű konvektív rendszereket (MCC) láthatunk a 4. ábrán bemutatott konvektív-mikrofizikai RGB kompozit műholdképen. A kialakult Cu és Tcu felhők szigetszerűen, zöldessárga illetve kékes színben jelennek meg, míg a Cb és főleg az MCC már finom szálas rózsaszínű Ci sapkával, erősen koncentrikus szerkezettel és sötétkéci Ci alatti szerkezettel láthatóak (pl. Appenini-félsziget felett). Az erős konvekció miatt a gomolyos szerkezetű felhők oldalai és teteje gyakran mutat granulás szerkezetet (gomolygás, intenzív áramlás visszatükröződése). Jól észrevehető az MCC-k esetében történő tropopauza-áttörések is. A Ci ernyő szintjében jól megfigyelhető az erős uralkodó szélirány is, ami mintegy elfújja a Cb tetejét.

Összefoglalás

A WRF alapú leskálázás megfelelően nagy felbontású meteorológiai környezetet biztosít, melyet az alábbi szituációkban lehet igen jól felhasználni:

- az időjárás helyzet rekonstrukciójához, repülőesemény kivizsgálásakor,
- repülőgép-szimulátorhoz a konzisztens környezet kialakításához,
- valamint repülésre veszélyes időjárási helyzetek részletes elemzéséhez.

Az MSG műholdak különböző csatornáin készített képek összedolgozásával többféle meteorológiai folyamat, jelenség kiemelhetővé válik. Így számos RGB kompozit kép ismert és használt az operatív előrejelzésben is.

Az általunk kísérletileg fejlesztett konvektív-mikrofizikai RGB kompozit kép jól mutatja a mély konvekció különböző fázisait az ennek hatására kialakuló felhőzet változásait erősen kiemelve.

Hivatkozások

- Bottyán, Zs., 2010: Az EUMETSAT EUMETCAST meteorológiai műholdas berendezések felhasználási lehetősége az operatív előrejelzésben a katonai repülőtereken. *Repüléstudományi Közlemények*, 22(2), Paper 15.
- Bottyán, Zs., 2009a: A repülésre veszélyes mezo-skálájú meteorológiai jelenségek modellezésének aspektusai: Numerikus prognosztikai megközelítés. *Repüléstudományi Közlemények*, 21(2), Paper 9.
- Bottyán, Zs., 2009b: Gondolatok a repülőgép-szimulátorok meteorológiai alrendszerének szerepéről. *Repüléstudományi Közlemények*, 21(1), Paper 3.
- Bottyán, Zs., 2008: Kísérlet egy repülőgép-katasztrófa meteorológiai viszonyainak rekonstrukciójára - a Malév HA-MOH repülőgépének balesete. *Repüléstudományi Közlemények*, 20(3), Paper 1.
- Hess M., Koepke P. and Schult I., 1998: Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC. *Bulletin of American Meteorological Society*, 79(5), 831–844.
- Lensky M. and Rosenfeld D., 2008: Cloud – Aerosols – Precipitation Satellite Analysis Tool (CAPSAT). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8., 6739–6753.
- Putsay M. és Kocsis Zs., 2009: Az EUMETSAT által műholdadatokról származtatott légköri és felszíni paraméterek. Országos Meteorológiai Szolgálat kiadványa, Budapest.
- Rolfe J., M. and Staples K., J., 1988: Flight Simulation. Cambridge University Press.
- Schmetz J., Pili P., Tjemkes S., Just D., Kerkmann J., Rota S. and Ratier A., 2002: An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG). *Bulletin of American Meteorological Society*, 977–992.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang W. and Powers J.G., 2005: A Description of the Advanced Research WRF Version 2., NCAR Mesoscale and Microscale Meteorology Division, NCAR Technical Note.
- VanWest J. and Lane-Cummings K., 2007: MS Flight Simulator X for Pilots Real World Training. Wiley.
- Wantuch F, Bottyán Z. and Deák B., 2010: A látástávolság és a köd rövid távú előrejelzésének lehetőségei. *Repüléstudományi Közlemények*, 22(2), Paper 63.
- Wendl, B., 2009: A WRF modell segítségével készült szélenergia becslések vizsgálata Mosonmagyaróvár térségére. Diplomamunka, ELTE, Budapest.
- Wicker L.J., and Skamarock W.C., 2002: Time splitting methods for elastic models using forward time schemes, *Monthly Weather Review*, 130, 2088–2097.

ÜZEMANYAGCELLA MODELLEZÉS KORSZERŰ MATEMATIKAI MÓDSZEREKKEL

Szabó Tamás

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi kar, Matematikai Intézet
Alkalmazott Analízis és Számításmatematikai Tanszék
e-mail: szabot@cs.elte.hu

Bevezetés

A XXI. század legnagyobb kihívása nemcsak a szükséges energia megteremtése, hanem a felhasználás helyére történő eljuttatása is. Tulajdonképpen a kellő mennyiséget már a mai technológiával is meg lehetne termelni különböző erőművekben. A gond az energia tárolása és megfelelő mennyiségű eljuttatása a felhasználás helyére. Mivel nem lehet mindenhova vezetéket és csöveket fektetni, ezért az energiát be kell "csomagolni". Ezt jelenleg két formában alkalmazzuk:

- Fosszilis tüzelőanyagok (szén, földgáz stb.) elégetése, amely nem környezetbarát és nem megújuló
- Üzemanyagcellák alkalmazása, amely környezetbarát és részben megújuló, ugyanis a szükséges üzemanyag mesterségesen is nagy tömegben előállítható (hidrogén, metanol stb.)

Az üzemanyagcellák, akárcsak az alkáli elemek, vegyi reakciók során közvetlenül elektromos energiát állítanak elő. A legnagyobb különbség az, hogy míg az elemek lemerülésük után használhatatlanok, addig az üzemanyagcellák addig üzemelnek, amíg üzemanyagot töltünk beléjük.

Bár az első üzemanyagcellát William Grove már 1839-ben készítette, az ipari alkalmazása egészen az Apolló program megjelenéséig (1960-as évek) váratott magára. Azóta a fejlődés üteme növekszik, mivel a szükséges platina katalizátor mértékét 10 mgcm^{-2} -ről $0,2 \text{ mgcm}^{-2}$ -re sikerült csökkenteni. Napjainkra számos válfaja terjedt el, és az elméleti 85%-os hatásfokának és közel zero káros anyag kibocsátásnak köszönhetően a jövő energia és környezeti problémájának megoldása lehet. Az a matematikai modellezés és a numerikus vizsgálatok a cellák hatékonyabb üzemeltetéséhez nyújtanak nagy segítséget.

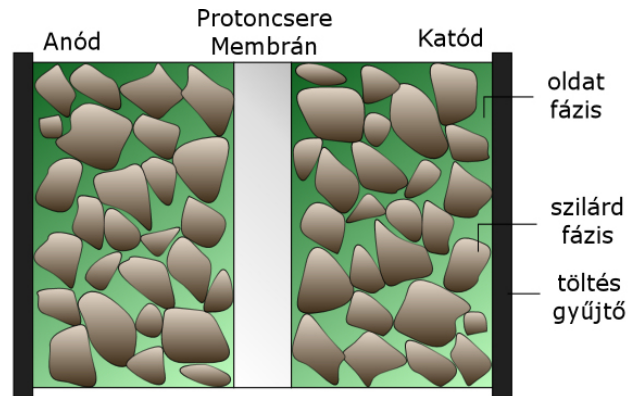
Az üzemanyagcellák matematikai leírásának hátterében időfüggő (parabolikus típusú) parciális differenciálegyenlet-rendszer áll, amely a forrástagban nem lineáris. A feladat szigorú numerikus vizsgálatokat igényel nemcsak a nem-linearitás miatt, hanem azért is, mivel az üzemanyagcellák elterjedésével egyre inkább szükség lesz a bennük rejlő energia maximális kinyerése (www.fuelcell.hu, 2010).

Protoncsere-Membrános Cellák

A Protoncsere-Membrános Cella (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC) lehet a jövőben a legalkalmasabb arra a feladatra, hogy átvegye a mostani diesel és benzinmotorok szerepét a közlekedésben. Először a NASA használt ilyen típusú cellákat a GEMINI programban, az 1960-as években. Az elektród anyaga ezekben a cellákban szilárd polimer membrán (vékony műanyag filmréteg). E polimer jellegzetessége, hogy nedves állapotban a protonokat átereszt, azonban az elektronokat nem.

Az anódon a beáramló hidrogén szétesik protonokra és elektronokra. A protonok a membránon keresztül haladnak a katód felé az elektronok pedig egy külső áramkörön

keresztül érik el azt, miközben elektromos energia keletkezik. A katódra érkező elektron az ott beáramló oxigénnel és a membránból érkező hidrogén ionokkal egyesül, és víz keletkezik.



1. ábra: A protoncsere membrános cella sematikus rajza

A reakciók:

- Anódon: $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
- Katódon: $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
- A teljes reakció: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

A többi típusú üzemanyagcellával összehasonlítva sokkal jobb energiasűrűségi paraméterekkel rendelkezik. Egyik jellegzetessége, hogy a működési hőmérséklete a membrán anyagától nagymértékben függ. Az egyik leggyakrabban használt anyag, a Nafion® esetében alacsonyabb a működési hőmérséklet, míg PolyBenzImidazole membrán esetén magasabb, akár a 200 °C-t is meghaladhatja.

Elektrokémiai modell

A porózus elektródokat általában, makro-homogén modellekkel írják le, a következő feltevésekkel:

- 1 dimenziós modell
- a gázok koncentráció eloszlását nem vesszük figyelembe
- a kettős-réteg feltöltődését és a faradaikus reakciókat figyelembe vesszük
- az anyagi és kinetikus paraméterek nem helyfüggők

Jelen munkában a fenti feltevéseket alkalmazva a modellezés célja annak kiszámítása, hogy egy adott terhelés mellett, milyen szintre esik vissza az üzemanyagcellán mérhető potenciál. Mivel a két elektród struktúrája és a leíró egyenletek is azonosak, ezért elég modellezni a cella egyik felét. Ugyanakkor a katódon lejátszódó folyamatok hat nagyságrenddel gyorsabbak, így az anód esetében egy nemlineáris egyenlet megoldásával számítjuk ki az anódon eső feszültséget.

Adott áramerősség mellett az üzemanyagcella feszültsége a következő egyenlettel határozható meg:

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{OC}} - V^* - \eta^A - \frac{W_{\text{mem}}}{\sigma_{\text{mem}}} I_{\text{cell}}, \quad (1)$$

ahol W_{mem} a membrán vastagsága (cm), σ_m a membrán vezetőképessége (Scm^{-1}), I_{cell} az alkalmazott terhelés nagysága (Acm^{-2}). E_{OC} az a potenciál, ami akkor mérhető, ha nincs terhelés a cellán (Kriston et. al, 2010).

A katód kormányzó egyenletei

A makro-homogén modell alkalmazása mellett, feltesszük, hogy az oldat fázisban a hidrogén-ion migárciójára és a szilárd fázisban az elektron transzferre az Ohm törvény érvényesíthető, azaz

$$i_1 = -\sigma_{eff} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x}, \quad (2)$$

$$i_2 = -\kappa_{eff} \frac{\partial \varphi_2}{\partial x}, \quad (3)$$

ahol i_1 és i_2 (Acm^{-2}) rendre a szilárd és az oldat fázisban mérhető áramsűrűség, φ_1 és φ_2 (V) a két fázisbeli potenciál, σ_{eff} és κ_{eff} (Scm^{-1}) pedig az adott fázis elektron illetve hidrogén-ion vezetőképessége.

A térfogati felületi áramsűrűségről feltesszük, hogy a kapacitív és a faradaikus áramsűrűség összege:

$$j_n = AC_{dl} \frac{\partial(\varphi_1 - \varphi_2)}{\partial t} + J_f. \quad (4)$$

A katódon eső potenciál a két fázis potenciáljának kiszámítása után a következő egyenlettel határozható meg:

$$V^* = \varphi_1(0) - \varphi_2(L), \quad (5)$$

azaz az oldat fázis potenciáljának a membrán határán és a szilárd fázis potenciáljának a töltésgyűjtő határán számított különbsége megegyezik a pozitív elektródon eső feszültség nagyságával.

Megmutatható, hogy az elektro-neutralitás figyelembe vételével a fenti kormányzó egyenletek a megfelelő peremfeltételekkel a következő formába transzformálhatók (Faragó et. al, 2008):

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \nu^2 f(u), & x \in (0,1), t \in (0,T] \\ u(x,0) = u_0(x) \end{cases} \quad (6)$$

ahol $u = u(x,t)$ a dimenziótlán túlfeszültség, ν^2 a dimenziótlán csereáram sűrűség, $f = f(u)$ egy tetszőleges forrástag, amely rendelkezik a következő tulajdonsággal:

$$u(x,t) \geq 0 \Rightarrow f(u) \geq 0. \quad (7)$$

A feladathoz tartozó peremfeltétel:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x}(0,t) = -g_1(t) = -I(t) \frac{FL}{\kappa_{eff} RT} \\ \frac{\partial u}{\partial x}(1,t) = g_2(t) = I(t) \frac{FL}{\sigma_{eff} RT} = g_1(t) \frac{\kappa_{eff}}{\sigma_{eff}}, \end{cases} \quad (8)$$

ahol F (Cmol^{-1}) a Faraday állandó, R ($\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$) az univerzális gázállandó, T (K) a cella hőmérséklete, L (cm) a katód szélessége.

Operátor szeletelés

A napjainkban már széles körben alkalmazott operátor szeletelés legnagyobb előnye, hogy az összetett problémát olyan részfeladatok megoldásával váltja ki, amelyek jóval könnyebben kezelhetők, mint az eredeti probléma (Csomós et. al, 2005).

Ebben a fejezetben a korábban leírt modellre alkalmazunk egy jól ismert operátor szeletelési eljárást, a szekvenciális szeletelést. Célunk, az 1 dimenziós üzemanyagcella modell kanonikus alakjának megoldása szeleteléssel a $[0, T]$ időintervallumon:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \nu^2 \exp u \quad (x \in (0,1); t > 0), \quad (9)$$

a következő kezdeti feltétellel

$$u(x,0) = u_0(x), \quad (10)$$

illetve peremfeltétellel

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x}(0,t) &= -g_1(t) \\ \frac{\partial u}{\partial x}(1,t) &= g_2(t) \end{aligned}, \quad (11)$$

ahol $g_1(t)$ és $g_2(t)$ (8) által meghatározott függvények.

Legyen $N_T \in \mathbb{N}$; $\tau := \frac{T}{N_T} (> 0)$ adott szám. (Szeletelési lépésköz.) Oldjuk meg az

$\omega_\tau := \{n \cdot \tau; \quad n = 0, 1, \dots, N_T\}$ rácshálón a (9)-(11) feladat helyett a következő feladatokat:

IA.

$$\frac{\partial u_1^{(1)}}{\partial t} = -\nu^2 \exp u_1^{(1)} \quad 0 < t < \tau$$

$$u_1^{(1)}(x,0) = u_0(x) \quad x \in (0,1)$$

IB.

$$\frac{\partial u_2^{(1)}}{\partial t} = \frac{\partial^2 u_2^{(1)}}{\partial x^2}$$

$$u_2^{(1)}(x,0) = u_1^{(1)}(x, \tau) \quad x \in (0,1)$$

$$-\frac{\partial u_2^{(1)}}{\partial x}(0,t) = -g_1(t); \quad \frac{\partial u_2^{(1)}}{\partial x}(1,t) = g_2(t) \quad 0 < t < \tau$$

Megoldás: $u_1^{(1)}(\tau)$, amit **IB**-ben kezdeti feltételként használunk.

Megoldása: $u_2^{(1)}(\tau) =: u_{sp}(\tau)$

IIA. Újra megoldjuk **IA** feladatot, de most a $[\tau, 2\tau]$ intervallumon és kezdeti feltételnek a fenti $u_{sp}(\tau)$ -t választjuk:

$$\frac{\partial u_1^{(2)}}{\partial t} = -\nu^2 \exp u_1^{(2)} \quad \tau < t < 2\tau$$

$$u_1^{(2)}(x, \tau) = u_{sp}(x, \tau) \quad x \in (0,1)$$

Megoldás: $u_1^{(2)}$

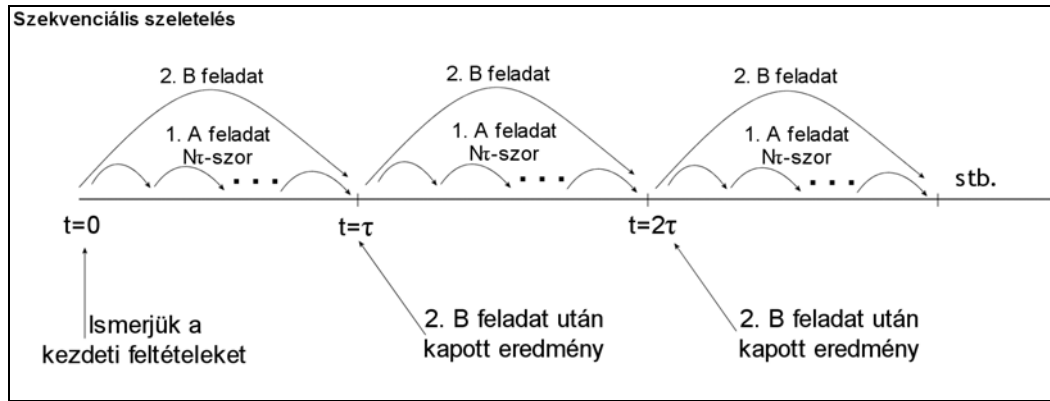
IIB. Most az **IB** feladatot oldjuk meg a megfelelő változtatásokkal:

$$\frac{\partial u_2^{(2)}}{\partial t} = \frac{\partial^2 u_2^{(2)}}{\partial x^2} \quad \tau < t < 2\tau$$

$$u_2^{(2)}(x, \tau) = u_1^{(2)}(x, 2\tau) \quad x \in (0,1)$$

A $t = 2\tau$ -beli megoldása: $u_2^{(2)}(2\tau) = u_{sp}(2\tau)$

Az így felépített $u_{sp}(n\tau)$ a feladat szeletelt megoldása a rácshálón (2. ábra).



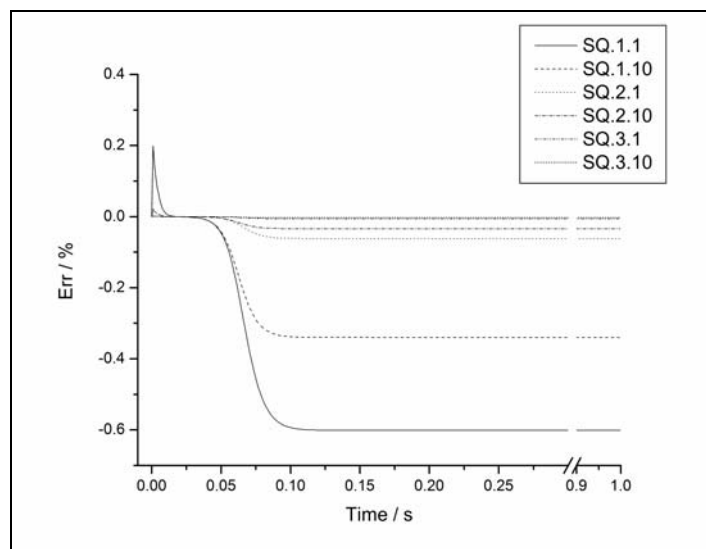
2. ábra. A szekvenciális szeletelés alkalmazása

Numerikus kísérletek

A numerikus kísérletek során három különböző időlépcsővel és két különböző szeletelési lépésközzel számoltunk, ennek megfelelően a 1. táblázat tartalmazza a modellek numerikus paramétereit. A futtatásokat konstans terheléssel ($I(t) = 1 \text{ Acm}^{-2}$) végeztük, a relatív hibát pedig egy megfelelően kicsi időlépcsővel (10^{-6} s) számított eredményekhez képest értjük.

1. táblázat. A numerikus modellek paramétereit

Jelölés	Időlépcső / s	Szeletelési lépésköz
SQ.1.1	0,001	1
SQ.1.10	0,001	10
SQ.2.1	0,0001	1
SQ.2.10	0,0001	10
SQ.3.1	0,00001	1
SQ.3.10	0,00001	10



3. ábra. A szekvenciális szeletelés relatív hibája a fenti modellben

A 3. ábrán jól látható, hogy az időlépcső és a szeletelési lépésköz növelésével a pontos megoldáshoz képest csökken a relatív hiba nagysága. A hiba jellegét a tranzienis jelenségek okozzák, így mivel konstans terhelés mellett vizsgáljuk a relatív hibát, az egyensúlyi állapot elérése után ($\sim 0,1 \text{ s}$) az nem változik.

Összefoglalás

Mint azt a numerikus kísérletek is bemutatták az üzemanyagcellák makro homogén modelljére a szekvenciális operátorszeletelés rendkívül kis hiba mellett alkalmazható, így annak minden előnye kihasználható.

Hivatkozások

Kriston, Á., Inzelt, G., Faragó, I. and Szabó, T., 2010: Simulation of the Transient Behavior of Fuel Cells by using Operator Splitting Techniques for Real-time Applications. *Computers and Chemical Engineering*, 34, 339-348. doi:10.1016/j.compchemeng.2009.11.006

Faragó, I., Inzelt, G., Kornyik, M., Kriston, Á. and Szabó, T., 2008: Stabilization of a Numerical Model through the Boundary Conditions for the Real-time Simulation of Fuel Cells. *International Conference on Systems, Computing Sciences and Software Engineering. Innovations and Advanced Techniques in Systems, Computing Sciences and Software Engineering*, 489-494.

Csomós, P., Faragó, I. and Havasi Á., 2005: Weighted sequential splittings and their analysis, *Comput. Math. Appl.*, 50, 1017-1031.

www.fuelcell.hu – Az első magyar üzemanyagcella portál

NAGYSKÁLÁS ÓCEÁNI ÁRAMLÁSI JELENSÉGEK MODELLEZÉSE A KÁRMÁN LABORATÓRIUMBAN

Vincze Miklós

ELTE, Fizikai Intézet, Kármán Környezeti Áramlások Laboratórium,
Budapest, 1117, Pázmány Péter sétány 1/a
e-mail: vincze.m@gmail.com

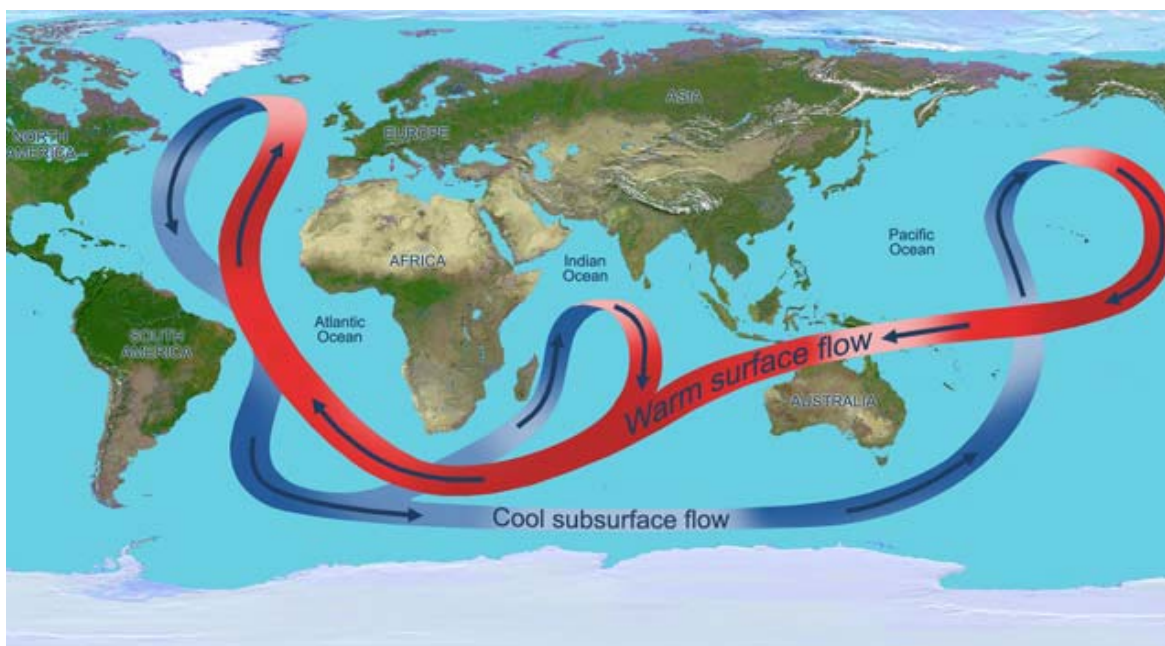
Bevezetés

Az ELTE Fizikai Intézetének Kármán Laboratóriumában folyó kutatásaink célja geofizikai skálájú légköri és óceáni jelenségek kísérleti modellezése. Az ilyen rendszerekben az egyik leglátványosabb különbséget az emberi léptékű áramlásokhoz képest a Föld forgása következtében fellépő Coriolis-erő dominanciája jelenti. A Coriolis-erő és a meridionális hőmérséklet-különbség együttes jelenléte alapvetően meghatározza a mérsékelt égövi időjárási rendszer jellegét; az ezt demonstráló klasszikus laboratóriumi kísérletek iskolapéldája az 50-es években ismertté vált Fultz-féle forgómedencés elrendezés (pl. *Gyüre et al., 2006*). A Kármán laborban jelenleg folyó egyik kutatási programban, melyet az alábbiakban bemutatok, az Észak-Atlanti óceán vízkörzésében jelentkező, több évtizedes skálájú változékonyság, az AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation) kísérleti „reprodukcióját” tűztük ki célul, egy hasonlóan egyszerű minimál-modell segítségével.

Az óceáni vízkörzésről dióhéjban

A világoceán áramlási rendszerét két részre oszthatjuk: a szél-hajtotta, és a sűrűségkülönbség-hajtotta vízkörzésre. Az előbbi esetében a vízfelszín fölött fújó szél nyíró hatása hajtja az óceáni víztömegeket, és jórészt ez felelős az ismert felszíni áramlási kép (így például a Golf-áramlás) szerkezetéért. A sűrűségkülönbség-hajtotta cirkulációt ezzel szemben az óceánba érkező édesvíz- és hőáramok mozgatják, melyek lokálisan megváltoztatják a felszíni vízréteg sűrűségét, és ezzel a stabil rétegzettség kialakítására törekvő mozgásokat indítanak be. A vízkörzés ezen komponense a nemzetközi szakirodalomban Termohalin Cirkuláció (THC) néven ismert, melyben a termo- (Θερμό-) görög előtag a hőmérsékletre, a halin- (άλας, [h]álasz = só) pedig a sótartalomra utal. Fontos megjegyezni, hogy míg a szél-hajtotta vízkörzés csupán a felszínközeli réteg mozgása, addig a sűrűségkülönbség-hajtotta áramlások az óceán teljes mélységére kihatnak. Így a THC felelős bolygónkon a legnagyobb mértékű víztranszportért; a becslések szerinti hozama hússzor több mint a Föld összes folyójáé együttvéve és kicsit nagyobb, mint a csapadékképződés során adott idő alatt globálisan megmozgatott teljes vízmennyiség (pl. *Czelnai, 1999*).

A THC vázlatos szerkezetét, a „Nagy Óceáni Szállítószalagot” (Great Ocean Conveyor Belt) az 1. ábrán tekinthetjük át. Az egész körzés „motorja” lényegében az Atlanti-óceán északi része, amely az egyetlen olyan óceáni medence bolygónkon, ahonnan összességében több víz párolog ki, mint amennyi csapadék behullik. A párolgás következtében egy felszíni folyadékelem sótartalma az egyenlítő közelében olyannyira megnő, hogy amint az északi sarkvidék közelébe érkezik és lehűl, egészen a medence legaljáig süllyedhet megnövekedett sűrűsége miatt. Mivel a medence északról zárt, innen már kizárólag dél felé indulhat tovább az áramlás.



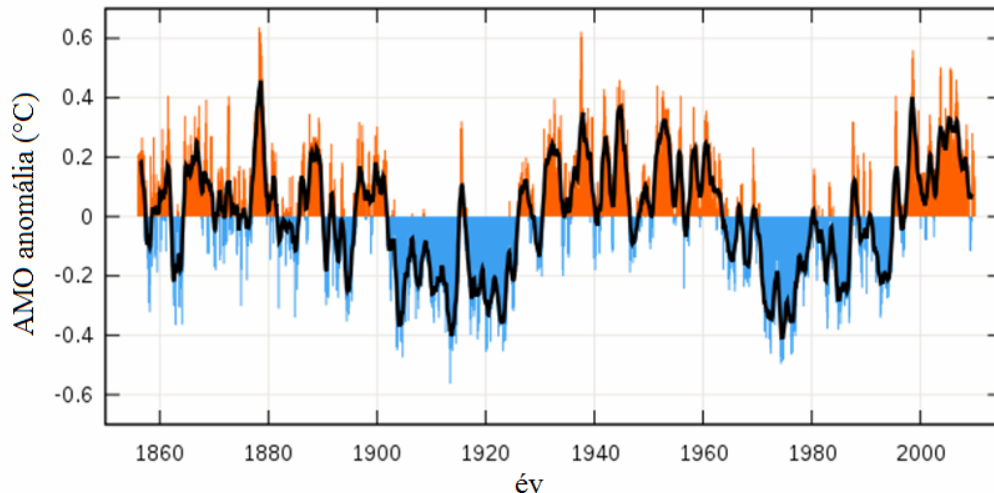
1. ábra. A Nagy Óceáni Szállítószalag (forrás: <http://physorg.com>)

A Több Évtizedes Atlanti Oszcilláció (Atlantic Multidecadal Oscillation - AMO)

A fentiek alapján látható, hogy a vízfelszíni hőmérséklet-eloszlás, mint peremfeltétel nagyban befolyásolja a THC vízhozamát. *Schlesinger and Ramankutty* (1994) munkája óta ismert, hogy az Észak-Atlanti medence felszíni vízhőmérsékletének területi átlagában, az általános melegedés mellett egy 65–70 éves periódusú oszcilláció is megfigyelhető a 19. század közepe óta rendelkezésre álló idősorok szerint. Így például a 20. század 40-es éveiben, valamint az elmúlt időszakban is (1995 óta), a medence átlaghőmérséklete magasabb volt, mint a „hideg” 70-es években. A jelenség Több Évtizedes Atlanti Oszcilláció (Atlantic Multidecadal Oscillation – AMO) néven vonult be a köztudatba (*Kerr*, 2000). *Enfield et al* (2001) az AMO állapotának számszerűsítésére bevezették az AMO indexet (AMOI), amely az Atlanti-medence Egyenlítőtől északra fekvő részére kiátlagolt, detrendált vízfelszín-hőmérséklet anomália idősorra vett tíz éves mozgó átlagolással kapható. Az AMOI adatsorát a 2. ábra mutatja.

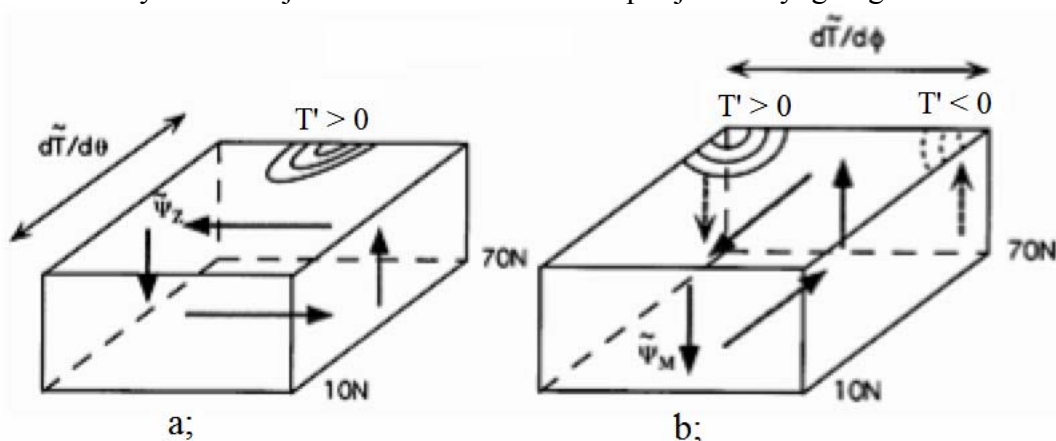
Egy ilyen tartós és nagy kiterjedésű hőmérsékleti anomália természetesen a környező szárazföldek időjárását is jelentősen befolyásolja. Egyértelmű korreláció mutatható ki például a Száhel-övezet nyári szárazsága, egyes észak-amerikai folyók vízhozama, vagy az indiai monszun csapadékmennyisége és az AMOI között. Az ilyen összefüggéseket felhasználva paleoklíma-kutatók egészen a 16. századig visszamenőleg beazonosítani vélik az AMO-nak megfelelő periódusú oszcilláció nyomait, például faévgűrű-adatokban (pl. *Fodor és Seres*, 2008).

Az oszcilláció emellett az észak-atlanti medence hőmérsékleti anomáliáinak térbeli mintázatában is tetten érhető. A pozitív AMOI-hoz (meleg időszak) Új-Fundland partjai környékén negatív, a medence többi részén pedig pozitív anomália társul, negatív AMOI érték esetén pedig ennek fordítottja áll elő.



2. ábra. Az észak-atlanti medence detrendált, havi vízfelszíni hőmérséklet anomáliája, illetve a 10 éves simítással nyert AMOI (vastag, fekete vonal). (Forrás: NOAA, Kaplan SST Data Set.)

Te Raa and Dijkstra (2002) egy egyszerű minimál-modell segítségével demonstrálták az AMO működésének egy lehetséges mechanizmusát. A modellben az észak-atlanti medencét egyenletes mélységű, négy oldalról szélességi és hosszúsági körök mentén húzódó függőleges falak által határolt szektornak tekintették. Ha egy pozitív felszíni hőmérsékleti perturbációt hozunk létre a medence északi részének közepén (3.a ábra), akkor az ezzel járó meridionális hőmérsékletgradiens-perturbáció – a geosztrofikus közelítés értelmében – egy zonális, keletről nyugat felé tartó felszíni áramlást hoz létre, mely a nyugati peremhez érve alul visszaáramlásra kényszerül. A perturbáció körüli kialakuló anticiklonális áramlás az anomália keleti oldalán dél felé hajtja a hideg, északi víztömegeket, a nyugati oldalán pedig észak felé a melegebb, délebbi vizet. Ennek hatására a meleg anomália nyugati irányba mozdul el, és a medence északkeleti részén megjelenik egy hideg anomália. Az így létrejövő zonális hőmérsékletgradiens (3.b ábra) egyúttal egy, a felszínen dél felé tartó áramlást is kelt, mely csökkenti a meridionális hőmérséklet-gradienst, és így lassítja, majd meg is fordítja a 3.a ábrán látható zonális körzést, mellyel kezdetét veszi az oszcilláció második félperiódusa. A modell értelmében az AMO periódusidejét tehát az határozza meg, hogy a felszíni hőmérsékleti anomáliák mennyi idő alatt jutnak át a medence keleti partjától a nyugatiig.



3. ábra: Az AMO minimál-modelljének sematikus vázlata. (Forrás: *te Raa and Dijkstra*, 2002)

Vegyük észre, hogy ebben az okfejtésben nem esett szó a víz sótartalmából adódó hatásokról, ám ezek figyelembe vételével a kvalitatív leírás lényegében nem változik, csupán hőmérsékleti anomáliák helyett általánosabban, sűrűség-anomáliákról kell beszélnünk.

Az AMO gerjesztése

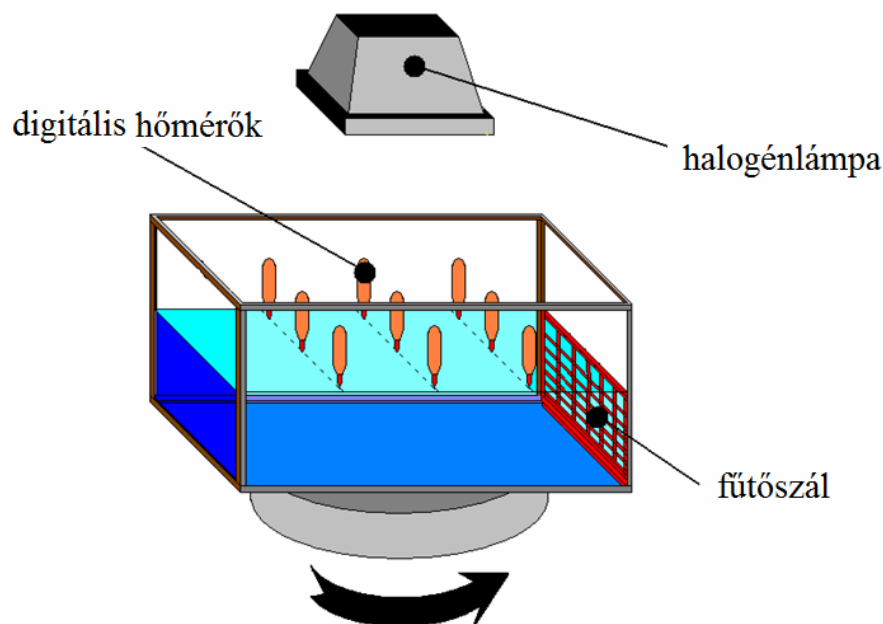
A fentebbi modellt megalkotó utrechti csoport azt is megvizsgálta, hogy az AMO-t előidéző felszíni hőmérsékleti perturbációkat milyen jellegű folyamatok gerjeszthetik (*Frankcombe et al.*, 2009). Egyenként 6000 évet átfogó szimulációikban a minimál-óceánt különböző időbeli és térbeli korreláltságú hőáram-„zajjal” hajtották meg, mely hozzáadódott a folyamatosan fenntartott, a földrajzi szélesség koszinuszával változó vízfelszíni hőáram-peremfeltételhez. Így modellezték az atmoszféra és az óceán közötti bonyolult kölcsönhatásokat.

Amennyiben semmiféle külső zajt nem adtak a modellbe, tehát csak a meridionális hőmérséklet-gradiens és a forgatás hatása jelentkezett, a valódi óceánra jellemző paraméterek mellett nem sikerült AMO-jellegű oszcillációt gerjeszteni. Azonban térben korrelált (a perturbálatlan hőáram-peremfeltétellel egyező, koszinuszos struktúrájú), különböző időskálájú fehér (időben korrelálatlan) zajokat adva a hőáram-jelhez, mindig sikerült kimutatni az AMO-t a modell óceán válaszában. A legmarkánsabb oszcillációt akkor kapták, amikor az Észak-Atlanti Oszcilláció Index (North Atlantic Oscillation Index – NAOI) klimatológiai idősorával megegyező, enyhén „vörös” spektrumú zajjal gerjesztették a rendszert.

Eredményük tehát úgy foglalható össze, hogy az észak-atlanti medencét egy végletekig leegyszerűsített, forgatott „doboznak” tekintve, melyben meridionális hőmérséklet-gradienst tartunk fenn, és a vízfelszíni hőmérsékletet emellett még egy tetszőleges, térben korrelált, „zajos” taggal is gerjesztjük, megjelenik az AMO-módus. Az oszcilláció lényegi magyarázatához tehát nincsen szükség olyan járulékos hatások ismeretére, mint a sótartalom vagy éppen az aljzati domborzat szerepe.

A kísérleti elrendezés

A Kármán Laboratóriumban azt tűztük ki célul, hogy az utrechti csoport eredményeit kísérletileg is igazoljuk egy forgómedencés elrendezésben, amelyet vázlatosan a 4. ábra mutat be. A forgóasztalra rögzített, téglalap alapú tartályba csapvizet töltünk, melyet a tartály egyik rövidebb oldalfalához rögzített fűtőszállal folyamatosan melegítünk, így hozva létre a háttéráramláshoz szükséges „meridionális” hőmérséklet-gradienst. A vízfelszíni hőmérséklet-értékeket kilenc, az ábrán látható módon elhelyezett digitális hőmérő adatainak másodpercenkénti kiolvasásával naplózzuk. Az utrechti csoport eredményei szerint kulcsfontosságú hőmérsékleti perturbációt egy, a kád fölé rögzített (de nem vele együtt forgó) halogénlámpa szolgáltatja, mely teljesítményének legnagyobb részét az infravörös tartományban adja le, így akár 1–2 Celsius-fokos anomáliákat is okozhat a vízfelszín hőmérsékletében. A lámpa ki-be kapcsolása tetszőleges program szerint, számítógépről vezérelhető.



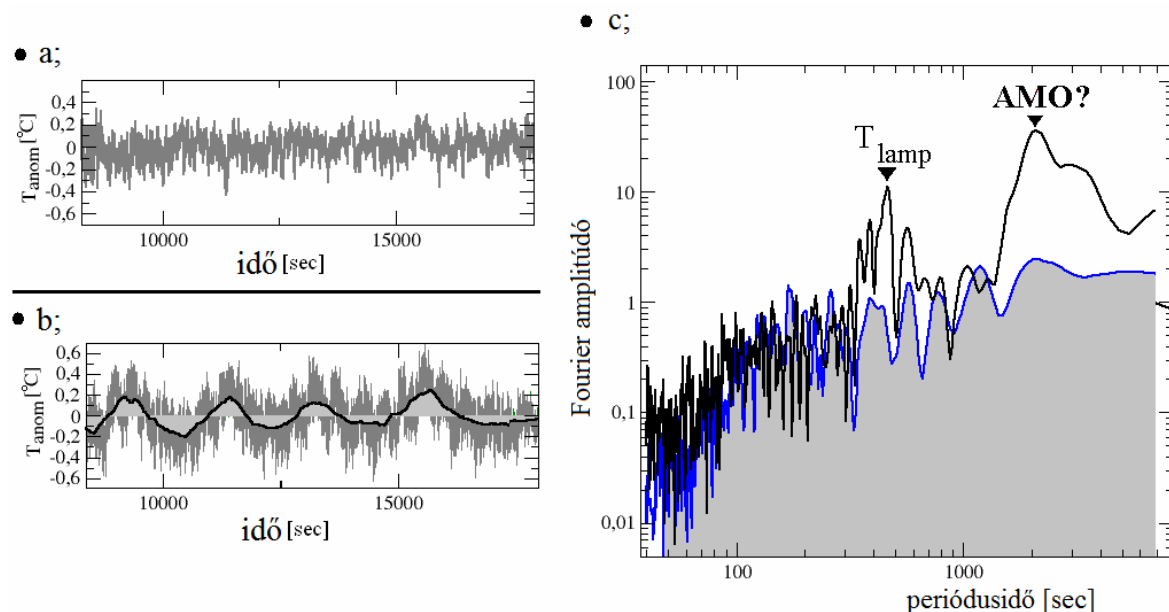
4. ábra. A kísérleti elrendezés sematikus vázlata.

Kísérleteink során a medence forgásának periódusidejét jellemzően mintegy 3 másodpercesre állítottuk, a lámpa ki- és bekapcsolása közti időtartamokat pedig egy 200 másodperces várható értékkel és 50 másodperces szórással jellemezhető Gauss-eloszlásból véletlenszerűen választotta a program. Nem forgatott kontrollkísérletek során megállapítottuk, hogy a lámpa bekapcsolását követően a vízfelszíni hőmérséklet jellemzően kb. 100 másodperces karakterisztikus idővel „relaxál”, azaz kerül az egyensúlyi hőmérséklet közelébe. Ez a három időskála jellemző tehát a kísérleti elrendezésre.

Előzetes eredmények

Az 5. ábra két kísérletünk során rögzített, a kilenc hőmérőre számolt átlaghőmérséklet-anomália idősort mutat; az 5.a egy olyan kontrollkísérlet során készült, ahol a lámpás melegítés nem működött, csupán a forgatás és a medence oldalsó fűtése határozta meg a dinamikát. Itt a jellemző időskálát tehát a forgatás néhány másodperces periódusideje állítja be. Az 5.b ábra idősora mutatja a lámpás gerjesztés bekapcsolásának hatását. Jól látható az átlagosan 400 másodperces periódusú anomália is, mely közvetlenül a lámpa kapcsolgatásának köszönhető, ám emellett igen markánsan megjelenik egy, mintegy 2000 másodperces oszcilláció is, mely egy nagyságrenddel nagyobb periódusidő, mint a fentebb tárgyalt gerjesztéseké. Az ábrán az idősor 81 másodperces mozgó átlagolással simított változatát is ábrázoltuk, melyen még markánsabban elkülönül az alacsonyfrekvenciás oszcilláció.

Az idősorok Fourier-spektrumait a 5.c ábra mutatja; jól megfigyelhető az oszcillációhoz tartozó egyértelmű csúcs, összehasonlítva a „zaj” nélküli kontrollkísérlet spektrumával. Az eddigi kísérleti eredmények tehát igazolni látszanak az utrecht csoport minimál-modelljéből származó feltételezést, hogy egy forgatott, meridionális hőmérséklet-gradiensnek kitett medence külső, magasabb frekvenciájú felszíni hőmérsékleti gerjesztés hatására egy alacsony frekvenciájú, AMO-jellegű módussal válaszol.



5. ábra. a; A lámpás „zaj” nélküli kontrollmérés detrendált átlaghőmérséklet-anomália időszora. b; A „zajos” mérés hasonló időszora, és a mozgóátlaggal simított változata. c; Az előbbi két időszor teljesítményspektruma.

Kitekintés

A bemutatott kísérletsorozat jelenleg is zajlik. További, lehetőleg minél hosszabb ellenőrző mérések szükségesek az AMO módushoz társított Fourier-csúcs részletesebb feltérképezéséhez. Dolgozunk továbbá a kilenc hőmérő jelein alapuló megfelelő vizualizációs eljárások is, melynek segítségével a 3. ábrához hasonlóan követhető lesz a hőmérsékleti anomáliák terjedése a medencében. Ezzel igazolást nyerhet, hogy valóban a *Dijkstra* és *te Raa* által leírt mechanizmus jelenik meg a laboratóriumi kísérletben is.

Hivatkozások

- Czelnai Rudolf: A világóceán, Vince Kiadó, Budapest, 1999.
- Enfield, D. B., Mestas-Nunez, A. M. and Trimble P. J., 2001: The Atlantic Meridional Oscillation and its relation to rainfall and river flows into the continental U.S., *Geophysical Research Letters*, 28., 2077–2080
- Fodor, Z. és Seres, A. T., 2008: Az Atlanti-óceán felszíni vízhőmérsékletének több évtizedes oszcillációja és hatásai az atlanti-európai térségre az elmúlt 60 évben., *Léggör*, 53. 2.
- Frankcombe, L. M., Dijkstra, H. A. and von der Heydt, A. S., 2009: Noise-induced multidecadal variability in the North Atlantic: Excitation of normal modes., *Journal of Physical Oceanography*, 39., 220-233
- Gyüre, B., Jánosi I., Szabó K. G. és Tél T., 2006: Környezeti áramlások és szemelvények a Kármán Laboratórium kísérleteiből: Kísérletek forgatott folyadékkal., *Léggör*, 51. 2.
- Kerr, R. A., 2000: A North Atlantic climate pacemaker for the centuries., *Science*, 288., 1984–1986
- Schlesinger, M. E. and Ramankutty, N., 1994: An oscillation in the global climate system of period 65-70 years., *Nature*, 367., 723-726
- te Raa, L. A. and Dijkstra, H. A., 2002: Instability of the thermohaline ocean circulation on interdecadal timescales., *Journal of Physical Oceanography*, 32., 138–160.

KERTÉSZETI KULTÚRÁK VÍZFOGYASZTÁSÁNAK MÉRÉSE

Juhász Ágota, Tőkei László

Budapesti Corvinus Egyetem Kertészettudományi Kar,
Talajtan és Vízgazdálkodás Tanszék
e-mail: agota.juhasz@uni-corvinus.hu

A cseresznyetermesztésben az optimális vízmennyiség biztosítása elengedhetetlen a kiváló minőségű, az európai piacokon előírt méretű gyümölcs előállításához. Ez teszi fontossá, hogy minél pontosabb ismeretekre tegyünk szert a cseresznyefák vízigényét illetően, különösen az intenzív ültetvények esetében. Számos környezeti tényező folyamatos megfigyelését igényli a víztakarékos, a növényi igényhez igazodó öntözés megtervezése. Ezek közül kiemelt információt jelenthetnek a növényi nedváramlás adatai, amelyeket kutatómunkánk során a nedváramlás mérő műszer (Dynamax, Flow32) segítségével mértünk. 2008-ban megkezdett méréseink egyik célja, hogy különböző alany-nemes kombinációk vízfogyasztását meghatározzuk, az öntözési költségek csökkentése érdekében, figyelembe véve az időjárási körülményeket. Intenzív ültetvény létrehozásakor a legmegfelelőbb vízfogyasztású alany-nemes kombináció kiválasztásával, komoly vízmegtakarítással számolhatunk, és akár állomány mikroklimáját is javíthatjuk.

Bevezetés

A cseresznyetermesztés versenyképességének egyik kulcskérdése a hozamokkal összhangban, a gyümölcsméret növelése. Ezen igényeknek ma már csak a megfelelő vízellátás hatékony biztosításával lehet megfelelni.

Az öntözési igények pontos tervezéshez és az optimális vízellátáshoz azonban nem áll rendelkezésre elegendő szakirodalmi adat és vizsgálati eredmény az egyes cseresznyefajták, alany-nemes kombinációk vegetációs időszakon belüli vízigényét illetően, intenzív ültetvényi környezetben. A gyümölcskultúrák vízigényének, illetve a meteorológiai körülményektől függő vízfelvétel megismerésének jelentőségét még inkább aláhúzza – a különböző termőhelyi adottságok mellett – a klímaváltozás következményének tekintett, olykor szélsőségesen alakuló időjárással járó csapadéktöbblet, vagy éppen az „égető” vízhiány. Az alanyok szerepére, a fák vízforgalmára vonatkozóan csak kevés adat, inkább feltételezések állnak rendelkezésünkre. *Atkinson et al.* (2003) almánál kimutatták, hogy a különböző alanytörzsek hidraulikus ellenállásában jelentős különbségek lehetnek. *Végvári et al.* (2008) a különböző cseresznyealanyok vesszőiben mutatott ki különbségeket a trachea-lumen relatív felületében, amely tényezők hozzájárulhatnak a különböző hidraulikus ellenállás kialakulásához.

A fent említettek szem előtt tartásával, kutatásunk célja, hogy feltárjuk a különböző növekedési erélyű alanyok vízfelvételét. Írásunkban a 2008. május, június, július, augusztusi időszak nedváram mérési eredményeit, valamint a kalkulált vízfogyasztási értékeit mutatjuk be.

Anyag és módszer

Vizsgálatainkat a Budapesti Corvinus Egyetem Soroksári Kísérleti Üzem és Tangazdaságában (tszfm.: 103 m, 47°22'58" Ész., 19°09'25" Kh.) végeztük, Érdi V., valamint Korponay sajmeggy magoncalanyra oltott 'Rita' egyedeken (1.táblázat). A kísérleti ültetvény 1250 fa ha⁻¹ egyedszámmal 4×2 méteres térállásban telepítettük 2004 tavaszán. A fákat alsó

vázkaros karcsúorsó koronaformával neveltük, magasságuk körülbelül 5 méter. A fák a vizsgálat során öntözéses vízpótlást, és egyéb kezelést nem kaptak. A Korponay alanyon a 'Rita' cseresznyefajta középérésű, míg az Érdi V. alanyon valamivel erősebb növekedésű fák adott, egy nagyobb egyedszámmal elvégzett termesztési értékvizsgálat során (Gyeviki *et al.*, 2009).

1. táblázat. A vizsgált fák adatai

Vizsgált fák	Törzskerület (cm)	Törzssugár (cm)	Törzskeresztmetszet (cm ²)
Érdi V./Rita 4/24	27,00	4,29	57,78
Érdi V./Rita 4/23	19,00	3,02	28,63
Korponay/Rita 4/8	22,00	3,50	38,46
Korponay/Rita 4/10	23,00	3,66	42,06

A xylém nedváramának mérésére a Dynamax Flow32 mérőeszközt használtuk (1. ábra). A módszer előnye, hogy a növény transzspirációját háborítatlan, természetes környezetében tudjuk mérni. A készülék a mérés során nem károsítja a fás – vagy lágyszárú növényeket (Dynamax, 1990.) Az időjárás napi és szezonális változásaira érzékenyen reagáló vízfelhasználás precízen meghatározható a „real-time” rendszerrel. Cseresznyefák különböző alany-nemes kombinációin elvégzett kísérletek szerint, a nedváram mérés módszere hatékony a különféle kombinációk eltérő vízigényének feltárására. A 15 perces adatrögzítéssel tökéletesen követhető és elkülöníthető az eltérő alanyok napi vízfelvételi üteme.

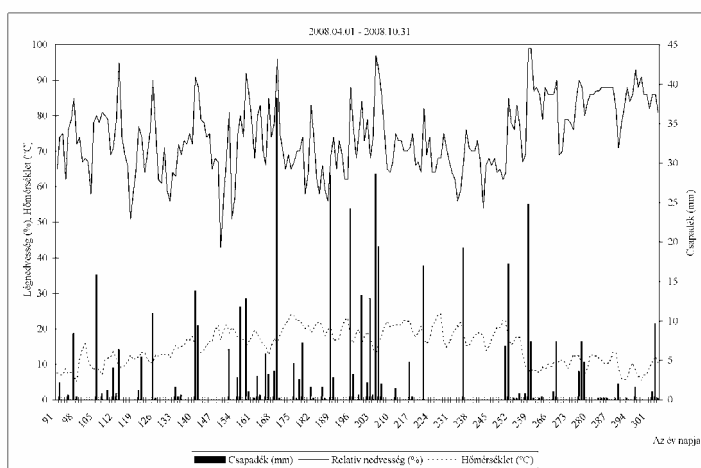


1. ábra. Nedváram mérő rendszer (Dynamax Flow 32)

2008. májustól augusztusig terjedő időszakban összesen 108 mintavételi adatunk van. A mérést a fák törzsén 40–50 cm magasságban elhelyezett szenzorokkal végeztük, amelyek így a törzsön átfolyó nedváramlást mérték. A mérés nappal és éjjel folyamatos volt – eltekintve a meghibásodásoktól – ami azt jelenti, hogy a műszer 15 percenként mérte és regisztrálta a törzsön átfolyó nedváram mértékét. Az adatokból a napi nedváramlás mértékét jellemző görbét szerkesztettünk, majd a görbe alatti területet kiszámítva meghatároztuk az egyes fák napi nedváramlását. Az azonos alanyú fák értékeiből kapott számtani átlag adja az egyes

alany-nemes kombinációk nedváramlási értékét. Abból kiindulva, hogy a törzsben mérhető nedváramlás tartalmazza a lombozat által elpárologtatott vizet, valamint a törzs feletti szervekbe beépülő szabad és kötött vizet egyaránt, a nedváramlást a fák vízfogyasztásával azonosítottuk. Ez a megközelítés természetesen számol azzal a hibával, hogy az így számított vízfogyasztás nem tartalmazza a mérési hely alatti testtömeg-gyapodáshoz (elsődlegesen gyökérzet) felhasznált víz mennyiségét.

Megfigyelésünk során regisztráltuk az állományban a léghőmérséklet, légnedvesség, csapadék (2. ábra), valamint 2008. június 25-től a talajnedvesség (30 cm és 60 cm mélyen) értékeit is, a globálsugárzási adatokat pedig az Országos Meteorológiai Szolgálatól kaptuk (*Időjárási Napijelentés*, 2008).



2. ábra. A hőmérséklet, a légnedvesség és a csapadék mért értékei

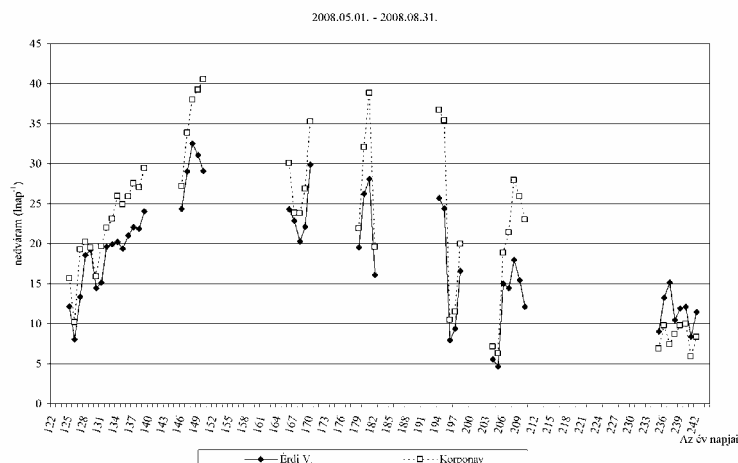
Soroksáron a mérési periódusban a relatív légnedvesség az országos átlagnak megfelelő tendenciát mutatott, vagyis lokálisan is átlag alattinak tekinthető. A havi középhőmérsékletek a vizsgált hónapokban nem múlták felül a sokévi havi átlagokat. Soroksár bővelkedett csapadéokban a megfigyelési időszakban, bár mennyiségi és időbeli eloszlása széles skálán mozgott, júniusban és júliusban az átlagnál több, májusban és augusztusban az átlag alatt maradt. 2008. május elejétől augusztus végéig négy hónap alatt 330,8 mm-nyi csapadék hullott le, ami megfelel egy egész vegetációs időszak csapadékhozamának. A csapadékhullás kitűnően követhető a talajnedvességi adatok megfigyelésével. Júliusban az intenzív esőzések után a beszivárgott vízmennyiség a 60 cm-es mélységben október közepéig 0,15 VV% feletti talajnedvességet biztosított.

Eredmények

A cseresznyefák vízfogyasztásának alakulása

Vizsgálataink alapján egyértelműen kimutatható a cseresznyefék vízfogyasztásának jellegzetes dinamikája a vegetációs időszak során (3. ábra), valamint a hasonló méretű, de különböző alanyú cseresznyefák közötti különbség. A mérés kezdeti időszakában, május első harmadában, a kétféle alany vízfogyasztása még nem tér el jelentősen egymástól. Mind az Érdi V., mind a Korponay alanyú fák vízfelvétele folyamatosan növekszik körülbelül 10 l nap⁻¹-ről 20 l nap⁻¹-ig. Május közepétől kezdődően fokozottabb fogyasztást mutatnak a fák, vagyis a májusi vízhiány mellett is nagy a vízfogyasztás mértéke, feltehetően a talaj vízkészletének rovasára. A vizsgálat időszakában a maximális vízfelvételi értékeket június második felében

kaptuk mindegyik alanyon. A hatodik hónapban vízhiány nem sújtotta az ültetvényt. Soroksáron a június bővelkedett csapadékban, összesen 105,8 mm-nyi hullott. Ez a mennyiség, valamint a talajban tárolt víz biztosíthatta a megnövekedett igény kielégítéséhez szükséges vizet. Június végétől kezdve kisebb mértékű visszaesést tapasztaltunk a 24 órás fogyasztások terén. Megjegyzendő, hogy az egyes alanyok közötti napi különbségek július végéig számottevőek voltak (2–6 liter). Miután a légnedvességi és hőmérsékleti adatok az ötödik hónapban várható átlagos értékeknek megfelelően alakultak, a zöldfelület növekedés, valamint a termésérés előtti intenzív vízfelvétel adhat magyarázatot a megemelkedett vízfogyasztásra.



3. ábra. Számított napi vízfogyasztási értékek a különböző alanyú fákon

Beigazolódott, hogy a különböző alanyokra oltott azonos fajtájú fák vízigénye eltérő, az alanyok jelentős hatást gyakorolnak a nedvzárlás szabályozására. Méréseink szerint a Korponay alanyú fák átlagos napi vízfogyasztása a vizsgálati periódus legnagyobb részében felülmúlta az Érdi V. alanyúak vízfelhasználását. A megfigyelési időszakunk során május befejező szakaszában jelentkezik nagyobb napi eltérés a kétféle alanyú fa vízigénye között. A közepes növekedési erélyű Korponay alanyú fák naponta, akár 5–6 literrel több vizet vesznek fel, mint az erősebb növekedésű, nagyobbra növő Érdi V. alanyúak.

Összefoglalás

Eredményeink alapján az 5. éves, termőre forduló Rita cseresznyefák vízfogyasztása a középerős és erős növekedésű sajmeggy magoncalanyokon május – augusztus hónapokban nem haladja meg a 340 mm-t területegységre számítva. Ez az adat ugyan nem az éves fogyasztást jellemzi, de nincs ellentmondásban *Hanson és Proebsting* (1996) és *Szűcs* (2003) álláspontjával, miszerint a cseresznyeültetvények éves vízigénye 700 mm csapadékkal rendelkező területeken kielégíthető. Fontos előrelépés, hogy mérhető adatokkal támasztjuk alá a cseresznyefák vízfogyasztására vonatkozó különböző nézeteket.

Kimutattuk, hogy a cseresznyefák vízfogyasztása jellegzetes trendet követ, májusban és júniusban jelentős vízigény mutatkozik, míg a későbbi hónapokban a bővelkedő csapadékelátottság ellenére is visszaesik a fák vízfogyasztási mértéke. Ez a jellegzetes trend megerősíti azokat a nézeteket, melyek szerint, a nyár második felében csak szükség esetén célszerű öntözni (*Szűcs*, 2003). Ekkor ugyanis a levélfelület sem növekszik és termés sincs a fákon. Az ültetvény májusi általános állapotából ítélve a májusi időszak vízhiányát a fák az

előző évi vízkészlet felhasználásával pótolták. Ezzel szemben a júliusi–augusztusi hónapokban a relatív csapadékbőség mellett is csökkent a fák vízfogyasztása.

Eredményeink alátámasztják azt az új megállapítást, hogy a különböző sajmeggy magoncok között is jelentős különbségek alakulhatnak ki a vízfogyasztás mértékében. A középerős növekedési erélyű Korponay alanyú fák átlagos vízfelvétele a megfigyelési időszak során végig meghaladta az Érdi V. alanyú, erősebb növekedésű fák vízszükségletét. Ha elfogadjuk, hogy az egyébként valamivel kisebb koronát nevelő Korponay alanyú fáknál az egységnyi törzskeresztmetszeten áthaladó nagyobb nedváramlást nem okozhatta a fák nagyobb levélfelülete, a különbség okát feltehetően a gyökér és a törzs kisebb hidraulikus ellenállásában kereshetjük. Hasonló jelenségre utalnak *Atkinson et al.* (2003) által almánál elvégzett vizsgálatok.

Hivatkozások

- Atkinson, C. J. Else, M. A. Taylor L., and Dover, C. J., 2003: Root and stem hydraulic conductivity as determinants of growth potential in grafted trees of apple (Malus pumila Mill.), Journal of Experimental Botany, Vol. 54, No. 385, pp. 1221-1229.*
- Dynamax, 1990: Dynagage TM Installation and Operation Manual, Dynamax, Houston, TX, USA. P. 80.*
- Gyeviki, M., Magyar, L., Bujdosó, G., Szügyi, S. and Hrotkó, K., 2009: Evaluation of Hungarian Mahaleb rootstocks with new sweet cherry cultivars, 6th ISHS International Cherry Symposium, Renaca Vina del Mar, Chile Book of Abstracts, 149.*
- Hanson, E.J. and Proebsting E.I., 1996: Cherry Nutrient Requirements and Water Relations. In Webster and Looney (Eds.): Cherries : crop physiology, production and uses, CAB International, pp. 243-257.*
- Időjárési Napijelentés, 2008: Országos Meteorológiai Szolgálat*
- Szűcs E., 2003: Cseresznye- és meggyültetvények tápanyag-gazdálkodása, talajművelése és vízgazdálkodása, (in Hungarian) In Hrotkó (Ed.) 2003. Cseresznye és meggy, Mezőgazda Kiadó, Budapest. 308-337.*
- Végvári, G.Y., Hrotkó, K., Magyar, L., Hajagos, A. and Csigai, K., 2008: Histological investigation of cherry rootstocks, Acta Hort. (ISHS) 795:339-34*

MIÉRT NEM LESZ ELÉG A JÖVŐBEN A HOKEDLIRE FELÁLLNI, HA JÖN AZ ÁRVÍZ?

Csík András

VITUKI Országos Vízelző Szolgálat
e-mail: csika@vituki.hu

A Vízelző Szolgálat története

Az egykori és a mai Magyarország földrajzi helyzete és vízrajzi adottságai egyértelműen meghatározták és természetesen ma is meghatározzák a hidrológia szerepét és fontosságát. Az ország a Duna vízgyűjtőjének és a Kárpát-medencének közepén helyezkedik el. Síkvidéken a környező magas hegyekből lezúduló árvizek elleni védekezés, a száraz időszakokban pedig a kisvízi készletekkel való ésszerű gazdálkodás, a víz ellen és a vízért való küzdelem jellemezte azt a több mint egy évezredet, amelyet a magyarság a Kárpát-medencében ezideig eltöltött.

Az első dunai árvízi feljegyzés 1012-ből való, mely árvíznél „számtalan ember, barom és épület veszett oda”. A legrégebbi vízállás-feljegyzéseink az 1693/94 évi árhullámról vannak. A vízállások rendszeres észlelése a Dunán 1823-ban a pozsonyi és a budai, a Tiszán pedig 1833-ban a szegedi vízmércén indult meg. A Kiegyezés időszakában már 57 helyen folyt rendszeres vízállás-észlelés. Hamarosan megindult a vízállások közlése az érdekeltek számára, vagyis a vízelzés, a Tiszára már 1856-ban – egyelőre csak árvizek idején – de 1886-tól már naponként küldték szét a vízállásokról szóló értesítést. A Vízelző Szolgálat 1892. március 1-én kezdte meg működését, kezdetben csak a Tisza-völgy vízállásaira vonatkozóan, majd rövidesen Országos Vízelző Szolgálatként alakult át. Az I. Világháború után Magyarország vízgyűjtőterületeinek egysége megszűnik, a folyók vízgyűjtőterületének jelentős hányada idegen országok területére kerül át. Ez a tény jelentősen visszaveti az Országos Vízelző Szolgálat fejlődését. 1921-ben megalakul a Nemzetközi Duna Bizottság, majd 1924-ben a Duna-medencében a Nemzetközi Vízelző Szolgálat is, amely keretében meghatározzák a dunamenti országok közötti adatsere tartalmi és formai kérdéseit.

Szervezetileg az Országos Vízelző Szolgálat az 1929-től létrejött Vízrajzi Intézet keretein belül működik, majd kisebb vargabetűk után 1952-ben megalakul a Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet (VITUKI), amelynek változó formájú keretein belül az Országos Vízelző Szolgálat napjainkban is tevékenykedik.

Az Országos Vízelző Szolgálat feladata, tevékenysége

Az Országos Vízelző Szolgálat adatfeldolgozási tevékenysége során naponta összegyűjti, feldolgozza és közreadja Magyarország folyóinak vízjárását jellemző hidrológiai és vízgyűjtő területének hidrometeorológiai viszonyait jellemző meteorológiai adatokat. Ennek keretében az év minden napján mintegy 500 meteorológiai állomás, és 440 hidrológiai észlelőhely összesen hozzávetőlegesen hétezer adata kerül feldolgozásra. A Szolgálat összegyűjti és közreadja a hajózható folyók (elsősorban a Duna) gázlóviszonyainak adatait. Naponta elkészíti és közreadja a több mint száz éves múltra visszatekintő Napi Vízjárás Térképet. Felügyeli, és folyamatosan karbantartja a beérkező adatok archiválása révén előálló Operatív Hidrometeorológiai Adatbázist (OPADAT) és az Országos Vízrajzi Adattárat a Duna Bizottság ajánlásának megfelelően, ezen felül a dunamenti országokkal lebonyolítja a napi hidrológiai adatszerét.

Az OVSZ előrejelzési tevékenysége során folyamatosan figyelemmel kíséri és elemzi a Duna-medence hidrometeorológiai helyzetének alakulását, beleértve a hófelhalmozódás és -olvadás bonyolult folyamatainak a nyomon követését is. A Duna, a Tisza, illetve a Dráva-

Mura vízrendszerének összesen 77 szelvényére naponta előrejelzi a vízjárás, illetve a főbb folyószakaszokra a jégjárás várható alakulását, árvíz idején (a területileg illetékes Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóságokkal együtt) működteti az árvízjelző szolgálatot. Árvíz idején naponta elkészíti és közreadja a Rendkívüli Hidrometeorológiai Tájékoztatót, amelyben részletesen összefoglalja és elemzi az árvíz által érintett vízrendszer aktuális és várható hidrometeorológiai helyzetét. Minden év március 1-jén kiadja a Tavaszi Lefolyási Tájékoztatót, amelyben becslést ad a Duna és a Tisza tavaszi időszakban várható lefolyási viszonyaira.

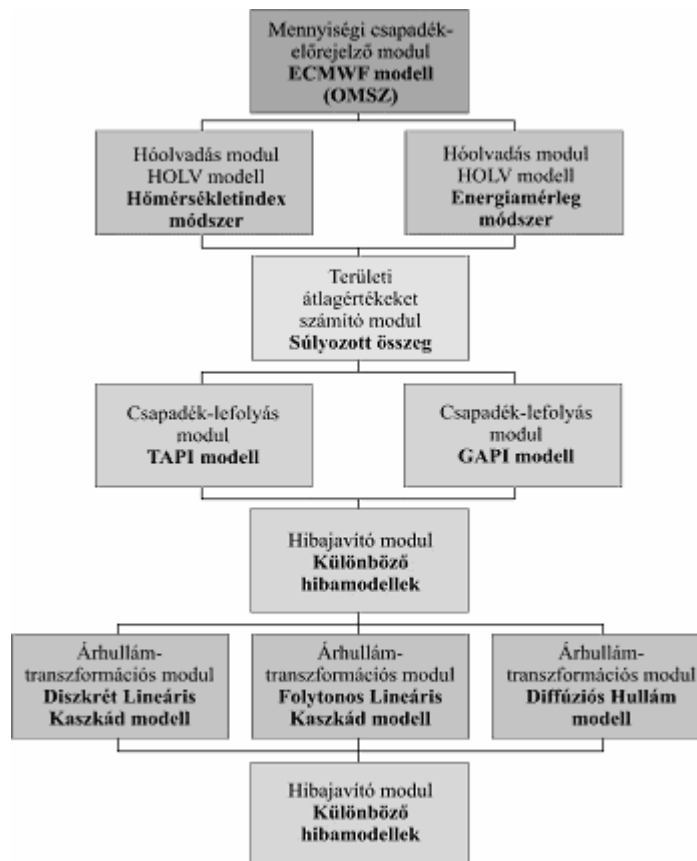
Az OVSZ nemzetközi tevékenysége során, az alkalmazott hidrometeorológiai adatfeldolgozó és előrejelző rendszer kifejlesztése és üzemeltetése során felhalmozódott bőséges szakmai tapasztalat, és a rendelkezésre álló adatháttér felhasználásával részt vesz különböző hazai és nemzetközi együttműködésekben, illetve projektekben, például az utóbbi időszakban fokozatosan teret nyerő, klímaváltozással foglalkozó programokban is.

Az előrejelzési módszertan és alkalmazhatósága éghajlatváltozással kapcsolatos kérdésekben

A VITUKI Országos Vízjelző Szolgálat lefolyás-előrejelző rendszere tulajdonképpen egy elemekből felépített modellrendszer. A lefolyási folyamat bonyolult rendszerén elkülöníthető részfolyamatok modelljei az ún. funkcionális modulok. Ezek a hidrológiai részfolyamatok (pl. a hófelhalmozódás és -olvadás, vagy a lefolyási komponensek) számítására alkalmasak és tetszőleges, a felhasználó által megadott struktúrájú vízgyűjtőn alkalmazhatók (*Gauzer és Bartha*, 2001). A rendszer funkcionális moduljait és azok egymáshoz történő kapcsolódását az 1. ábra mutatja be.

Kiemelve az árhullám-transzformációs modult, az ebben jelenleg használt Diszkrét Lineáris Kaszkád modell (DLCM) a Saint-Venant egyenletrendszer egyfajta numerikus megoldása. A Saint-Venant egyenletrendszer a Navier-Stokes egyenletrendszerből származtatható, azzal a feltevessel, hogy a közeg horizontális méretéhez képest a vertikális kiterjedése elhanyagolható, mely közelítés helyes mivolta egy folyó esetében könnyen belátható. A DLCM mellett számos más numerikus megoldás is létezik, azonban az OVSZ az egyszerű fizikai megfeleltethetőség és a gyors számíthatóság miatt ezt a modellt választotta a mederbeli vízmozgások előrejelzésére. Ahhoz, hogy az előrejelzőrendszert az éghajlatváltozással kapcsolatos kérdések megválaszolására is fel tudjuk használni, az 1. ábra legtetőjén látható Mennyiségi csapadékelőrejelzés modult ki kellett cserélni a klímamodellek szolgáltatta klímaszcenáriók több évtizedre előrejelzett csapadék- és hőmérsékletbecslésire. Ily módon az operatív (a normál, naponta készített többnapos időelőnyű előrejelzés) üzemmódból a szimulációs üzemmódba kapcsolt előrejelzőrendszer ezeket a becsléseket felhasználva alkalmassá vált a jövőben várható vízjárás modellezésére.

Az OVSZ az elmúlt években fogott bele az ezirányú kutatásokba, évről évre egyre több tapasztalatot szerezve a klímakutatás hidrológiai vonatkozásában. Példaként említhető a tavaly lezárult, az Európai Unió kezdeményezésére, a VI. keretprogram részeként megvalósult CLAVIER projekt, amelyben a várhatóan bekövetkező éghajlatváltozás Közép- és Kelet-Európára gyakorolt hatását igyekeztek a projektben résztvevők a 2020–2050 időszakra meghatározni. Az OVSZ a várható vízjárási viszonyokat a vizsgált időszak több évtizednyi hossza miatt jelentős számításigényű futtatásokkal becsülte meg, különböző statisztikai számítások segítségével próbálta leírni, majd ezt követően választ adni arra, hogy a következő évtizedekben az árvizek gyakoribbá válnak-e, esetleg az eddigieknél magasabb szinteken tetőző árhullámok lesznek-e jellemzőek. A projektben végül az nyert megállapítást, hogy míg a téli árvizek gyakorisága megnőhet (a hevesebb árhullámok száma akár számottevően is gyarapodhat a vizsgált területen), addig a hosszán elnyúló és nagy víztömeggel rendelkező árhullámokból kevesebbre számíthatunk.



1. ábra. Az OVSZ előrejelző rendszerének felépítése

A következő néhány év projektjei

Az OVSZ nemzetközi projektek partnereként a klímakutatás hidrológiai vonatkozású kérdéseire próbál meg választ adni, és jelenleg is több nemzetközi kutatási projekt résztvevője. Példaként lehet említeni az ECCONET nevű, az Európai Unió kezdeményezésére indult projektet, ahol a különböző szakterületek – úgymint a meteorológia, a hidrológia, a szállítmányozás, a közgazdaságtan – neves képviselői és szakértői közösen hoznak létre egy lehetséges, a jövőben követendő irányvonalat a folyami hajózhatóság fenntarthatósága, annak a társadalom minél hatékonyabb kiszolgálása érdekében. Ebben a VITUKI és azon belül is az OVSZ arra vállalkozott, hogy egy, vagy több, a meteorológusok által kiválasztott, jellemzően a 21. század második felére becslést adó klímaszcenárióra támaszkodva ugyanezen időszakra meghatározza a Duna magyarországi és osztrák szakaszainak várható vízjárását. A projekt a vízjárással kapcsolatos kutatások fő irányvonalától, azaz az árvizek vizsgálatától inkább a kisvízi időszakok vizsgálata felé tolódik el. A projektben résztvevő hajózási mérnökök ugyanis az OVSZ által becsült vízjárási viszonyokra alapozva modellezik, hogy milyen hajótípusokat és logisztikai megoldásokat alkalmazva lesz a jövőbeli folyami szállítmányozás a leginkább költséghatékony.

Ezen többéves projekttől természetesen nem azt várjuk (nem is várhatjuk), hogy egy naptár jöjjön létre, amiből kiolvasható például, hogy 2061. június 13-a és 28-a között hány centiméteres lesz a vízállás a Duna főbb vízmércéin, és látva, hogy árvíz, vagy éppen kisvízi időszak közeledik, nem terveznek arra az időszakra vízi szállítást, hanem azt, hogy valamiféle irányt mutasson az akár több évig is eltartó esetleges mesterséges beavatkozások megalapozására, legyen szó akár a gázlókkal teletűzdelt alföldi szakasz mederkotrásáról vagy

vízlépcső építéséről, mellyel egész évben, az év minden egyes napján biztosítható a Duna Bizottság ajánlása szerinti 27 deciméteres vízmélység a hajózó út teljes szélességében. A jövőt nagymértékben befolyásoló döntések felelősségteljes meghozatalakor a műszaki megoldások mellett ugyanolyan hangsúlyt kell fektetni – ha nem nagyobb – a természet, a környezet állapotának védelmére is. Csak egy példaként megemlítve a mederkotrásból nagy valószínűséggel bekövetkező medersüllyedést, mely maga után vonja a folyó menti területek talajvízszintjének süllyedését, ezáltal a területen honos növényzet összetételének jelentős megváltozását, szélsőséges esetben annak eltűnését, elsivatagosodást idézve elő.

Az OVSZ egy másik, jelenleg futó projektje a DMCSEE elnevezésű együttműködés, amely Dél-Kelet-Európa egészének aszályal fenyegetettségét igyekszik könnyebben kezelhetővé tenni egy aszályközpont létrehozásával. Ebből a több mint 10 országot is felvonultató kutatási munkából az OVSZ a következő évtizedek téli időszakainak hófelhalmozódás, és -olvadásmodellezésével veszi ki a részét. A jelenlegi – a Duna vízgyűjtőjének a magyarországi alsó határszelvényekig tartó – modellezési terület kiterjesztésével egyrészt jelentős tapasztalatra tesz szert a hazánk éghajlati viszonyaitól eltérő körülmények vizsgálatával, másrészt értékes hozzájárulást nyújt a projekt céljait elérendő.

A fejlődés lehetséges útjai

Csak csemegézve a jövő jelenleg látható fejlődési irányából, a következő években az OVSZ-ben operatív módon alkalmazott előrejelző rendszer moduljainak pontosítása, fejlesztése (a Saint-Venant egyenletrendszer újfajta megoldási megközelítése), új modulok bevezetése (gondolva itt a legutóbbi júniusi árvíz során üzembehelyezett tiszaroffi vésztározóra, ahol a mederből vízkivezetés történt), a hirtelenárvizek modellezése, előrejelzése, a hidrológiai ensemble előrejelzés módszertanának minél kifinomultabb megfogalmazása és gyakorlati alkalmazása említendő, melyek közül nem egy úttörő kutatást is jelent nemcsak hazánkban, de nemzetközi téren is.

Összefoglalva, a VITUKI keretien belül működő Országos Vízjelző Szolgálat a jövőben várhatóan a fentebb említett kutatási területeken tudja elképzelni a leendő meteorológus hallgatókkal történő együttműködést, többek között – és a jelen nyári iskola célkitűzéseit szem előtt tartva – diplomamajavaslatok, témavezetés formájában, de megfelelő érdeklődés esetén nem zárkozik el a közös munka más formájától sem.

Hivatkozások

Gauzer B. és Bartha P., 2001: Árvízi szimulációs vizsgálatok a Tisza Tokaj-Szeged közötti szakaszán. Vízügyi Közlemények, LXXXIII. évf., 4. füzet., pp.512–537.

<http://www.hydroinfo.hu>

<http://www.clavier-eu.org>

<http://www.tmleuven.be/project/ecconet/>

<http://www.dmcsee.org/>

MINI RADAROK METEOROLÓGIAI ALKALMAZÁSAI

Dombai Ferenc

Országos Meteorológiai Szolgálat
e-mail: dombai.f@met.hu

Bevezetés

Az utóbbi években egyre gyakrabban találkozhattunk a szakirodalomban a kisköltségű (5–30 ezer Euró), kisteljesítményű, 3 cm-es hullámhosszon (továbbiakban X sávban) működő radarok meteorológiai alkalmazásairól szóló leírásokkal. Bár ezek az alkalmazások nem tekinthetők elvben újaknak, mert pl. az első Magyarországon üzembe helyezett meteorológiai radar, a BWR-X12 is egy átalakított hajófedélzeti lokátor volt, a típusaik és az alkalmazásaik egyre szélesedő köre, valamint újabb hazai megjelenése miatt érdemesnek tartottuk a lehetőségeik és korlátaik taglalásával egy rövid áttekintést adni jelenlegi meteorológiai alkalmazásaikról ezen dolgozat keretei között. A téma aktualitását jelzi, hogy a EUMETNET OPERA, az operatív meteorológia radar hálózatok projektje is felvette tanulmányozandó témái közé.

A radar méréseink a meteorológiai radaregyenlet (1) alkalmazásán alapulnak, ami kapcsolatot teremt a radar műszaki jellemzői (P_I , impulzusteljesítmény, G_M - antenna erősítése, τ - impulzus hossza, λ - hullámhossz), a detektált sugárzás mért paraméterei (P_{vett}) és a meteorológiai célok fajlagos jellemzői között. A mérések eredménye a tér különböző pontjaira vonatkozóan tipikusan a meteorológiai célok reflektivitási tényezője, a Z (mm^6/m^3), ami *egységnyi térfogat*, 1 m^3 reflexiós paramétere. A meteorológia radaregyenlet, amely mérőeszközzé (!) teszi a radart, alkalmazása több feltételhez kötött. Ezek közül a legfontosabbak a.) a reflexiót adó részecskék méretei a hullámhossznál jelentősen kisebbek legyenek (Rayleigh szóródás); b). a radar nyalábja az impulzus hosszának megfelelően egyenletesen legyen kitöltve azonos méreteloszlású cseppekkel. Ezen feltételeket csak elegendően szűk nyalábszélességgel lehet teljesíteni. A „b” feltétel azt is jelenti, hogy a radartól távolodva négyzetesen növekszik a visszaverő részecskék száma, így a vett jel a kiterjedt meteorológiai cél fajlagos jellemzőjével egyenesen, míg a *távolság négyzetével* fordítottan arányos.

$$P_{vett} = \frac{P_I \cdot G_M^2 \cdot c \tau \cdot \Theta^2 \pi^3 |K_i|^2}{4^5 \ln 2 \lambda^2} \cdot \frac{Z}{R^2} \quad (1) \quad P_{vett} = \frac{P_I G_M^2 \lambda^2}{(4\pi)^3} \cdot \frac{\sigma}{R^4} \quad (2)$$

A nem meteorológiai radarok mérései az általános radaregyenleten alapulnak (2), amely kapcsolatot teremt a radar műszaki jellemzői, a detektált sugárzás mért paraméterei és a céltárgy reflexiós keresztmetszete, σ között. Alkalmazásának feltétele, hogy a radarnyalábhoz képest elhanyagolható méretű tárgy okozzon visszaverődést. Általános radaroknál a vett jel a reflexiós keresztmetszettel egyenes, míg a *távolság negyedik* hatványával fordítottan arányos. Ez utóbbit a sugárzás intenzitás távolság négyzetével való csökkenése magyarázza, amit persze az oda-vissza útra kell számítani.

A MINI meteorológiai radarokról

A MINI meteorológiai radarok tipikusan az X sávban működnek, aminek két alapvető oka van. Egyik az, hogy a geometriai méretek azonos sugárzási karakterisztikák mellett kisebbek lehetnek, a másik az, hogy nagyszámú, nem meteorológiai célú hajó és repülőgép fedélzeti X sávú radart gyártanak, ami a technológiai költségek radikális csökkenését eredményezi. Míg meteorológiai radarból évente csak néhány tucatot gyártanak, úgy e radarokból évente százazrekre tehető darabszámot. A legismertebb hajó-radar gyártók a Furruno, a Koden, a Raymarine, a SITEX, a Selesmar és a Garmin. A repülőgép fedélzeti radarok ismertebb gyártói a Bendix, a Collins és a Lockheed.

Tekintettel arra, hogy ezen radarokat nem meteorológiai mérésekre tervezték, ezek csak kisebb-nagyobb átalakításokkal alkalmazhatók ilyen célokra. Ezen átalakítások két fő elemet érintenek általában:

- az antenna rendszert: a hajók imbolgató mozgásának kiegyenlítése miatt vertikálisan igen széles, 20° – 25° –os nyalábban sugároznak, amit az ún. réselt csőtápvonalas, „rúd” antennákkal érnek el. Ez a karakterisztika rendkívül előnytelen meteorológia méréseknél, ezért kisméretű parabola antennára szokás cserélni. (Ilyen megoldást alkalmaznak a METEK, WRX10 típusú MINI radarok gyártói.)

- A vevőrendszert: a meteorológia célokhoz képest igen nagy, de kisebb változatossággal bíró reflexiós keresztmetszetekre optimalizált eredeti vevőkis dinamikával rendelkeznek, és a bemeneti jelre lineáris választ adnak (ez a repülőgép fedélzeti radarokra is igaz, mert csak 4 intenzitást kell megkülönböztetniük az ICAO szerint). Meteorológiai alkalmazás miatt általában lecserélik ezeket nagyobb dinamikájú, logaritmikus vevőkre. Ezzel együtt jár az A/D konverterek cseréje is, az eredeti 3–4 bites felbontás helyett meteorológiai célokra 8–12 bites szükséges a mintavételi elveknek megfelelően. (Lecserélik a vevőket a METEK, a LAWR, a WRX10 és a RAINSCANNER típusú MINI radarokat gyártók is.)

A meteorológiai MINI radarokat egyes esetekben teljesen új konstrukciókban is készítik. Ilyennek a CNRS - Francia Nemzeti Kutatási Központban kifejlesztett HYDREX megjelölésű Doppler dual-polarizációs X sávú mobil radar, és ebbe a kategóriába tartozik a delfti IRCTR - Nemzetközi Távközlési és Radar Kutató Központban kifejlesztett IDRA megjelölésű X sávú Doppler dual-polarizációs FMCW radar. Az IDRA kis teljesítményű, frekvenciában periódikusan modulált jeleket sugároz, majd egy másik antennával a visszaverődéseket detektálja és azok frekvencia spektrumát folyamatosan elemzi. Az ilyen radarok előnye, hogy nincs szükség költséges, nagyteljesítményű mikrohullámú elemekre. Az impulzusos és FMCW radarok egyenértékűnek tekinthetők, ha a kisugárzott jelek átlagos teljesítménye megegyezik. Egy 10 kW-os, 1 μ s, 1000 Hz impulzusos radarnak megfelel egy 10 W-os FM-CW radar.

A MINI meteorológiai radarok felderítő képessége és alkalmazásuk korlátai

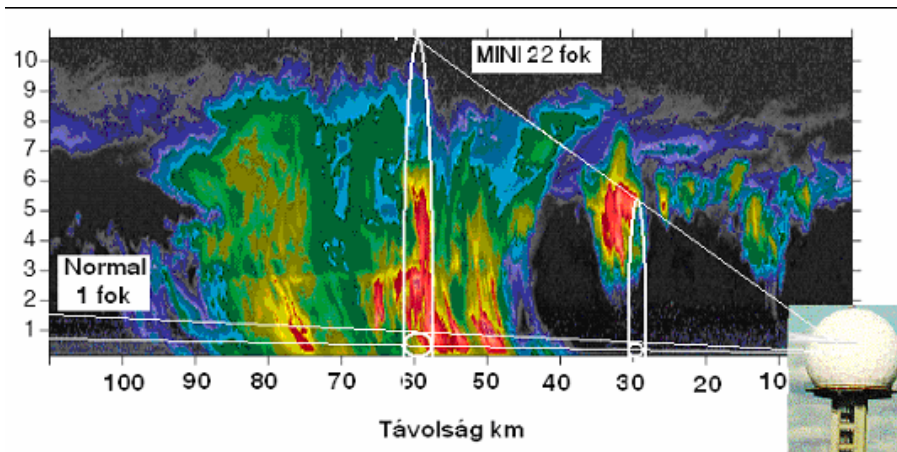
A különböző meteorológiai radarok felderítő képességét az határozza meg, hogy különböző távolságokban milyen intenzitású vagy sűrűségű felhő vagy csapadék rendszert képesek felderíteni. Ez természetesen alapvetően a műszaki jellemzőik függvénye, és a meteorológiai radaregységek alapján számítható ki. Az 1. táblázatban bemutatjuk több MINI radar és összevetésként a hagyományos meteorológiai radarok által 10 km és 50 km távolságban detektálható minimális reflektivitási tényező és csapadék intenzitás értékeit. A táblázatból látható, eltekintve a METEK csak a felhőzet vertikális profilját mérni tudó K sávú radarjától, hogy az X sávban a legnagyobb felderítő képességgel az OMSZ által korábban használt MRL5 radar rendelkezik. Ezt az USA NEXRAD radarja követi 10 cm hullámhosszon a hatalmas, 9,5 m-es antennájával és 1 MW teljesítményével. A NEXRAD a meteorológiai szolgálat (NWS), a légierő (USAF) és a légügyi hivatal (FAA) közös radar programjában került kifejlesztésre. A MINI radarok között a legjobb a delfti IDRA. Látható a táblázatból az is, hogy a kisméretű

parabola antennával (azonos nyílásszögek) felszerelt MINI radarok jellemzően jobb képességgel rendelkeznek, mint az eredeti „rúd” antennát megtartók.

Az X sávú MINI radarok meteorológia alkalmazásának két fontos korlátja van. Egyik a kisugárzott nyaláb szélességéből, a másik az X sáv csapadékban történő gyengüléséből származik. A nyaláb szélességét a meteorológiai objektum szerkezetéhez kell igazítani, ez általános mintavételi elvekből és a meteorológiai radar egyenlet alkalmazhatóságának feltételeiből származik. Igaz ugyan, hogy a hajófedélzeti radarok eredeti 20°–25°-os vertikális nyalábszélességének a felével kell számolnunk, mert az alsó fele a közeli talajcélok szétzóródik, azonban a maradék 10°–12° is igen nagy a meteorológiai célok vertikális szerkezetét tekintve. Az 1. ábrán illusztráljuk a különbséget egy hagyományos meteorológiai radar tipikusan 1°-os nyalábszélessége és egy „nem feljavított” antennájú MINI radar alkalmazhatósága között egy beágyazódott zivataros helyzetben.

1. táblázat. A különböző MINI radarok felderítőképessége

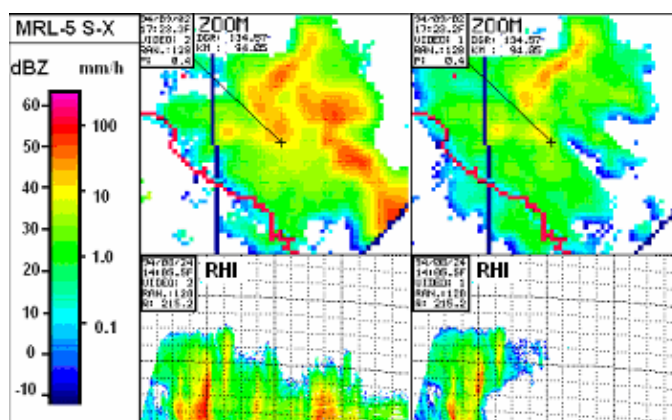
	Radar- állandó	dBZ 10 km	mm/h 10 km	dBZ 50 km	mm/h 50 km	Hullám- hossz	Teljesítmény kW	Horiz. szög	Vert. szög
METEK Cloud	-88	-28,2	0,001	-14,2	0,005	0,8	30	0,6	0,6
MRL-5X N	-89	-26,8	0,001	-12,8	0,006	3,2	250	0,5	0,5
NEXRAD	-97	-19,1	0,002	-5,1	0,018	10,6	1000	0,75	0,75
IDRA	-98	-18,5	0,003	-4,5	0,019	3,2	0,02	1,8	1,8
MRL-5X K	-99	-17,3	0,003	-3,3	0,023	10,6	750	1,5	1,5
EEC C	-99	-16,5	0,003	-2,5	0,025	5,6	250	0,95	0,95
MRL-5S	-104	-9,8	0,009	4,2	0,067	10,6	750	1,5	1,5
HYDREX	-110	-6,2	0,015	7,8	0,111	3,2	35	2	2
RAINSCNR Rud	-117	1,1	0,043	15,1	0,320	3,2	25	4	4
METEK XMWR	-118	1,8	0,047	15,8	0,353	3,2	12	3	3
LAWR1525	-118	1,9	0,048	15,8	0,356	3,2	25	0,95	20
RAINSCNR Par	-118	2,1	0,049	16,1	0,367	3,2	25	1	2
WR10X	-119	2,7	0,054	16,7	0,405	3,2	10	3	3
MMR42	-125	8,6	0,125	22,6	0,936	3,2	7	5	5
TORINO ALPS	-128	17,8	0,473	25,8	1,488	3,2	4	1,2	25
KODEN RPC	-128	11,9	0,202	25,9	1,511	3,2	5	1,85	20
LAWR	-132	16,1	0,367	30,0	2,748	3,2	4	4	20
TORINO RUR	-132	16,1	0,367	30,0	2,748	3,2	4	4	20



1. ábra. A radarok nyalábszélességének illusztrálása a megfigyelésekben

Az 1. ábrából látható, hogy kb. 10 km-es távolságon kívül már nem alkalmazható a meteorológia radar egyenlet (!), ezért annak alapján nem lehet reflektivitási tényező méréséről beszélnünk. Ez esetben a nyalábszélességhez képest elhanyagolható méretű, pontszerű célokra vonatkozó radaregyenletet kellene alkalmaznunk, ami m^2 -ben fejezné ki a zivatargóc teljes reflexiók keresztmetszetét. Bonyolítja a helyzetet, hogy ez viszont csak a vertikális kiterjedést tekintve igaz, a horizontálist tekintve nem, mert e síkban a 1° – 2° szélességű a nyaláb a meteorológia célhoz képest elhanyagolható, és így a térben folyamatosan kitáguló nyalábban a távolság második hatványának megfelelően egyre több lesz a visszaverő részecske, ezért nem alkalmazható a pontszerű célokra vonatkozó radaregyenlet. Ezt az ellentmondást legegyszerűbben a parabola antenna alkalmazásával oldhatjuk fel.

Az X sáv használatakor komolyan kell foglalkozni a csapadékban való gyengüléssel. Az X sávban az $a = 0,0101$, $b = 1,276$ együtthatókkal rendelkező $2 \cdot a \cdot R^b$ adja meg a kétirányú gyengülést dB-ben az R intenzitású (mm/h) csapadékra vonatkozóan. A gyengülés egy 5 mm/h intenzitású, 20 km-es csapadéksáv végén 3,1 dB, de 50 mm/h intenzitású, 10 km-es mag esetében már 44 dB. Mivel 5 dB mérési pontosság egy 2-es faktort jelent a csapadékintenzitás számításában, a gyengülés elhanyagolása véleményünk szerint csak 1–5 mm/h csapadék esetében tolerálható. A 2. ábrán az OMSZ korábbi 3 és 10 cm-en működő MRL-5 radar méréseivel illusztráljuk az X sáv gyengülését. A 2. ábrán látható, hogy intenzívebb csapadékokban a gyengülés még a zivatargóc struktúrájának felderíthetőségét is megakadályozza (ZOOM). Látható az is, hogy egy intenzív zivatargóc már 5–10 km távolság után a sugárzás teljes elnyelődését is eredményezheti (RHI). A gyengülést persze lehet korrigálni, amíg a jel el nem vész, de a stabil korrekcióhoz nagy pontossággal ismernünk kell a korrigálatlan csapadék intenzitását, ami viszont megköveteli a meteorológiai radaregyenlet alkalmazhatóságának teljesítését. A gyengülési probléma csak a polarizációs ZPHI csapadékmérési módszer alkalmazáskor nem okoz problémát, persze csak a teljes elnyelődésig.

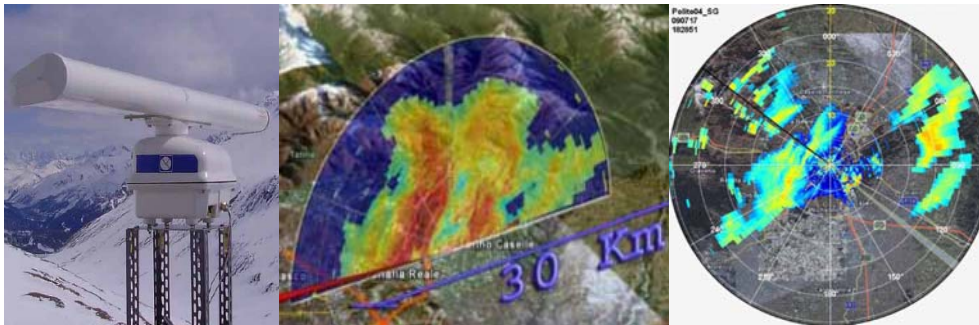


2. ábra. A 3 cm-es hullámhossz gyengülésének hatása az MRL-5 mérések alapján

Az említett korlátozó tényezőket csupán igen komoly mértékű, az adott meteorológiai körülményektől függő, alapvetően statisztikai alapokon nyugvó korrekciókkal tudjuk valamelyest kompenzálni. Több gyártó is alkalmaz ilyen korrekciókat. A korrekciókat rendszeresen kell földi mérésekkel is verifikálnunk ahhoz, hogy az ilyen MINI radaroknál reflektivitási tényező, vagy csapadék intenzitás mérésről beszélhessünk. A fenti korlátok miatt a tipikus méréshatár 15–30 km.

Néhány jellemző konstrukciós megoldású MINI radar

METEORNET: A Torinói Műszaki Egyetem 2006-ban alakított ki egy regionális MINI radar hálózatot a Piemonti tartományban az INTERREG IIb FORALPS program kereteiben. A hálózatot horizontális metszeteket készítő „Superguage”, és vertikális metszeteket készítő Windmill” MINI radar node-ok alkotják. Mindkét radar Furuno gyártmányú, függőleges illetve vízszintes tengely körül forgó hajófedélzeti radar. Antennát nem, de a vevőket módosították a megfelelő dinamika érdekében. A legújabb eredményeikről a 2009-es ECAM konferencián számoltak be.



3. ábra. a torinói METEORNET radar módjai

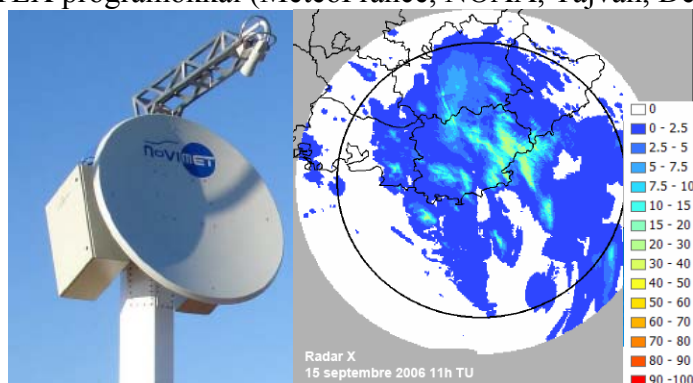
LAWR: A DHI csoport, a Dán Hidrometeorológiai Intézet fejlesztette ki egy Furuno gyártmányú hajófedélzeti radar bázisán ezt a közel körzeti csapadékmérő MINI radart. Az antennát nem, de a vevőjét teljes mértékben lecserélték logaritmikus karakterisztikájúra, és 10 illetve 12 bites digitális jelfeldolgozást végeznek. A LAWR-ban többféle korrekciós eljárást is megvalósítottak a nyaláb részbeni kitöltöttsége, a csapadékban való gyengülés, a közeli talajreflexiók elnyomása (körben fémháló), stb miatt. A DHI szerint már több tucat került felállításra különböző országokban elsősorban városi vízgazdálkodás és mezőgazdasági centrumokban. Eredményeikről rendszeresen közölnek tudományos értekezéseket.



4. ábra. A LAWR MINI radar és az árnyékoló kerítése

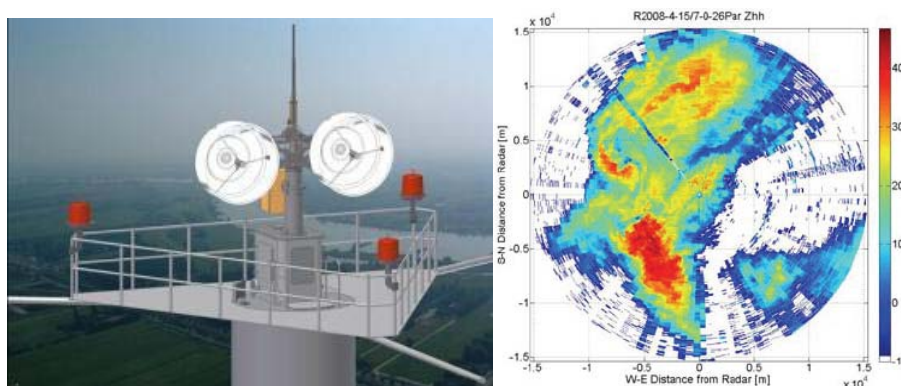
HYDRIX: A francia CNRS Nemzeti Tudományos Kutató Intézet hegyvidéki csapadékmérési kísérletekre (RHYTME, FRAMEA projektek) fejlesztette ki ezt X sávú Doppler és duál-polarimetrikus mérésekre alkalmas „nagyteljesítményű” MINI meteorológiai radart. A fejlesztésekor a legújabb, a gyengülési effektusokat kiküszöbölni tudó, ZPHI polarimetrikus csapadékmérési módszer megvalósítása volt a cél. Bevetésre kerül a 2009-ben kezdődött

SWICE - délnyugat Indiai óceán trópusi ciklon kísérletben is együttműködve a THORPEX, a DTSTAR és a BoBTEx programokkal (MeteoFrance, NOAA, Tajvan, Dél Afrika, stb).



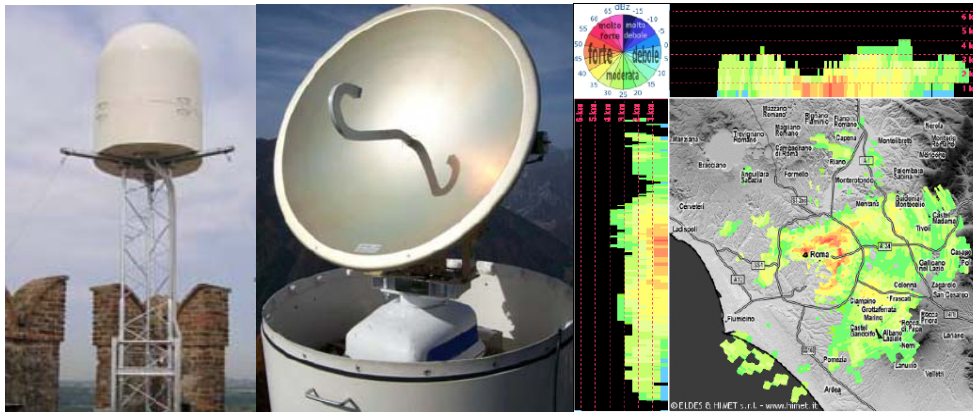
5. ábra. A HYDRIX Doppler dual polarimetrikus X MINI radar

IDRI: Az igen gyenge szitáló csapadék nagy tér- és időbeli felbontású vizsgálataihoz tervezték ezt az X sávú FMCW MINI radart a delfti ICTR munkatársai. Az IDRI radar a Cabauw-i 213 m magas torony tetején került elhelyezésre. Az IDRI Doppler és dual-polarimetrikus 3 és 30 m (!) felbontású mérésekre alkalmas. Működését 2007-ben kezdte meg, adatai nyilvánosan is elérhetők a világhálón. Meteorológiai alkalmazásának célja a különböző aeroszolok kondenzációban betöltött szerepének vizsgálata párhuzamosan más megfigyelési eszközökkel a Cabauw-i kutató bázison.



6. ábra. IDRI FMCW Doppler duál-polarimetrikus MIINI radar

WR-10X: A firenzei ELDES cég, az EEC, Lassen, Gematronik és SMA beszállítója fejlesztette ki ezt az X sávú, csak intenzitás mérésekre alkalmas MINI radart. A 3 fokos nyalábot biztosító parabola antennája, a 90 dB-es dinamikus tartományú logaritmusos vevője, 10 kW-os adója miatt igazi meteorológiai radarnak kell tekinteni. Bármely szögön képes PPI valamint RHI metszeteket készíteni. Az ELDES modernizációs kitekert is forgalmaz régebbi radarokhoz és kínál a Lassen Research által fejlesztett Doppler duál-polarizációs digitális radarvevőt is.



7.ábra. A WRX-10 teljes térbeli letapogatást biztosító MINI radarja

Hazai MINI radar fejlesztési törekvések

Magyarországon az első MINI radart a KÖVIZIG-nél telepítették az ICI Zrt. közreműködésével a 90-es évek elején, az akkori OVF támogatásával. Ez egy átalakított repülőgép fedélzeti radar volt kis teljesítménnyel és kis dinamikájú lineáris vevővel. Az alkalmazás célja a Körös vízgyűjtőjén a csapadékeloszlás mérése volt azzal a feltételezéssel, hogy a radar kimeneti videójel szintjei egyedi korrekciós eljárásokkal kapcsolatba hozhatók a felszínen mért csapadékadatokkal. A projektet továbbfejlesztették, és 2000 és 2002 között „Objektum követéses területi csapadék meghatározás radarral, csapadék-lefolyási modell megalkotása” címmel 80 mFt-os pályázatot nyertek. A kifejlesztett MINI radar átmenetileg telepítésre került a Sármelléki repülőtérre és a HM veszprémi légtérellenőrző központjában is. Tudomásunk szerint ezek már nincsenek használatban.

Legújabbban az IDŐKÉP foglalkozik MINI radarhálózat kiépítésével. Ismereteink szerint ez egy KODEN „Radar PC” típusú, hajófedélzeti radar. Az elérhető információk szerint sem az antennát, sem pedig a vevőjét nem cserélték le a meteorológiai célokhoz jobban illeszkedőre, ezért a táblázatunkban a gyengébb típusok között szerepel. A méréshatárát 100–120 km-re tervezik kibővíteni, ami az ilyen nem átalakított radaroknál igen sok kétséget vet fel a látott képek értelmezhetőségét illetően a nagy vertikális nyalábszélesség és az X sáv erős gyengülése miatt.

Hazai kísérletek között megemlíthjük a PROPATRIA/BME hazai MINI radarját a BEAGLE-t, ami egy teljesen hazai fejlesztésű X sávú FMCW Doppler radar aktív 1 W-os (!) sugárzás teljesítményű és 25 dB erősítésű aktív antennával. Terület védelmi célokra készítették, de a kísérletek során meteorológiai megfigyeléseket is végeztek vele a Balaton környékén 25 km-es körzetben. Sajnos a PROPATRIA csődje miatt a fejlesztés 2005-ben abbamaradt.

A METEOROLÓGIAI JÉGHEGY CSÚCSA: A NUMERIKUS PROGNOSTIKA

Horányi András

Országos Meteorológiai Szolgálat

e-mail: horanyi.a@met.hu

Előszó és bevezetés

Manapság már nem képezi vita tárgyát az, hogy időjárási (és éghajlati) előrejelzéseket csak és kizárólagosan számszerű előrejelző modellek alapján lehet készíteni és talán már az is megmosolyogtatja az embereket, ha azt hallják, hogy „számításaim szerint” milyen idő várható az elkövetkezőkben. Igen, a számszerű előrejelző modellek, illetve a modellekkel foglalkozó szakterület a numerikus prognosztika nagy karriert futott be az elmúlt évtizedekben, s mindenfajta meteorológiai előrejelzés támaszkodik azokra a numerikus előrejelzési modellekre, amelyek megpróbálják leírni (modellezni) a légkör fizikai folyamatait és az így felírt parciális differenciálegyenlet-rendszer megoldásán keresztül előrejelezni a légkör jövőbeli fejlődését. Sőt, legújabbban már ott tartunk, hogy sokan úgy gondolják, hogy ezen numerikus modellek alkalmazásához és futtatásához nem is kell igazi szakértelem, illetve kb. annyi tudás kell, mint egy szövegszerkesztő alkalmazásának elsajátításához (ez a kijelentés egy ismert meteorológus szájából hangzott el, azaz itt nincs szó költői túlzásról). Az előadás (és a jelen kézirat) célja az, hogy egyrészt bemutassa a numerikus prognosztika részleteit, szépségét, s felvillantson néhányat azokból a nehézségekből, amelyekkel egy modell futtatása során szembe kell néznünk és aminek a megoldásához olyan tudás és szakértelem szükséges, amelyhez speciális képzés és továbbképzések szükségesek. E mellett remélem az előadás, illetve a jelen dokumentum elolvasása után az is kiderül, hogy miért is tekinthető a meteorológiai jéghegy csúcsának a numerikus prognosztika. Az alábbiakban először is röviden bemutatom a numerikus prognosztika alapvetéseit, lényegét, majd példákon keresztül illusztrálom a modellek hazai alkalmazását, majd a modellfejlesztés azon legfontosabb irányvonalait vázoló, amelyekbe a későbbiekben egyetemi hallgatók bekacsolódása is lehetséges.

A számszerű előrejelző modellek legfontosabb részei, részletei

A XX. század elején merült fel annak a gondolata, hogy elméletileg lehetséges az időjárás előrejelzése a légköri folyamatokat leíró fizikai törvények alkalmazása és megoldása alapján. Ezek a fizikai törvények alapvetően a mozgásegyenletek, az energia, valamint az anyag megmaradása (Newton II. törvénye, a termodinamika I. főtétele, a száraz és a nedves levegő kontinuitási egyenlete), illetve diagnosztikai összefüggésként az ideális gáz állapotegyenlete. Ezen egyenletek rendszerét nevezzük a légkör hidro-termodinamikai egyenletrendszerének, amely egy parciális differenciál egyenletrendszer. A légköri folyamatokat leíró rendszer determinisztikus, azaz megfelelő kezdeti (kiindulási) és határfeltételek (alsó- és felső, illetve szükség szerint oldalsó) megadása esetén az egyenletrendszer megoldása révén meghatározhatjuk a rendszer jövőbeli állapotát. A légkör hidro-termodinamikai egyenletrendszerének megoldására matematikai modelleket konstruálunk, melyek egyrészt tartalmazhatnak egyszerűsítő feltételeket a teljes egyenletrendszerre vonatkozóan (például a hidrosztatikus közelítést, mely során a vertikális gyorsulásokat elhanyagoljuk a horizontálisakhoz képest, azaz a harmadik mozgásegyenlet diagnosztikai összefüggéssé „szelődül”), másrészt pedig közelítő numerikus sémák (mivel analitikus megoldás nem lehetséges) segítségével oldja meg azokat. A numerikus modellek legfontosabb elemei az

adatasszimiláció (amely során meghatározzuk modellünk kezdeti, kiindulási állapotát), valamint az előrejelzés (a modell egyenleteinek megoldása, vagyis integrálása). Az alábbiakban részletesebben ismertetjük az adatasszimiláció, illetve a numerikus előrejelzés elkészítésének folyamatát.

Adatasszimiláció és objektív analízis

A numerikus modell végrehajtása előtt legfontosabb feladatunk a modell megfelelő kezdeti feltételeinek biztosítása. Ez a gyakorlatban a modell prognosztikai változóinak (melyek általában a szélkomponensek, nedvesség, hőmérséklet, valamint a felszíni nyomás) háromdimenziós rácsának előállítását tételezi fel. Ehhez a feladathoz lehetőség szerint minden rendelkezésre álló információt fel kell használni, melyek elsősorban a mérési adatok (felszíni mérések, rádiószondás felszállások adatai, műholdas vagy radar adatok, stb.), valamint az előrejelzési modell korábbi időpontból futtatott az adott időpillanatra vonatkozó előrejelzése (ez utóbbi a „first guess”, amely tehát a légkör közelítő állapota a modell korábbi előrejelzése szerint, tipikusan egy 6 órás előrejelzés). A fentiek mellett természetesen egyéb információk is felhasználhatóak, mint például bármilyen olyan törvényszerűség, melyet a légkörről feltételezhetünk az adott feladat megoldása során (például geosztrófikus kényszer vagy bármilyen más egyensúlyi feltétel). Az adatasszimiláció részeként először az objektív analízisnek nevezett eljárást hajtjuk végre, mely során a földrajzilag szabálytalanul elhelyezkedő mérési adatokat a modell szabályos rácsára interpoláljuk. A második lépésben az immár interpolált megfigyelési adatokat valamilyen módszerrel (például optimális interpoláció, vagy variációs analízis technika, hogy csak a legismertebbekre utaljunk) összekombináljuk a „first guess” adatokkal és az így kapott új, rácsponti értékek fogják szolgáltatni a modell kezdeti állapotát. Itt fontos azt megjegyezni, hogy az egyes információk szintézisének arra törekszünk, hogy az egyes adatokat megbízhatóságuk függvényében súlyozzuk az analízis eljárás során (azaz a pontosabb, megbízhatóbb információkat nagyobb, míg a kevésbé pontosakat kisebb súllyal vesszük figyelembe). Az adatasszimiláció kifejezése azt is takarja, hogy a fenti módszerrel előállított kezdeti feltételeket általában adott időintervallumonként (tipikusan 6 óránként) állítjuk elő egy ún. adatasszimilációs ciklust létrehozva. A kezdeti feltételek pontos meghatározása alapvető fontosságú a numerikus modellek számára, hisz pontatlan kezdeti feltételek esetén még csak reményünk sincsen a pontos előrejelzésre. Ugyanakkor azt is meg kell itt jegyezni, hogy elviekben lehetetlen teljesen pontos kezdeti feltételeket meghatározni (a mérések pontatlanságai, illetve a kezdeti feltételek előállítása során „bevitt” hibák miatt), ami ráadásul a légkör kezdeti feltételekre mutatott rendkívüli érzékenysége miatt komoly előrejelzési hibákat eredményezhet. Ezt felismerve széles körben elterjedt az ensemble (együttes) előrejelző technika, mely során nem egyetlen előrejelzést készítünk, hanem előrejelzések együttesét és vizsgáljuk a több előrejelzés szórását annak érdekében, hogy az előrejelzéseinkhez azok bekövetkezési valószínűségét is hozzá tudjuk rendelni (és ezzel többlet információt szolgáltatni a hagyományos „determinisztikus” előrejelzésekhez képest).

Előrejelzés

A fent említett előkészítő lépések után kerül sor a légkör hidro-termodinamikai egyenletrendszerének megoldására, azaz a modell integrálására. Az integrálás végrehajtásához szükséges a térbeli és időbeli diszkretizáció, azaz az egyenleteket egy térbeli 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 előre jelezve a légkör állapotát mindaddig, amíg nem érkezünk el a teljes előrejelzési időszak végéhez. Az egyenletekben megjelenő dinamikai tagokat (mint például a különböző fellépő erőhatásokat) explicit módon tudjuk származtatni. Az olyan kis skálájú folyamatokat, amelyeket a modell véges felbontása, illetve az adott folyamat bonyolultsága miatt egyébként nem tudnánk figyelembe venni az ún. „parametrizációk” révén építjük be a modellekbe (ilyen jelenségek például a csapadékképződés mechanizmusa, a sugárzás, konvekció, felszíni határréteg jelenségei, turbulencia stb.). Ahogy azt említettük a modell integrálása során minden egyes időlépcsőben és rácspontra oldjuk meg az egyenletrendszert, ami jelentős mennyiségű számolással jár. Természetesen a számításigény csökkenthető, ha a globális (az egész Földre vonatkozó) előrejelzés helyett egy kisebb tartományra szándékozunk előrejelzést készíteni (azaz korlátos tartományú modellt futtatunk). 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).

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál operatív módon alkalmazott számszerű előrejelző modellek

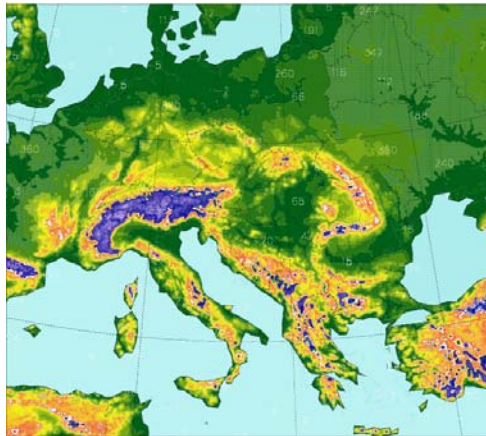
A fenti „száraz” ismertető után az alábbiakban röviden bemutatjuk azokat a numerikus modelleket, melyek kiemelt szerephez jutnak az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) előrejelzéseivel szemben támasztott igények kielégítésében. A megfelelő előrejelzések kiadása során először vizsgálni szükséges a légkör globális (szinoptikus skálájú) állapotát, amely a légköri folyamatok nagyskálájú viselkedésén (például frontok áthaladása, ciklonok keletkezése, stb.) keresztül jelenik meg. Ezeket a jelenségeket a globális légköri modellek képesek leírni, mintegy háttér információt adva a részletek vizsgálatához (a világ legjobb, hazánkban is használt globális középtávú előrejelző modellje az ECMWF – Európai Középtávú Előrejelző Központ – modell; az ECMWF modell részleteivel nem foglalkozom a jelen dolgozatban). A szinoptikus skálába „beágyazva” tanulmányozni kell a légkör részletes, (mezoskálájú) viselkedését is, amelyet ún. korlátos tartományú, nagy felbontású regionális modellek segítségével tudunk megvalósítani. Az OMSZ saját szuperszámítógépe segítségével törekszik ilyen regionális modellek integrálására (futtatására), melyek tehát a regionális és lokális előrejelzési részletek feltárásban nyújtanak elengedhetetlen segítséget.

A Budapesten futtatott regionális modellek közül az alábbiakban röviden áttekintjük a nemzetközi együttműködésben kifejlesztett ALADIN modell operatív „determinisztikus” és valószínűségi (ensemble) változatát, valamint az ALADIN modell-család legkisebb gyermekét, az AROME modellt mutatjuk be röviden.

Az ALADIN modell Magyarországon használt operatív változatának legfontosabb jellemzői az alábbiak:

- Európa térségére kiterjedő modell tartomány (1. ábra);
- 8 km-es vízszintes felbontás;
- 49 vertikális szint;
- A kezdeti feltételek meghatározása háromdimenziós variációs analízis (3d-var) eljárással (a részleteket lásd alább);
- Oldalsó határfeltételek figyelembevétele 3 óránként az ECMWF globális modelljéből (biztosítva a megfelelő konzisztenciát a modellezett globális és a regionális skálájú folyamatok között);
- Modell integrálás naponta négyszer (00, 06, 12 és 18 UTC-kor) 54, 48, 48 és 36 órás időintervallumokra;

- Utófeldolgozás óránként az integrálás első 36 órájában, valamint 3 óránként utána.



1. ábra. Az ALADIN modell egész Európát lefedő tartománya és domborzata

A feni ALADIN rendszerhez kapcsolódó (szintén operatív) 3d-var adatasszimilációs ciklus legfontosabb ismérvei az alábbiak:

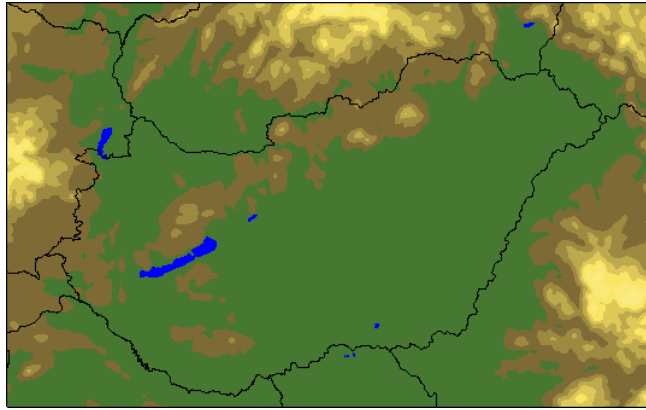
- Alkalmazott megfigyelések:
 - Felszíni (SYNOP) mérések geopotenciál adatai;
 - Rádiószondás (TEMP) felszállások geopotenciál, szél, hőmérséklet és nedvesség adatai;
 - Repülőgépes mérések hőmérséklet és szél adatai;
 - Hőmérsékletre és nedvességre érzékeny műholdas sugárzási adatok;
 - Műholdas széladatok (SATOB);
 - Windprofilerek széladatai.
- Az adatasszimilációs ciklus hossza: 6 óra, azaz minden hatodik órában illesztünk friss megfigyelési adatokat az adatasszimiláció folyamatába (a három órára történő kiterjesztés folyamatban van).

Az ALADIN modell determinisztikus futtatása kiegészül egy ensemble előrejelző rendszerrel is, amelynek a részletei az alábbiak:

- A francia ARPEGE globális ensemble rendszerének dinamikai leskálázása az ALADIN modell segítségével.
- A modell felbontása 12 km vízszintesen és 46 szint függőlegesen (az ensemble tagjait képező modellek tartománya megegyezik a determinisztikus modell tartományával; 1. ábra).
- Az együttes előrejelző rendszer 11 modellfuttatásból áll és ez alapján állít elő valószínűségi előrejelzéseket.

Kísérleti jelleggel megkezdjük az ALADIN modell-család legfiatalabb tagjának, az AROME nem-hidrosztatikus modellnek a futtatását, melynek a legfontosabb részletei az alábbiak:

- 2,5 km-es vízszintes és 60 szintes függőleges felbontás.
- Magyarországot lefedő tartomány (2. ábra).



2. ábra. Az AROME modell kísérleti változatának magyarországi tartománya és domborzata

Az elmúlt több mint félévben az AROME modellt objektív és szubjektív módon verifikáljuk és hasonlítjuk össze az MM5 és WRF ingyenesen elérhető modellekkel (ezek a modellek jól példázzák azt, hogy manapság már könnyű letölteni és alkalmazni publikusan elérhető numerikus előrejelző modelleket, de már korántsem egyszerű feladat a modell adaptálása, hangolása, és megfelelő adatokkal való ellátása). Az objektív verifikációs eredmények is ezt támasztják alá, hisz az esetek mintegy 80 százalékában a több változót tartalmazó komplex verifikációs mutatókban az AROME modell jobban teljesít, mint az MM5 modell (a vizsgált időszak idén februártól júniusig tartott). A szubjektív kiértékelés (tavaly december közepe és idén június eleje között) alapján pedig az látszik, hogy a szél, a hőmérséklet és a felhőzet esetében az esetek nagyobb részében jobb az AROME modell, mint akár az MM5, akár a WRF modellek. Jelenleg a csapadék az egyedüli változó, amelyben a WRF modell egyelőre jobban teljesít, mint az AROME, de jelenlegi fejlesztéseink éppen azt a célt szolgálják, hogy az AROME modell ezen hiányosságán is javítsunk a modell teljes operatív alkalmazása előtt.

Összefoglalás és kitekintés

Az előadás során először áttekintettük a számszerű előrejelzési modellek legfontosabb részleteit, jellemzőit. Ezután röviden ismertettük az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazott legfontosabb operatív numerikus előrejelző modelleket különös tekintettel az ALADIN modell-családra. A további fejlesztések homlokterében is az itt említett modellek állnak, s az alábbiakban röviden felsoroljuk a közelebbi és távolabbi jövő legfontosabb kapcsolódó feladatait (ezek a témák mindegyike részben és egészében olyan fejlesztendő szakterületek, amelyek akár TDK dolgozat, akár BSc, illetve MSc dolgozat szakmai alapjául szolgálhatnak).

Az ALADIN modell fejlesztése vonatkozásában:

- Az ALADIN modell adatasszimilációs ciklusának 6 órától 3 órára való növelése (több adat beépítése, pontosabb háttérmezők alkalmazása).
- Az ALADIN modell adatasszimilációs rendszerének összekapcsolása az ensemble előrejelző rendszerrel („ensemble adatasszimiláció”).

Az ALADIN-EPS rendszer fejlesztése vonatkozásában:

- Az ALADIN-EPS rendszer kezdeti feltételeinek pontosabb származtatása szinguláris vektorokon alapuló kezdeti feltételek meghatározásával.
- Az ALADIN-EPS rendszer felszíni perturbációinak meghatározása a felszíni adatasszimilációs séma megfigyeléseinek perturbálásával.

- Az ECMWF EPS rendszeren alapuló ALADIN EPS dinamikai leskálázási rendszer kifejlesztése és operatív bevezetése.

Az AROME modell fejlesztése tekintetében:

- Az AROME modell optimális tartományának meghatározása (a jelenleginél nagyobb terület szükséges).
- Az AROME modell határfeltételeinek alkalmazása közvetlenül az ECMWF modell segítségével (ily módon a közbülső ALADIN modellváltozat nem lesz szükséges).
- Az AROME modellhez kapcsolódó adatasszimilációs rendszer kiépítése (RUC: „rapid update cycle”, azaz gyakran alkalmazott háromdimenziós asszimilációs séma alkalmazása).
- Az AROME modell teljes operatív bevezetése naponta négy, illetve naponta nyolc modellfuttatás bevezetésével.
- Új (intenzív) megfigyelések (például radar adatok) beépítése az AROME modell adatasszimilációs rendszerébe.

Végül, de nem utolsósorban talán már kitalálható az, hogy mit sugall a jelen kézirat címe: a numerikus előrejelzés tudományága nagyban épít a meteorológia, illetve a kapcsolódó szakterületekre, s így különösen a megfigyelésekre (a modellek kezdeti állapotának meghatározására), a távközlésre (amely elérhetővé teszi a különböző helyeken és időben mért adatokat), a számítástechnikára (ami lehetővé teszi a modellek végrehajtását, azaz az előrejelzések készítését). A fentiek mellett a numerikus előrejelzés kapcsolatban áll az éghajlatkutatással is, hisz a fentiek során leírt modelleket kis módosításokkal regionális klímamodellekként is lehet alkalmazni, illetve numerikus előrejelzési eszközök azok, amelyek segítségével az éghajlat kutatásában elengedhetetlen múltra vonatkozó re-analíziseket is elő lehet állítani. Nem szabad arról sem megfeledkezni, hogy a numerikus modellek eredményeit az előrejelző szakemberek mellett számos más szakterület is alkalmazza, mint például a hidrológia (árvízi előrejelzések készítése), vagy akár a környezetvédelem (szennyezőanyag terjedés vizsgálata), hogy csak néhányat emeljünk ki a számos alkalmazási terület közül.

A JÖVŐ ÉGHAJLATÁNAK BECSLÉSE: REGIONÁLIS KLÍMAMODELLEZÉS

Horányi András, Krüzselyi Ilona, Szabó Péter, Szépszó Gabriella

Országos Meteorológiai Szolgálat

Email: horanyi.a@met.hu, (klimadinamika@met.hu)

Bevezetés

Általánosan elfogadott tény, hogy az éghajlati rendszer összetett működésének és jövőbeli viselkedésének tanulmányozására a numerikus modellezés eszköztára szolgáltat megfelelő, objektív módszert. A globális numerikus éghajlati modellek képesek a rendszer egyes összetevői (a légkör, az óceán, a szárazföld, a jégtakaró és az élővilág) fizikai folyamatainak leírására, valamint a komponensek közötti bonyolult kölcsönhatások és visszacsatolások jellemzésére. Ezek a modellek a komplex rendszer egészét együtt tekintik, ezért lehetőségünk van velük leírni az éghajlati rendszer válaszát egy feltételezett jövőbeli kényszerre.

A feltételezett jövőbeli kényszerszerek egyik legfontosabb és legbizonytalanabb eleme az emberi (antropogén) tevékenység. Az éghajlati rendszerre hatással bíró emberi tényezőket a globális modellek számára oly módon számszerűsíthetjük, hogy meghatározzuk mindezen tényezőknek (a népesség, az energia-felhasználás, az ipari és mezőgazdasági szerkezet stb. változásainak) az éghajlati rendszerre gyakorolt „sugárzási kényszerét” (azaz mennyiben módosulnak ezáltal a földi sugárzási viszonyok), s kiszámítják a hatással egyenértékű széndioxid kibocsátást, valamint az ennek megfelelő koncentrációt. A bizonytalanság pedig abból adódik, hogy jelenleg nem vagyunk képesek teljes bizonyossággal megmondani, hogyan változnak az antropogén tevékenység egyes részletei a jövőben. Éppen ezért a jövőbeli kibocsátási tendenciákra számos hipotézist (ún. forgatókönyvet) állítanak fel, melyek között vannak optimista, pesszimista vagy átlagosnak tekinthető változatok, s ezek figyelembevételével készítenek globális projekciókat a Föld egészére nézve. (Ezeket a modellszimulációkat nem előrejelzéseknek, hanem projekcióknak nevezzük éppen az említett feltételes voltuk miatt.)

Napjainkra a nagy klímakutató központokban fejlesztett globális éghajlati modellek kidolgozottsága elérte azt a szintet, hogy ezek a modellek képesek megbízhatóan leírni az éghajlati rendszer elemeinek viselkedését a közöttük lévő összetett kölcsönhatásokkal együtt, továbbá kiválóan használhatók az éghajlatváltozás planetáris (azaz globális, nagyskalájú) jellemzőinek vizsgálatára. A rövidtávú modellekkel ellentétben ezekkel a modellekkel szemben nem elvárás, hogy minden pontban és időpillanatban leírják az időjárást – ebben az esetben a célunk az, hogy az éghajlati rendszer átlagos tér- és időbeli statisztikáit reprezentáljuk. A globális klímamodellek komplexitása azonban a jelenlegi számítógépes kapacitás teljes kihasználásával sem teszi lehetővé azt, hogy egyedüli alkalmazásukkal az éghajlatváltozás regionális vonatkozásairól pontos információhoz jussunk (térbeli felbontásuk például többnyire 100 km-nél még ma sem finomabb). A részletek feltárására ezért ún. regionalizációs (leskálázási) módszerekkel élünk, amelyek segítségével egy az érdeklődésünkre számot tartó területen (például Közép-Európa térségére) finomíthatjuk a nagyskalájú globális jellemzőket.

A globális információk regionális pontosítására Magyarországon regionális éghajlati modelleket használunk, melyek – miként a rövidtávú időjárás-előrejelzésben – egy kisebb tartományra készítenek projekciókat a globális modellek eredményeit határfeltételekként felhasználva. A regionális modellek többnyire már csak az éghajlati rendszer légköri komponensének leírását tűzik ki célul, ezért kifejlesztésük általában a rövidtávú előrejelzésben is használt időjárási modellek adaptálását és kiterjesztését jelenti oly módon, hogy bizonyos

folyamatokat (például a felhőképződést, sugárzást) az éghajlati tér- és időskálának megfelelően írják le.

A regionális éghajlati modellekkel végrehajtott kísérletek

Az Országos Meteorológiai Szolgálat Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztályán (NMO) az elmúlt néhány évben két regionális klímamodell adaptálására került sor, melyek az alábbiak:

- az ARPEGE-Climat globális általános cirkulációs modell alapján a Météo France által nemzetközi együttműködésben kifejlesztett **ALADIN-Climate** regionális klímamodell;
- a Német Szolgálat korábbi időjárási modellje és az ECHAM4 globális általános cirkulációs modell ötvözésével a hamburgi Max Planck Intézet által fejlesztett **REMO** modell.

1. táblázat. A regionális klímamodellekkel végrehajtott kísérletek.

	ALADIN-Climate 4.5			REMO 5.0	
Kísérlet azonosítója	AL_ERA_25		AL_ARP_10	REMO_ERA_25	REMO_ECH_25
Időszak	1961–2000		1961–2100	1961–2000	1951–2100
Horizontális térbeli felbontás	25 km	10 km	10 km	25 km	25 km
Függőleges szintek száma	31	AL_ERA_10	31	20	20
Modelltartomány	Közép- és Kelet-Európa	1961–2000	Kárpát-medence	Közép- és Kelet-Európa	Közép- és Kelet-Európa
Peremfeltételek	ERA-40 re-analízisek	ERA-40 re-analízisek	ARPEGE-Climat/OPA AOGCM***	ERA-40 re-analízisek	ECHAM5/MPI-OM AOGCM***
Peremfeltételek felbontása	125 km	125 km	50 km	125 km	200 km
Kibocsátási forgatókönyv	-	-	A1B	-	A1B

*** AOGCM: Atmosphere-Ocean General Circulation Model: légkör-óceán általános cirkulációs modell

A modellekkel először a múltra vonatkozóan hajtottunk végre kísérleteket abból a célból, hogy teszteljük és megismerjük működésüket egy, a mérések által viszonylag jól ismert, hosszabb múltbeli időszakon, s az így feltérképezett modellgyengeségek alapján fejlesszük őket. Ebben az esetben a modellkísérleteket elsőként olyan „tökéletesnek” tekintett (ún. re-analízis) határfeltételekkel hajtottuk végre, melyek előállításához megfigyelési információkat is felhasználtak. Az ezt követő modell-szimulációkban a nagyskalájú kényszereket már nem megfigyelés-alapú információk, hanem légköri vagy kapcsolt óceán-légkör általános cirkulációs modellek biztosították, ugyanis a jövőre vonatkozóan kizárólag a globális modellek eredményeit tudjuk határfeltételekként felhasználni. A múltra vonatkozóan így előállított eredményeket ebben az esetben is összehasonlítottuk megfigyelési adatokkal, csak míg az előbbi esetben a kiértékelés következtetései a regionális modell fejlesztéséhez szolgálnak információval, addig ezúttal a globális és a regionális modell együttes hibájáról kapunk képet. Itt jegyezzük azt is meg, hogy nincsen egyértelmű kapcsolat a modellek múlt éghajlatra vonatkozó „teljesítménye” és a jövőre vonatkozó viselkedése között, de mégis azt

várjuk, hogy a múltban jól teljesítő modell megfelelő alapot biztosít az éghajlat jövőbeli alakulásának becslésére.

A modell-szimulációk a REMO modell esetében 25, az ALADIN modell esetében 25 illetve 10 km-es felbontással készültek; a finomabb felbontású kísérletek során egy kisebb, Kárpát-medencét magában foglaló tartományra, míg a 25 km-es felbontású szimulációkban egy Közép- és Kelet-Európát lefedő, nagyobb területre. A jövőre vonatkozóan a hazai modellkísérletekhez az antropogén tevékenység alakulásával kapcsolatos nagyskálájú kényszereket a globális modellek A1B kibocsátási forgatókönyvével előállított eredményei szolgáltatták (amely a bevezetőben említett forgatókönyvek között egy átlagos változatnak tekinthető a XXI. század második felére vonatkozóan). A modellkísérletek legfontosabb jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze.

A modellek validációja

A regionális klímamodelljeink validációja során a modelljeinket a múltra futtatjuk, és az eredményeket különböző megfigyelési adatbázisokkal hasonlítjuk össze. Az alábbiakban röviden ismertetjük az egyes modelljeink legfontosabb jellemzőit a múlt éghajlatára (1961–1990) vonatkozóan.

Az átlaghőmérsékletet tekintve az öt modellkísérlet közül a legjobb eredményt az ECHAM5/MPI_OM kapcsolt globális klímamoddellel meghajtott REMO-szimuláció adja mind évszakos, mind éves átlagban. A Kárpát-medence térségében legfeljebb 1 °C-kal térnek el a kapott hőmérsékletértékek a CRU adatbázis értékeitől. Ugyanakkor ERA-40 meghajtással, azaz „jobb” peremfeltétellel, a REMO modell erősen felülbecsli az éves illetve évszakos átlaghőmérsékleteket, mindez arra enged következtetni, hogy a peremfeltétel és a regionális modell között kisebb a konzisztencia. Az ALADIN-Climate futtatások általában alulbecslik az átlaghőmérsékletet.

Ami a csapadékot illeti: az ALADIN-Climate szimulációk és a globális modellel meghajtott REMO-kísérlet Magyarország területére éves átlagban csapadékosabb eredményt adnak a megfigyeléseknél. ERA-40 meghajtással a REMO az ország déli területein alul-, míg északon felülbecsli a csapadék mennyiségét. Az évszakos átlagok esetében a kísérletek különböző eredményeket adnak, de a tavaszi csapadék felülbecslésében megegyeznek. Alulbecslés leginkább ősszel fordul elő, a legjobb eredményeket pedig minden kísérletnél télen kaptuk.

Mind az átlaghőmérséklet, mind a csapadék esetében azt tapasztaltuk, hogy az ALADIN-Climate kísérletek közül jobb eredményeket kaptunk a durvább felbontású, nagyobb területen végzett futtatással, mint a finomabb felbontásúakkal. Ebből arra következtethetünk, hogy a megválasztott terület túl kicsi. Emellett az is problémát jelenthet, hogy a tartomány pereme hegyvidékekre esik. Mindezen gyengeségek kiküszöbölésére terveink között szerepel az ALADIN-Climate modell egy nagyobb tartományon való futtatása.

A modellek validációjából látható, hogy azok viselkedése elég összetett: vannak olyan aspektusok, amelyekben jól, míg másokban rosszabbul teljesítenek, ily módon a modellfejlesztés pontos irányának meghatározása sem egyszerű feladat.

Kárpát-medencére vonatkozó projekciós eredmények

Az ALADIN-Climate és REMO regionális éghajlati modellek nemcsak a fizikai folyamatok leírására alkalmazott numerikus sémáikban és parametrizációs eljárásaikban különböznek, de a velük végrehajtott szimulációk is több tekintetben eltérnek. Mindazonáltal mindegyik kísérlet azt szimulálja, hogyan módosul a XXI. században a Kárpát-medence éghajlata – azaz

a modellkísérletek együttes vizsgálata lehetővé teszi azt, hogy számszerűsítsük a projekciókban lévő bizonytalanságokat. Ugyanis ha egy adott éghajlati vonatkozásban a modellek jó egyezést mutatnak, akkor a szimulációk megbízhatósága nagyobb, ahol viszont eltérők az eredmények, ott a projekciók nagyobb bizonytalansággal terheltek. Az alábbiakban a csapadéokra és hőmérsékletre vonatkozó eredményeket két jövőbeli időszakra, 2021–2050-re és 2071–2100-ra koncentrálva együttesen mutatjuk be; a változásokat pedig minden esetben az 1961–1990 időszak szimulált átlagaihoz viszonyítva fejezzük ki. A jövőbeli eredményeket tehát a korábbi referencia időszaktól vett eltérések formájában adjuk meg annak érdekében, hogy a múltbeli és jövőbeli szimulációk átlagainak különbsége révén a szisztematikus modellhibákat kiküszöböljük (feltételezve, hogy a múltbeli és a jövőbeli hibatulajdonságok megegyeznek).

Hőmérséklet

A két regionális klímamodell „egyetért” abban, hogy a XXI. században folytatódik az átlaghőmérséklet emelkedése a Kárpát-medencében, mégpedig minden évszak, időszak és modell esetében statisztikailag szignifikáns módon (azaz az évek közötti változékonyság nem haladja meg a változás mértékét). A növekedés abban a tekintetben folyamatos, hogy a vizsgált 2071–2100 időszakban ez nagyobb mértékű (átlagosan 3,5 fok), mint a korábbi 2021–2050 időszakban (amikor 1,7 fok az átlagos változás). Mindez azonban nem jelenti azt, hogy ez minden egyes évre érvényes lesz: továbbra is lesznek az 1961–1990-es átlagnál hűvösebb évek és évszakok. A melegedés pontos mértékében eltérnek az egyes modelledmények, különösen az évszakos tendenciákat figyelembe véve. A legnagyobb változásokat nyárra vetítik előre: a 2021–2050 időszakban 1,4–2,6 fok, míg az évszázad utolsó évtizedeire 4,1–4,9 fokos változásra számíthatunk. A hőmérséklet-emelkedés területi eloszlását tekintve a projekciók egységesek abban, hogy az ország keleti és déli területein kell nagyobb mértékű melegedéssel számolnunk.

Csapadék

A csapadék megváltozása tekintetében a kép már kevésbé egyértelmű, mert a modellek eredményei még kevesebb aspektusban egyeznek meg, ráadásul a változások csak néhány esetben bizonyultak statisztikailag szignifikánsnak. A 2021–2050 időszakban az éves csapadékösszeg változatlanságában és a nyári csapadékatlag 5–10%-ot elérő csökkenésében jobbra egységesek a projekciók. Vannak azonban olyan területek is (elsősorban északon), ahol a modelledmények kismértékű nyári csapadéknövekedés lehetőségére hívják fel a figyelmet. Tavasszal és télen a két modell teljesen eltérő jövőképet ad: a 10%-ot meg nem haladó mértékű növekedés, illetve a hasonló arányú csökkenés mindkét évszakban egyaránt lehetséges. Ősszel országos átlagban a növekedés lesz jellemző, de az egyes tájak esetében itt is vannak eltérések a projekciók között.

Az évszázad végére az éves csapadékatlag csökkenése mindkét modell szerint elérheti az 5%-ot. Az évszázad közepén tapasztalt évszakos változások tovább folytatódnak, de nem minden esetben erősödő jelleggel. Nyáron a két modellkísérlet alapján 20%-ot meghaladó csökkenés várható az ország egész területén. Télen az egyik modell eredményei alapján továbbra is elképzelhető 5%-ot meghaladó csökkenés, a másik modell viszont 30%-os növekedést valószínűsít. (Ezt az évszázadvégi téli növekvő tendenciát erősítik meg egyébként az európai PRUDENCE projekt durvább felbontású modelledményei is.)

Tervek és kapcsolódási lehetőségek

A klímamodellezés terén számos további tervünk, elképzelésünk van a megkezdett munka folytatásához, melyek közül a legfontosabbakat és a legérdekesebbeket emeljük ki az alábbiakban:

- A magyarországi regionális klímamodellek (ALADIN-Climate, PRECIS, RegCM, REMO) együttes kiértékelésének végrehajtása. A Magyarországon rendelkezésre álló négy regionális klímamodell eredményeit együttesen értékeljük ki, azaz számszerűsítjük az egyes projekciókat és a bennük rejlő bizonytalanságokat. A munkát az OMSZ és az ELTE Meteorológiai Tanszéke közösen valósítja meg és a munka jelenlegi fázisában a szélsőségekkel kapcsolatos projekciók együttes elemzését valósítjuk meg.
- Fontosnak tartjuk az összes, a Kárpát-medence térségére rendelkezésre álló klímamodell együttes (valószínűségi) kiértékelését (ez a feladat kapcsolódik az előző pontban leírtakhoz is). Ennek érdekében egyrészt számba kell venni azokat a globális és regionális modelleket, amelyek szóba jöhetnek egy ilyen együttes kiértékelésnél, másrészt pedig olyan diagnosztikákat kell definiálni, amelyek a modellekben rejlő bizonytalanságokat optimális formában jeleníti meg az esetlegesen laikus felhasználók számára is.
- Tervezzük a jelenleg rendelkezésre álló modellkísérletek további bővítését, kiegészítését, amely az alábbi modell futtatások elvégzését jelenti:
 1. A jelenleg 25 km-es horizontális rácsfelbontású REMO modell 10 km felbontású változatának előkészítése (a megfelelő tartomány meghatározása) és futtatása az 1951–2100-as időszakra. Az eredményeket szisztematikusan össze kell vetni a 25 km-es felbontású eredményekkel.
 2. Az ALADIN-Climate modell optimális futtatási tartományának meghatározása és a 10 km-es modellfuttatások ismételt végrehajtása (egy, a jelenleginél újabb modellváltozattal) az 1961–2100-as időszakra. Az eredmények szisztematikus összevetése a korábbi (kisebb tartományú) modell futtatásokkal.
- További kapcsolatokat szeretnénk kiépíteni a nagyközönséggel illetve a klímaváltozás hatásainak vizsgálóival annak tudatosítása érdekében, hogy az éghajlati rendszer jövőbeli alakulásának vizsgálatára az egyedüli járható út a dinamikus modellezés, és az éghajlati hatásvizsgálatokat regionális klímamodellek eredményeire kell alapozni az eredményes alkalmazkodási feladatok megtervezéséhez. A kapcsolattartás egyik eszköze egy kérdőív összeállítása és minél szélesebb körben való terjesztése, mely kiértékelése révén felmérhetnénk a társadalom éghajlatváltozással kapcsolatos ismereteit, illetve jellemző tévhiteit.

A fentiekben leírtakkal kapcsolatban további részletek olvashatóak az OMSZ honlapján a www.met.hu/nmo/climate linken.

AZ ENSEMBLE KÖZÉPTÁVÚ ELŐREJELZÉSEK ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI

Ihász István

e-mail: ihasz.i@met.hu

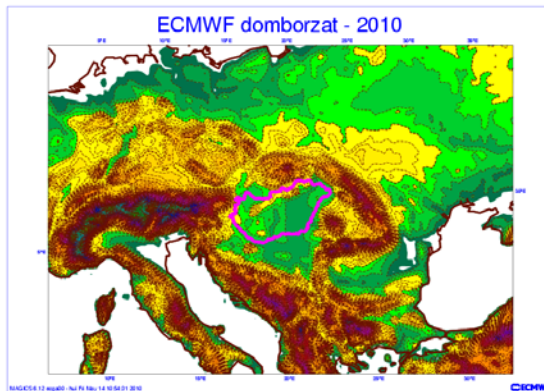
Bevezetés

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) a középtávú (2-10 napos) időjárás előrejelzések alapvetően az Európai Középtávú Előrejelző Központ (ECMWF = European Centre for Medium Range Weather Forecasts) determinisztikus és valószínűségi előrejelzéseire épülnek. Magyarország 1994 óta az ECMWF társult tagjaként a modellelőrejelzések teljes skáláját használhatja, és használja, a produktumokra épülő OMSZ-beli fejlesztő munkába - az elmúlt évtizedben - számos egyetemi hallgató TDK és szakdolgozati munka révén sikeresen bekapcsolódott. A következőkben rövid, átfogó képet adunk az ECMWF által nyújtott lehetőségekről, a hallgatók által az elmúlt években végzett munkáról, a kapcsolódó jelen és jövőbeli OMSZ-beli fejlesztési tevékenységekről, melyekben továbbra is számítunk az egyetemi hallgatók aktív részvételére.

Az Európai Középtávú Előrejelző Központ (ECMWF)

Az Európai Középtávú Előrejelző Központ 18 európai ország összefogásaként 1973-ban readingi (Nagy-Britannia) székhellyel alakult meg. Jelenleg Ausztria, Belgium, Dánia, Franciaország, Görögország, Hollandia, Finnország, Írország, Luxemburg, Nagy-Britannia, Németország, Norvégia, Olaszország, Spanyolország, Svájc, Svédország, Portugália és Törökország *teljes jogú tagja* a szervezetnek, a tagok száma várhatóan a következő években dinamikusán növekedni fog. Az ECMWF-hez un. *együttműködő tagországgént* a 70-es évek végén Izland, majd a 90-es évek közepétől – időrendben – Magyarország (Kaba, 1995), Horvátország, Szlovénia, Cseh Köztársaság, Szerbia, Románia, Észtország, Litvánia, Marokkó, Montenegró, Szlovákia és Lettország csatlakozott.

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 nagyon színvonalas előadást, emellett Götz (2001) monográfiája ad komplett összefoglalót. Az elmúlt tíz évben az Meteorológiai Tudományos Napok rendezvény központi témája két alkalommal volt az időjárás előrejelzés. Az ECMWF előrejelzésekre alapozott OMSZ-beli fejlesztéseket két előadás foglalta össze (Ihász, 2003, Ihász, 2008).



2006. november végén került operatív bevezetésre az ún. VarEPS rendszer melynek keretében az ensemble előrejelzés naponta kétszer, már 15 napos időtartamra készül, a 10. napon változik a modell térbeli felbontása (*Buizza, et. al, 2008*). 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 32. napig, ennek révén a korábbi havi előrejelzés kiváltható lett (*Vitart, et. al, 2008*). 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.

Az ECMWF által nyújtott szolgáltatások közül még két fontos területet mindenképpen célszerű kiemelni. A tudományos vizsgálatokban – az ELTE TTK Meteorológiai Tanszéken is – széleskörűen használt az ún. reanalízis adatbázis. Az 1958-2002 időszakot fedi le az ERA-40 (*Uppala, et. al, 2005*), míg 1989-től napjainkig kvázi real time módon bővülően az ERA Interim (*Simmons et. al, 2007*). Az ERA Interim adatokhoz kutatási célból $1,5 \times 1,5$ fokos horizontális felbontásban szabad hozzáférés van az ECMWF honlapján keresztül: http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/.

Az ELTE Meteorológiai Tanszék és az OMSZ közötti 2005-ös megállapodás értelmében kutatási - így szakdolgozat és diákköri dolgozat készítése - célból lehetőség van az ERA Interim eredeti $0,75 \times 0,75$ fokos horizontális felbontású adataihoz, s egyéb nem real time ECMWF analízisekhez, illetve előrejelzésekhez való hozzáférésre is.

Az ECMWF számos adatfeldolgozó és megjelenítő szoftvert is a honlapjáról (<http://www.ecmwf.int>) szabadon letölthető formában és UNIX operációs rendszer alatt telepíthető módon rendelkezésre bocsát (<http://www.ecmwf.int/products/data/software/>). A GRIB és BUFR file kódolásra és dekódolásra alkalmas ún. GRIB API software mellett célszerű kiemelni a MAGIC++ programcsomagot, mely széleskörű és könnyen alkalmazható megjelenítési lehetőségeket biztosít. A szoftverek egy része már a nimbus.elte.hu gépen is telepítésre került.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat Numerikus Modellező és Éghajlatdinamikai Osztályán (NMO) végzett ECMWF vonatkozású fejlesztői tevékenység

Az OMSZ-ban az 1980-as évek közepén Dévényi Dezső vezetésével jött létre a numerikus előrejelzési tevékenységgel és a numerikus modellekre épülő ún. utófeldolgozási munkákkal foglalkozó kis létszámú szervezeti egység. Többszöri szervezeti átalakítások után 1999. január 1-től önálló osztály keretében – dinamikus bővülő tevékenységi körrel és létszámmal – **egyetemi hallgatók intenzív részvételével** történik az operatív tevékenységet megalapozó fejlesztői munka. Mint említettük, Magyarország 1994-től az ECMWF társult tagja, így '90-es évek közepétől az OMSZ-ban dinamikusán nőtt az ECMWF modell használatához kapcsolódó fejlesztési igény. Az I. táblázat mutatja a 2003 és 2010 közötti diplomamunka témákat. A II. táblázatban a jelenlegi két diplomamunka témát ismerhetjük meg. A szakdolgozatok mellett számos tudományos diákköri dolgozat is született, a témákat és az elért eredményeket a III. táblázat tartalmazza.

Ugyan az ECMWF modell outputok közvetlen használatához nem kapcsolódik, de érdemes megemlítenünk, hogy 2008. őszétől az ALADIN/HU korlátos tartományú modell ECMWF határfeltételekkel fut, így Magyarország az ALADIN országok közül elsőként használja operatíván az ECMWF peremfeltételeket (*Böloni et. al, 2009*).

1. Táblázat. az OMSZ/NMO-n 2003 és 2010 között készült ECMWF témájú szakdolgozatok

2003	Hágel Edit	Szélsőséges időjárási helyzetek korai felismerése az Extreme Forecast Index használatával (témavezető: Ihász István)
2004	Osváth Szabolcs	Az ECMWF ensemble előrejelzéseire alapozott Kárpát-medence központú clusteranalízis vizsgálata (témavezető: Ihász István)
2006	Szintai Balázs	Rövidtávú ensemble előrejelzések készítése az ALADIN modellel (témavezető: Ihász István)
2008	Mile Máté	Az ECMWF ensemble előrejelzések utólagos kalibrációja (témavezető: Ihász István)
2009	Tajti Dávid (BSc)	Az ECMWF determinisztikus és valószínűségi előrejelzések összehasonlító verifikációja (témavezető: Ihász István)
2009	Üveges Zoltán	Az ECMWF havi előrejelzéseinek kalibrációja (témavezető: Ihász István)
2010	Németh Csilla (BSc)	Az ECMWF kalibrált valószínűségi előrejelzéseinek verifikációja (témavezető: Ihász István)

2. Táblázat. az OMSZ/NMO-n jelenleg készülő ECMWF témájú szakdolgozatok

2011	Lázár Dóra (BSc)	Az ECMWF ensemble előrejelzések alapján készült dekád és havi fáklya előrejelzések verifikációja (témavezető: Ihász István)
2011	Tajti Dávid (MSc)	Az ECMWF ensemble előrejelzések alapján ensemble vertikális profilok előállítása és verifikációja (témavezető: Ihász István)

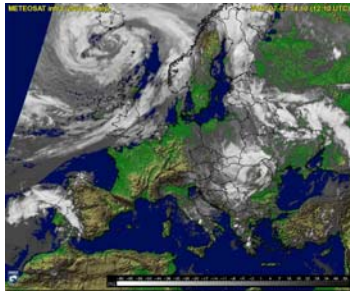
3. Táblázat. az OMSZ/NMO-n 1999 és 2010 között készült ECMWF témájú tudományos diákköri dolgozatok

1999	Tóth Helga IV. éves	Trajektória számítási modellek eredményeinek statisztikai vizsgálata	OTDK különdíj Témavezetők: Ihász István Fejősné Iványi Zsuzsanna
2001	Tóth Helga V. éves	Trajektória és diszperziós modellek alkalmazása a nagyskálájú szennyezőanyag szállítás leírásában	OKFD I. díj Témavezetők: Ihász István Weidinger Tamás
2005	Szintai Balázs IV. éves	Az ECMWF középtávú ensemble előrejelzéseinek clusterezése	OTDK II. díj Témavezető: Ihász István
2006	Szintai Balázs V. éves	Rövidtávú ensemble előrejelzések készítése az ALADIN modellel	OTDK-n nem indult Témavezető: Ihász István
2008	Mile Máté V. éves	Az ECMWF ensemble előrejelzések kalibrációja	OKFD I. hely Témavezető: Ihász István
2009	Üveges Zoltán V. éves	Az ECMWF havi ensemble előrejelzések kalibrációja	OTDK II. hely Témavezető: Ihász István
2010	Tajti Dávid I. éves MSc	Az ECMWF ensemble előrejelzéseinek szezonális verifikációja	OKFD különdíj Témavezető: Ihász István

Esettanulmány: A 2010. július 7-ére vonatkozó középtávú előrejelzés vizsgálata

A dolgozatban terjedelmi okokból rövidebb, az előadásban valamivel hosszabb esettanulmányban mutatjuk be az ensemble előrejelzések használatát egy ritka és érdekes időjárási helyzetben. 2010. július 7-én az Északkeleti Kárpátok térségében hullámozó frontrendszer miatt (2. a ábra) az ország keleti felében csapadékos (2. b és c ábra) és az évszakhoz képest szokatlanul hűvös időjárás volt jellemző, a maximum hőmérséklet csak 14 és 19 fok között alakult, míg a nyugati országrészben 20-25 fok volt a jellemző. A 2010. július 2-án készült előrejelzés ugyanerre a napra még 30 fok körüli maximum hőmérsékletet adott. A július 3-án készült előrejelzés már mintegy öt fokkal alacsonyabb 25 fok körüli értéket adott, egy nappal később július 4-én pedig 20-25 fokos maximum hőmérséklet előrejelzés született, s

a keleti országrészben már az ennél alacsonyabb értékeknek is megvolt az esélye. A következő napokban készült előrejelzések pedig további pontosítást adtak.



2. a. ábra. infravörös műholdkép: 2010.07.07 12UTC

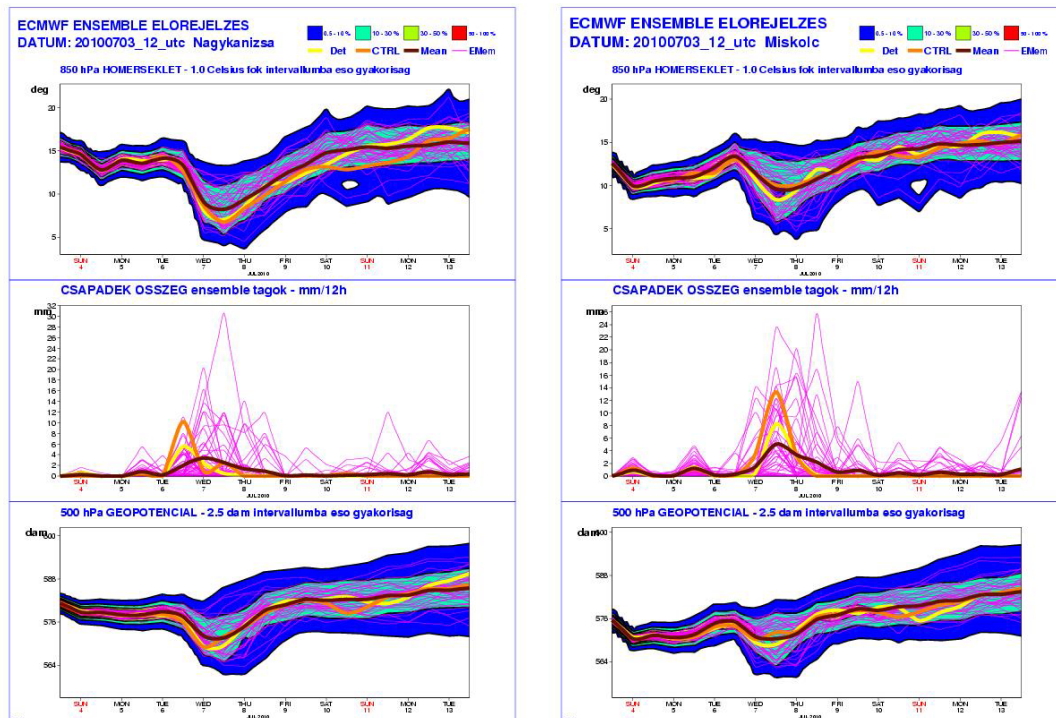


2. b. ábra. maximum hőmérséklet: 2010.07.07

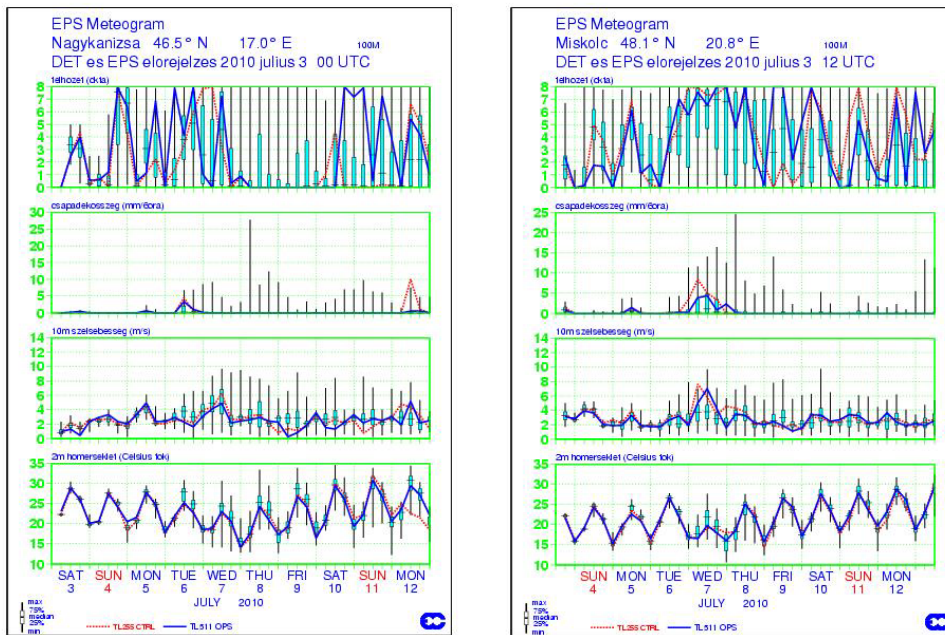


2. c. ábra. 24 órás csapadékösszeg :2010.07.07

A 3. a és b ábra a 2010. július 3-án 12 UTC-kor készült Nagykanizsára illetve Miskolcra vonatkozó un. ensemble fáklya előrejelzést mutatja. Az ábrán felülről lefelé haladva a meteorológiai paraméterek: 850 hPa-os szint hőmérséklete, 12 órás csapadékösszeg valamint az 500 hPa-os szint magassága. A 4. a és b ábra a 2010. július 3-án 12 UTC-kor készült Nagykanizsára illetve Miskolcra vonatkozó un. ensemble meteogram előrejelzést mutatja. Az ábrán felülről lefelé haladva a meteorológiai paraméterek 6 órás bontásban: borultság, csapadékösszeg, 10 m-es szélsősebesség és 2 m-es hőmérséklet.



3. a és b ábra. 2010. július 3. 12 UTC-kor készült Nagykanizsára és Miskolcra vonatkozó ensemble fáklya előrejelzés.



4. a és b ábra. 2010. július 3. 12 UTC-kor készült Nagykanizsára és Miskolcra vonatkozó ensemble meteogram előrejelzés.

Összefoglalás

A dolgozatban a meteorológus hallgatók Országos Meteorológiai Szolgálat Numerikus Modellező és Éghajlatdinamikai Osztályán végzett szakdolgozati, illetve diákköri munkái alapján kitekintést adtunk az OMSZ-ban folyó ECMWF vonatkozású fejlesztő tevékenységről. A munka során szükség van az egyetemi évek folyamán szerzett ismeretek összetett alkalmazására. Az dinamikus meteorológia és a numerikus modellezői háttér mellett a statisztikai és informatikai tudáson és tapasztalaton kívül előnyös, ha a szinoptikus meteorológiai ismereteket is jól tudjuk hasznosítani. A kutatói és fejlesztői munka eredményeként az OMSZ-beli operatív előrejelzői tevékenység színvonalát támogató munkára van lehetőség. Köszönetünket szeretnénk kifejezni a hallgatók lelkiismeretes munkájáért és a Meteorológiai Tanszék magas színvonalú oktatói és belső konzulensi tevékenységért.

Hivatkozások

- Böloni, G., Kullmann, L. and Horányi, A. 2009: Use of ECMWF lateral boundary conditions and surface assimilation for the operational ALADIN model in Hungary. *ECMWF Newsletter* 119, 29-35.
- Buizza R., Bidlot, J.-R., Wedi, N., Fuentes, M., Hamrud, Holt, G., Palmer, T., 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 alkalmazásaik*, 7-22.
- Ihász I., 2003: Operatív középtávú időjárás előrejelző modellezés az ECMWF-ben, 29. *Meteorológiai Tudományos Napok: Az időjárás numerikus előrejelzése*, 119–128.
- Ihász I., 2008: Közép és hosszútávú előrejelzési modell-termékek és alkalmazási lehetőségeik. 34. *Meteorológiai Tudományos Napok: Az időjárás előrejelzés korszerű módszerei és alkalmazási területei*, CD és http://www.met.hu/omsz.php?almenu_id=omsz&pid=seminars&pri=14&mpx=0

- Ihász I., Z. Üveges, M. Mile and Cs. Németh, 2010: Ensemble calibration of ECMWF's medium range forecasts. *Submitted to Időjárás*
- Hagedorn, R., 2008: Using the ECMWF reforecast dataset to calibrate EPS forecasts. *ECMWF Newsletter 117*, 8-13.
- Hágel, E, 2003: Szélsőséges időjárási helyzetek korai felismerése az Extreme Forecast Index használatával, *Diplomamunka, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Kaba, M., 1995: Csatlakozásunk a Középtávú Időjárási Előrejelzések Európai Központjához. *Léggör, 1995/4*, 34.
- Marbouty, D., 2010: ECMWF's plan for 2010. *ECMWF Newsletter 122*. 4-5.
- Mile, M., 2008a: Az ECMWF ensemble előrejelzések kalibrációja. *Tudományos diákköri dolgozat, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Mile, M., 2008b: Az ECMWF ensemble előrejelzések utólagos kalibrációja. *Diplomamunka, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Németh Cs., 2010: Az ECMWF kalibrált valószínűségi előrejelzéseinek verifikációja. *BSc szakdolgozat, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Osváth, Sz., 2004: Az ECMWF ensemble előrejelzéseire alapozott Kárpát-medence központi clusteranalízis vizsgálata. *Diplomamunka, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Simmons, A., Uppala, S., Dee, D. and Kobayashi, S., 2007: ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter No. 110*, 25-35
- Szintai, B., 2005: Az ECMWF középtávú ensemble előrejelzések clusterezése. *Tudományos diákköri dolgozat, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Szintai, B., 2006a: Rövidtávú ensemble előrejelzések készítése az ALADIN modellel. *Tudományos diákköri dolgozat, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Szintai, B., 2006b: Rövidtávú ensemble előrejelzések készítése az ALADIN modellel. *Diplomamunka, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Tajti, D. 2009: Az ECMWF determinisztikus és valószínűségi előrejelzések összehasonlító verifikációja. *Diplomamunka, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Tajti, D. 2010: Az ECMWF előrejelzések szezonális verifikációja. *Diplomamunka, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Tóth, H., 1999: Trajektória számítási modellek eredményeinek statisztikai vizsgálata. *Tudományos diákköri dolgozat, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Tóth, H., 2001: Trajektória és diszperziós modellek alkalmazása a nagyskálájú szennyezőanyag szállítás leírásában. *Tudományos diákköri dolgozat, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Uppala, SM; Kallberg, PW; Simmons, AJ; Andrae, U; Bechtold, VD; Fiorino, M; Gibson, JK; Haseler, J; Hernandez, A; Kelly, GA; Li, X; Onogi, K; Saarinen, S; Sokka, N; Allan, RP; Andersson, E; Arpe, K; Balmaseda, MA; Beljaars, ACM; Van De Berg, L; Bidlot, J; Bormann, N; Caires, S; Chevallier, F; Dethof, A; Dragosavac, M; Fisher, M; Fuentes, M; Hagemann, S; Holm, E; Hoskins, BJ; Isaksen, L; Janssen, PAEM; Jenne, R; McNally, AP; Mahfouf, JF; Morcrette, JJ; Rayner, NA; Saunders, RW; Simon, P; Sterl, A; Trenberth, KE; Untch, A; Vasiljevic, D; Viterbo and P; Woollen, 2005: The ERA-40 Reanalysis. *Quart. J Roy. Met. Soc*, 131, 2961-3013.
- Üveges, Z., 2009a: Az ECMWF havi ensemble előrejelzések kalibrációja, *Tudományos diákköri dolgozat, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Üveges, Z., 2009b: Az ECMWF havi ensemble előrejelzések kalibrációja, *Diplomamunka, Budapest Eötvös Loránd Tudományegyetem*
- Vitart, F., Bonet, A., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bidlot, J.R., Buizza, R., Fuentes, M, Hofstadler, A., Molteni, F. and Palmert, 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. *Springer*

A RÖVID -ÉS A KÖZÉPTÁVÚ IDŐJÁRÁS ELŐREJELZÉS GYAKORLATI MÓDSZERTANA

Bonta Imre

e-mail: bonta.i@met.hu

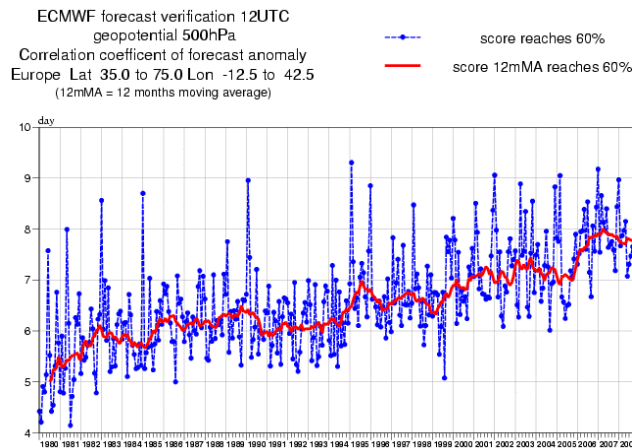
Bevezetés

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 előrejelzéseknel döntő. A szinoptikus-dinamikus meteorológiai 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 foglalkozunk szinoptikus klimatológiai feldolgozásokkal is, amelyek ma is hasznosak a gyakorlatban, különösen, ha azokat modelleredményekkel kombináljuk. Az a megállapítás, hogy a meteorológiai előrejelzések beválása évről évre javul, ma már közhelynek számít. A beválások javulása döntő mértékben az egyre megbízhatóbb modelleknek köszönhető. A sikeres előrejelzésekben az említetteken kívül 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, beválására. 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 az ensemble előrejelzésekről lesz szó, amelyek elsősorban a középtávon hoztak új szemléletet a prognózisokban.

Számítógépes előrejelzések

Az elmúlt évtizedekben a számítógépes előrejelzések elengedhetetlen eszközeivé váltak a prognózisok készítésének. Miközben ultrarövidtávon a távérzékelési eszközöknek, rövidtávon pedig a hagyományos szinoptikus módszereknek a numerikus modellek mellett mind a mai napig fontos a szerepük van, addig a középtávú előrejelzéseknel a „tisztán” számítógépes előrejelzésekkel készülő prognózisok gyakorlatilag egyeduralkodóvá váltak.

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 30 évben még 12 havi mozgó átlaggörbén is megfigyelhetők visszaesések. Az ábráról egyébként az olvasható le, hogy hanyadik 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 30 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 beválása legyen a jobb.



1.ábra. Az ECMWF modell beválásának a javulása 1980-tól 2010-ig.

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 csapadékkéntesség.

Dinamikus-szinoptikus módszerek

A dinamikus-szinoptikus szinoptikus módszereken a megfigyelések és a rádiószondás mérések (felszállások, topográfiai térképek) kiértékelését, illetve a talajtérképeken analizált időjárási objektumok (ciklonok, anticiklonok, frontok, jet zónák, mezoléptékű képződmények, mint például konvergencia zónák) nyomon követését és szinoptikus-dinamikus meteorológiai szemléletű kiértékelését értjük. Az alábbiakban tekintsük végig, hogy a legfontosabb, az operatív szolgálatban használt topográfiai térképeken melyek a megfigyelhető legfontosabb objektumok, folyamatok. Mindegyik térképen érdemes meghatározni a térségünkben lévő izopihszák konfigurációját, a hőmérsékleti és a nedvességi advekciót, a konvergencia és örvényesség helyét. Az 500 hPa-os topográfia térképen elkülöníthetők a Rossby-hullámok (teknő, gerinc), valamint a jet-zónákhoz kapcsolódóan a nagy szélességű zónákat. A nagy magassági szél alatt általában nagy a vertikális szélnyírás, ami kedvez a csapadék kialakulásának, illetve a talajközeli széllekeések 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 front analízis 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. Az MKK fogalmát (az 1980-as évektől) az USA-ban kezdték alkalmazni, majd a hazai gyakorlatban (*Bodolainé és Tanczer* munkássága révén) is meghonosodott. Ez egy többnyire ellipszis alakú, ún. nagy mezoszkálájú, akár több száz km átmérőjű zivataros tömb, amely gyakran perzisztens. Felismerése az infraképek alapján történik bizonyos küszöbérték és méret megadásával (*Maddox*, 1980).

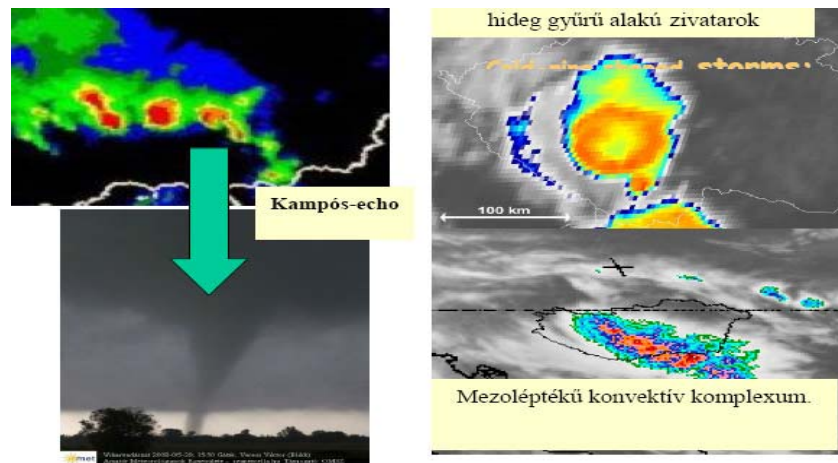
Szinoptikus klimatológiai vizsgálatok, döntési eljárások

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 országrészben 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 széllelőkések 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).

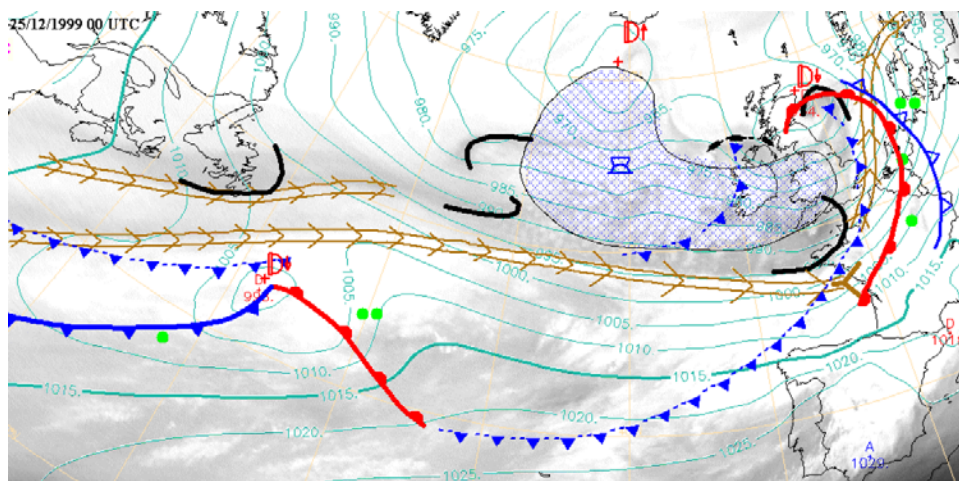
A meteorológiai előrejelzéseknél használt módszerek egymásra hatása

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 – Mezőléptékű Konvektív Komplexum, vagy az ún. hideg gyűrű alakzatok), melyekhez különösen intenzív zivatarok, illetve heves csapadéktevékenység, vagy a kampós echó 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 and 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.

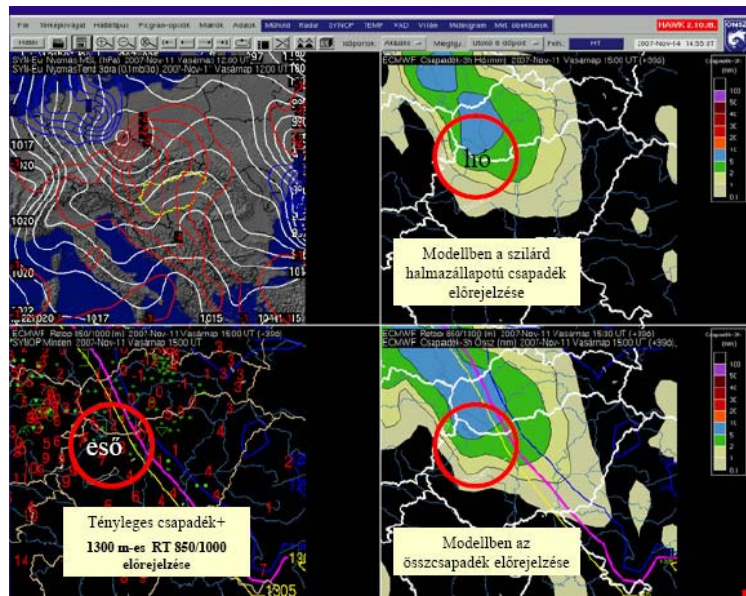


3. ábra. P. Santurette által javasolt analízis: műholdas vízgőz felvételek alapján azonosítják a nagy potenciális örvényesség (PV) megváltozásával jellemzett területeket (vastag fekete vonalak, és ezeket a talajszinoptikus térképeken a frontanalízissel együtt ábrázolják).

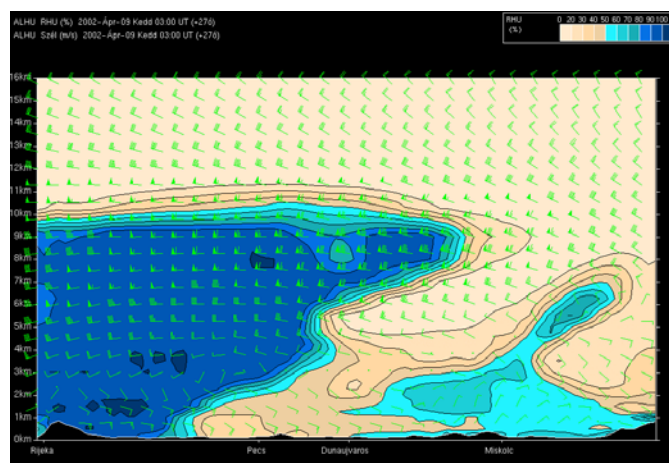
A távérzékelési eszközök által nyújtott információkat közvetlenül a nowcasting és az ultrarövidtávú előrejelzéseknél használjuk, de a modellek révén ezek hasznosulnak a többi időtávú előrejelzésnél is. A modellekben ugyanis egyre fontosabb bemenő információt jelentenek a műholdas adatok. Míg korábban (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.

A következő példa azt mutatja be, hogy a szinoptikus klimatológiai kutatások és a modellek eredményeinek együttes felhasználása különösen hatékony lehet az előrejelzések készítésénél. A 4. ábrán látható esettanulmány szerint az ECMWF modell az összcsapadék döntő részét hó formájában jelezte előre (l. 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.



4. ábra. A szinoptikus-klimatológia kombinálása a modell előrejelzésekkel hasznos lehet az előrejelzési gyakorlatban. 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.



5. ábra. A relatív nedvesség és a szél vertikális eloszlása az ALADIN modell alapján

A technikai fejlődés szerepe a szinoptikusi 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 szinoptikusi 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.

Fontos szempont az is, hogy 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 előrejelzési 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 bevalása 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 mind az inverziós helyzetek kezelésében, mind a konvektív csapadék előrejelzésében az utóbbi években csak kismértékű javulást láttunk. 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. Az alábbiakban összefoglaljuk ennek okait:

- Gyakran előfordul, hogy a modell már az első időlépcsőkben hibás, például kevesebb nedvességet (felhőt) ad, mint amennyi a valóságban van. Ilyenkor indokolt felülbírálni a modellt, hiszen a nedvesség alábecslése miatt nyilvánvalóan a nedvesség előrejelzés is korrekcióra szorul.
- A szinoptikusok 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-színti felhőzetet és felülbecsülik a hőmérséklet napi ingását (Bonta és Hirsch, 2008). Nyári időszakban,

leszámítva a tartósan felhős csapadékos időszakokat, általában jellemző a modellekre, hogy a hőmérséklet napi ingását alábecsülik.

- A modellek nem mindig fogják meg egy adott térség szinoptikus-klimatológiai sajátosságait. Például 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 (téli 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 mozaikszó 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 fáklya diagramok, az EPS meteodiagramok, valamint a csapadék valószínűségi mezők ma már elengedhetetlen kellékei 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 finomabb a felbontása, mint az ensemble tagoknak. A napok múlásával a beválás tekintetében növekszik a különbség az EPS átlag és a determinisztikus modell között. További haszna az ensemble előrejelzéseknek, hogy segítségével előrejelezhető a középtávú prognózisok megbízhatósága. Ez ugyanis nem csak attól függ, hogy hányadik napra vonatkozik az előrejelzés. A különböző valószínűségi előrejelzési mezők segítségével pedig prognosztizálható a különböző extrém jelenségek előfordulásának az esélye is. A középtávú előrejelzések készítésénél egyre inkább használjuk a klasztereket is. Ezek segítségével bizonytalan időjárási helyzetekben különböző meteorológiai forgatókönyvek prognosztizálhatók.

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 modellekre, 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 évek óta eléri a 2–4 %-ot. 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, több más modellt is használunk, egyre jobban alapozunk az ensemble előrejelzésekre, kiszűrjük a modellek naponta bekövetkező ingadozásait (az ensemble átlag kevésbé ingadozik).

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 (elsősorban a mezőszerkesztés) miatt egyre több idő marad a tényleges szakmai munkára, ami feltétlenül hozzájárul a prognózisok színvonalának emelkedéséhez.

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 hangsúlyoztuk, hogy a jövőben fontos feladat lesz a valószínűségi információk beépítése az előrejelzési szövegekbe, produktumokba. Erre jó példát mutat az OMSZ-nél 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, *Légkör* 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.

CSAPADÉK-ELŐREJELZÉSEK AZ ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLATNÁL

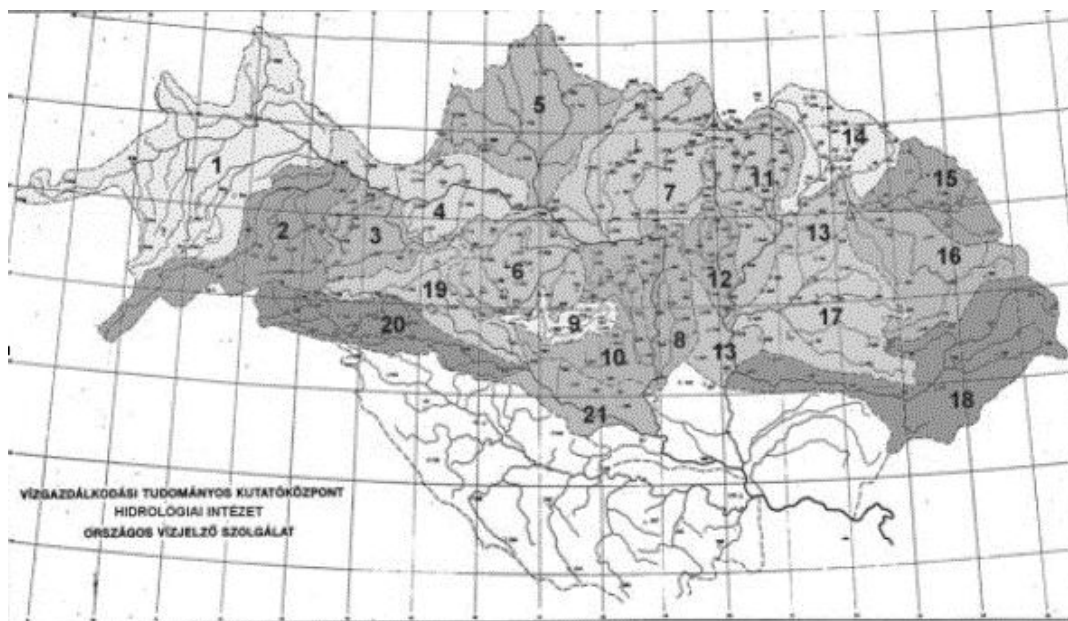
Fehér Balázs

Országos Meteorológiai Szolgálat

e-mail: feher.b@met.hu

Bevezetés

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnak állami feladatként napi rendszerességgel kell csapadék-előrejelzést készítenie a Duna-Tisza vízgyűjtőterületére, és ezt a VKK részére eljuttatnia. Alapesetben naponta kettő, árvízveszélyes időszakban négy alkalommal kell előrejelzést készíteni. Az előrejelzés középtávra, 10 napra szól, az első 2 napban négyórás, utána 12 órás csapadékösszeget adunk tized milliméteres pontossággal. Természetesen a vízügyi kollégák is tisztában vannak a csapadék-előrejelzések természetével, annak a problémáival és bonyolultságával, de az ő vízszintet előrejelző modelljüknek ilyen bemenő adata van szüksége. Maga a terület, ahova az előrejelzés szól a Duna vízgyűjtőjének azon része, ahonnan Magyarországot eléri a vizek, tehát a Felső-Dunától Erdélyig, de annak keleti, délkeleti része, az Olt és a Zsil völgye már nem tartozik ide. A területet 21 kisebb vízgyűjtőre osztották fel, amelyek a mellékfolyók vízgyűjtő területei (Pl. Inn, Traun-Enns, Rába, Szamos, Maros, stb.), erre a 21 részvízgyűjtőre külön-külön kell előrejelzést adni. A 21 területről az 1. ábrán látható térkép.



1. ábra. A Duna-Tisza vízgyűjtőterülete, a 21 részvízgyűjtővel

A vízügy részére készül még 2 méteres hőmérséklet, illetve 0 fok magasság előrejelzés is, mivel a várható vízszint alakulásánál ezek is fontos tényezők (a hegyekben mekkora az a terület, ahol tavasszal olvadni fog). Most ezek verifikálásával nem foglalkozunk.

Másfajta csapadék-előrejelzés is készül a Szolgálatnál, ez az alapprognózisok része. Három napra, a hat magyarországi körzetre (Budapest, Észak-Magyarország, Észak-Alföld, Dél-Alföld, Dél-Dunántúl, Észak-Dunántúl) szól, és nem konkrét csapadékmennyiséget, hanem intervallumokat tartalmaz (nyom, nyom–2, 2–5, 5–10, 10–20, 20 mm felett), hogy várhatóan melyikbe fog esni a 24 órás csapadékösszeg. A 4–7. napokra már nem a konkrét

csapadékmennyiségről, hanem a csapadék valószínűségéről (pontosabban a napi 5, illetve a 20 mm-t meghaladó csapadékösszeg valószínűségéről) tájékoztatjuk a nagyközönséget. Ezen információ az ensemble futtatásokból ered. Ebben a cikkben ezekkel a fajta előrejelzésekkel nem foglalkozunk, csak a vízügy számára készülő, részletesebb prognózis bevalását vizsgáljuk.

A szinoptikus munkája

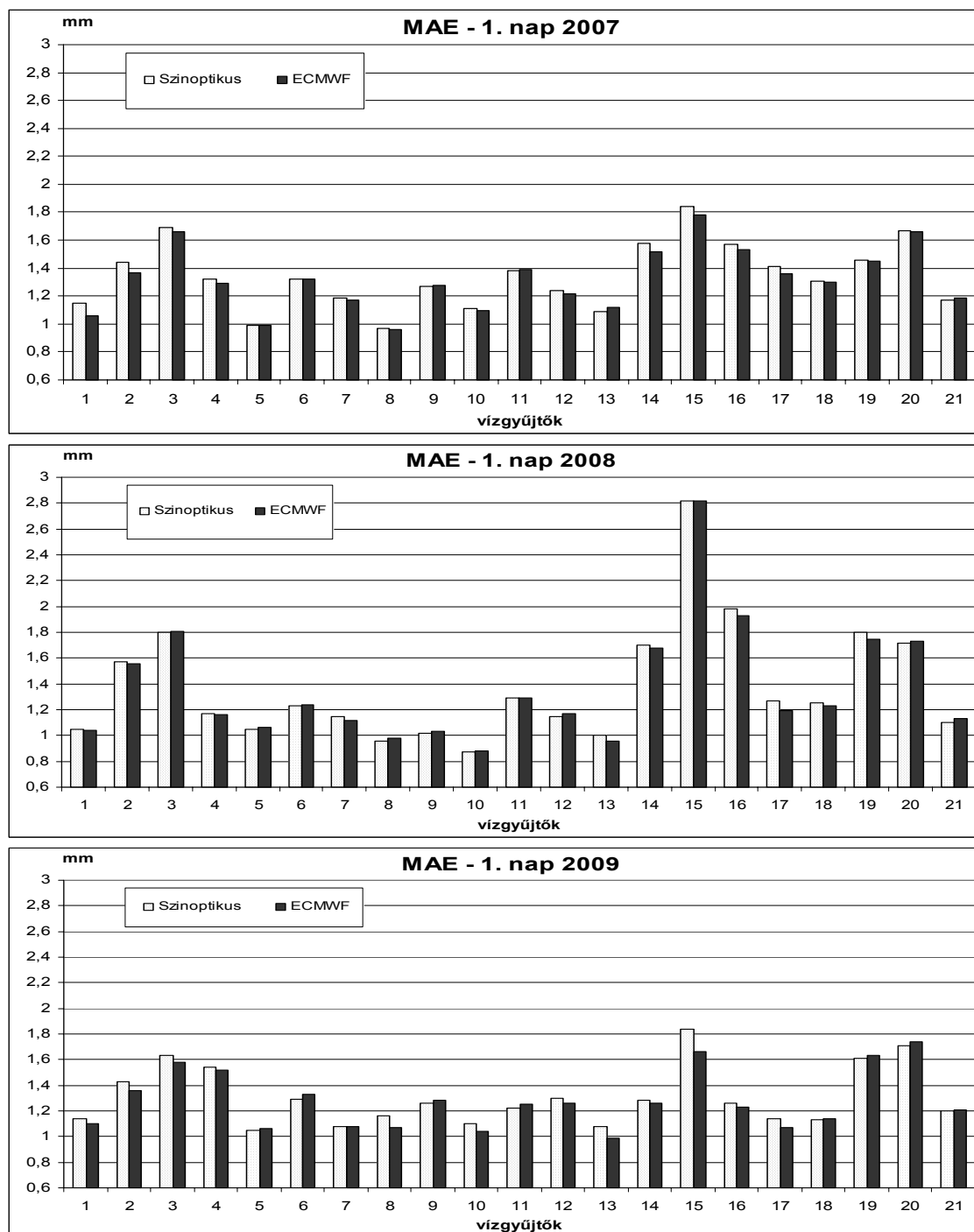
Nem a szinoptikusnak kell begépelnie az adatokat, hiszen gondoljunk csak bele, hogy mennyi adatról van szó: 21 vízgyűjtőre, 2 napig 6 óránként, majd a többi 8 napra 12 óránként kell adat, ez majdnem 600 adat. Amit csak lehet, azt automatizálunk. Ezért a szinoptikusnak felajánl az alkalmazás egy kezdeti adatsort, ezt az ECMWF modell eredményeiből olvassa ki a program, és azt áttekinthető táblázatba rendezi. A szinoptikusnak lehetősége van módosítani a táblázaton, ahol szükségesnek látja. A gyakorlat az, hogy a reggel készülő prognózison módosít, a délutánin nem, ekkor a nyers modelladat megy el a felhasználóhoz. Természetesen árvízveszélyes helyzetben a délutánit is átnézi az előrejelző. Az első két napra több módosítás történik, ezekhez a finomabb felbontású modelleket, illetve a valóság és az ECMWF modell kiindulási időképe közti különbséget veszik alapul. Tehát ha pl. a modellben sok csapadék van az első pár időlépcsőre, de a valóságban ez nem következett be, vagy a csapadékmező mozgása nem olyan, mint ahogy azt a modell becsülte, akkor módosít az előrejelző. Ugyancsak módosít olyan tipikus helyzetekben, ami nagy csapadékot okozhat, és a modell rendszeresen alulbecsli a csapadék mennyiségét. Ilyen a délnyugati, nyugati áramlással érkező meleg és nedves légtömeg, amikor az Északkeleti-Kárpátok szél felőli (a medence felé eső) oldalán nagy mennyiségű csapadék esik le, amit tavaszi időszakban az olvadásból eredő víztöbblet is növel. Ekkor a Felső-Tisza és a Bodrogon lehet több eső a modell által adott mennyiségnél. Középtávon (a 2. nap utáni időszakra) a determinisztikus modell adatai állnak elő, ezt lehet módosítani az EPS-átlag, a clusterek és a GFS modell függvényében.

A produktum verifikálása

A verifikálás során összehasonlításra kerül a modell, és a szinoptikus közti különbség, ki mekkora hibákat vétett az év során. Általában fél, vagy egy éves időszakot verifikálnak, de az előrejelző, már másnap megnézheti, hogy az adott napra szóló egynapos prognózisa mennyire vált be, sikerült-e javítani a modell által adott prognózison. A verifikáláshoz elengedhetetlen a mérési adatok összegyűjtése. Mivel ebben az esetben több országból kell ezt megtenni, nehézkessé válik a rendszer. A nyugati vízgyűjtők Németország, Ausztria, Svájc, Olaszország területére esnek, innen relatíve sok mérési adatunk van, de Ukrajnából és Romániából rendkívül kevés. Ez természetesen rányomja a bélyegét a verifikáció minőségére is, a kiértékelésnél ezt mindenképpen figyelembe kell venni.

Az utolsó három év átlagos abszolút hibáiból látszik, hogy többé-kevésbe ugyanaz a tendencia (2. ábra). Vagyis a hegyvidéki vízgyűjtők problémásabbak, különösen igaz ez a Tisza felső részének a vízgyűjtőire. A 2008-as évben kiugróan nagyobbak lettek a hibák, mint a többi esetben. A diagramon az is megfigyelhető, hogy a modell és a szinoptikus között nagyon kicsi a különbség, és nem minden vízgyűjtőn tud javítani a modellen.

Az átlagos hiba annyiban különbözik ettől, hogy ott a fölé- és alábecslések kiejtik egymást, így nem kapunk reális képet a hiba nagyságáról. Viszont látni lehet rajta, ha egy területen szingnifikánsan alá- vagy fölébecslés következik be. A 3. ábrán láthatjuk, hogy a legtöbb esetben több csapadékot jelzünk előre. A 2008-as évben volt egy relatíve jelentősebb alábecslés a Felső-Tisza esetében. Az előző ábrán láthattuk, hogy ekkor a hibák is jóval nagyobbak voltak, sokszor tévedtek az előrejelzések negatív irányba, és ez a hiba összeadódott.

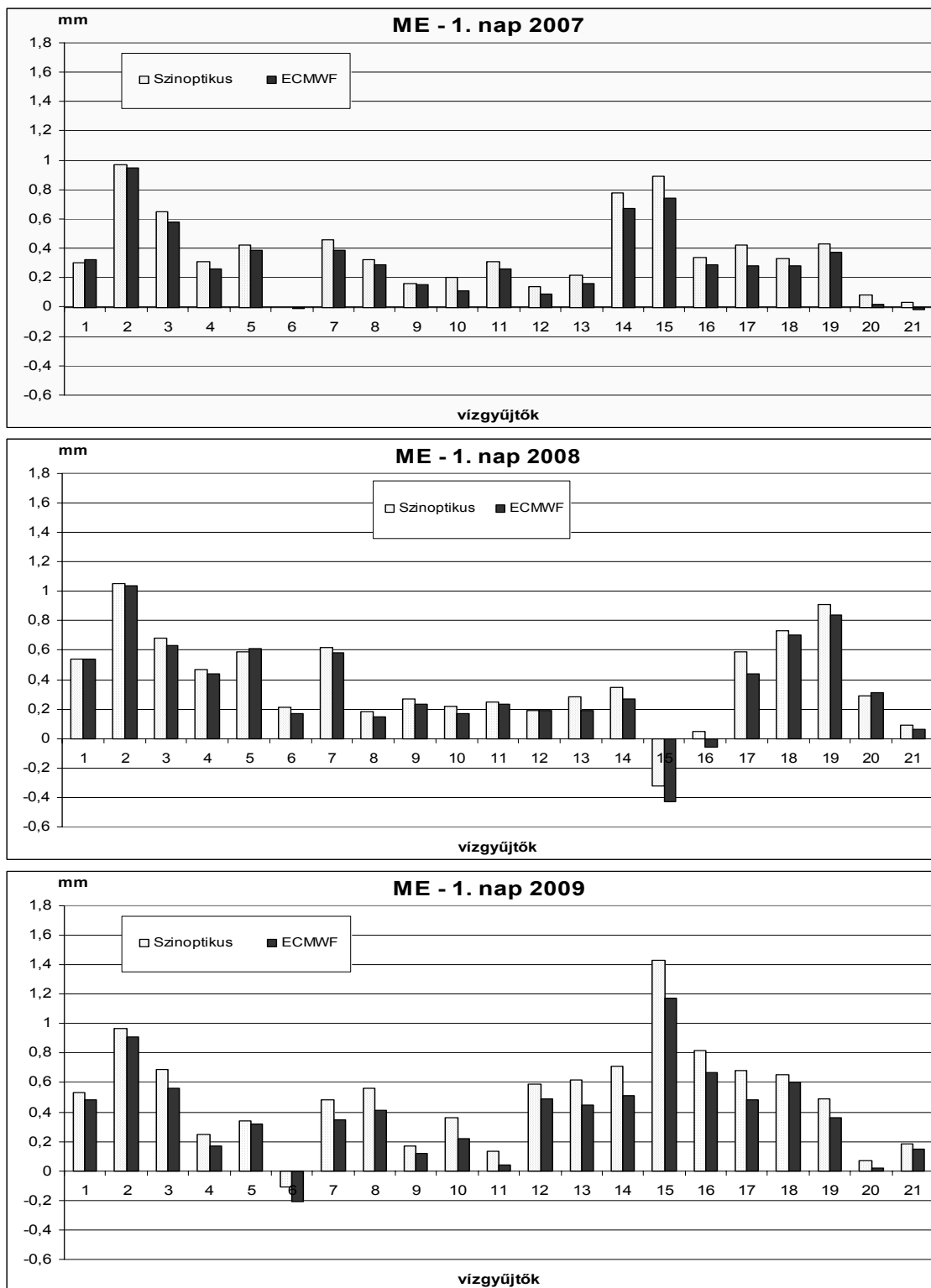


2. ábra. A szinoptikus és a modellek átlagos abszolút hibája az egyes vízgyűjtőkre 2007, 2008, 2009-ben

Tervek

A fentiekben bemutatott csapadék-előrejelzést érdemes lenne fejleszteni. Jelenleg csak az ECMWF modellből készül ilyen típusú produktum, illetve segédanyag, de célszerű lenne ezt rövid távon az ALADIN modellre is elkészíteni. A középtávú előrejelzések javítása érdekében érdemes volna megvizsgálni, hogy az ensemble átlagból származó előrejelzés mely területeken és mely napokon javíthatja a determinisztikus modell által adott előrejelzést. Ugyanakkor az ensemble rendszer további elemeinek a bevonása is érdekes lehet (cluster átlagok,

reprezentatív tagok által adott előrejelzés). Mindezeket egy szakdolgozat keretében is el lehet végezni, és akár a szinoptikus helyzet, vagy a csapadékmennyiség függvényében külön vizsgálatot is érdemes lehet készíteni, hogy kirajzolódjanak az igazán problémás területek és időszakok.



3. ábra. A szinoptikus és a modellek átlagos hibája az egyes vízgyűjtőkre 2007, 2008, 2009-ben

TAPADÓ HÓ KIALAKULÁSÁNAK FELTÉTELEI, KLIMATOLÓGIÁJA ÉS MENNYISÉGI ELŐREJELZÉSE

Tóth Katalin, Kolláth Kornél

Országos Meteorológiai Szolgálat, H-1525, Budapest, Pf. 38
e-mail: toth.k@met.hu

Bevezetés

A világ számos pontján, főként az északi országokban és magashegységek területén visszatérő probléma a légköri jegesedés. Az általa évről évre okozott károk nemcsak a gazdaságra, hanem az élővilágra, és közvetlenül az emberek életére is hatással vannak. Gondoljunk csak az 1998 karácsonyán lecsapó nagy kanadai „jégviharra”, amely erdőségeket pusztított el, több állam területén villanypóznákat döntött ki, felsővezetéseket szakított le, és több ezer háztartásban okozott hetekig elhúzódó áramszünetet.

Hazánk éghajlatának köszönhetően ugyan ritkábban fordulnak elő veszélyes méreteket öltő jeges lerakódások, de az elmúlt évek eseményei rávilágítottak arra, hogy a légköri jegesedés nem elhanyagolható tényező a Kárpát-medencében sem. 2009. január 27-28-án Vas és Zala megyékben, majd 2009. február 8–9-én a Dunántúli-középhegység területén, tehát rövid időn belül kétszer is olyan időjárási helyzet alakult ki, amikor a nagy mennyiségű tapadó hó felsővezetéseket szakított le, villanyoszlopokat döntött ki, és ezáltal emberek ezrei maradtak áram nélkül. A 2009. januári eseményekről a BME vizsgálatot folytatott a bekövetkezett távvezeték-szakadások, oszlopdőlések műszaki körülményeiről, az OMSZ pedig a klimatológiai és szinoptikai háttérrel készített tanulmányt.

A tapadó hó problémaköre nem ismeretlen a szakemberek számára. Az OMSZ az áramszolgáltatónak évek óta készít figyelmeztető előrejelzést a téli félévben. Ugyanakkor a jelenlegi gyakorlatban csak a tapadó hó egzisztenciájának előrejelzésére van mód, hiszen a veszélyjelző meteorológusnak nem áll rendelkezésére olyan információ, amelyre támaszkodva objektív döntést tudna hozni, hogy ténylegesen hol és főként mennyi nedves hó halmozódhat fel a vezetékeken.

A légköri jegesedés minden fajtájának, így a tapadó hó kialakulásának is rendkívül komplex a fizikai háttere. A mai napig számos nagy költségvetésű kutatás központi témája a felhalmozódó jég- és hóteher mennyiségi előrejelzése. Munkánk során a nemzetközi szakirodalomban fellelhető algoritmusok közül néhányat kiválasztottunk, és azokat alkalmazva kísérleti futtatásokat végeztünk az OMSZ-nél használt többféle modell háttérrel.

A légköri jegesedés fajtái, és a tapadó hó kialakulásának feltételei

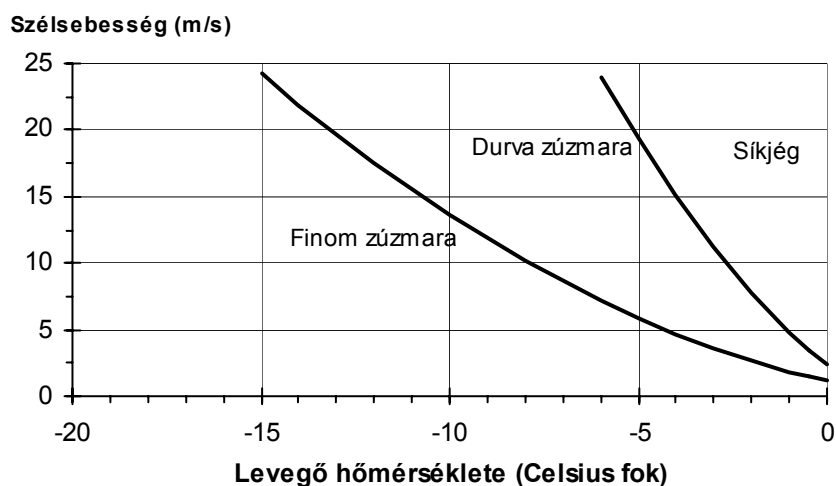
A légköri jegesedés fogalmába tartozik minden olyan esemény, amelynek során mikro-, vagy makrocsepdek által jeges lerakódás keletkezik a felszín tereptárgyain. A különböző típusok kialakulásának feltételei és körülményei eltérőek (1. táblázat). Hazánkban a légköri jegesedés bármely fajtája előfordulhat a téli félévben, de mi most kizárólag a tapadó hó esetével foglalkozunk. A tapadó hó ismertetőjele, hogy körszimmetrikusan tapad meg a felsővezetéseken, de más tereptárgyakon is könnyen felhalmozódik. A vezetékeken néhány centimétertől akár több tíz centiméterig is terjedhet az átmérője, hatalmas többletsúlyként nehezedve azokra.

A tapadó hó kialakulásához bizonyos időjárási elemek speciális együttes fennállása szükséges. A léghőmérséklet ideális esetben 0 és 3 Celsius fok között mozog, amely biztosítja

a hópehelyben a folyékony víztartalmat. A hópehely és a vezeték között fellépő erős adhéziós erőnek köszönhetően pedig a hópehelyek a felsővezetékhez tudnak tapadni (2. ábra).

1.táblázat: légköri jegesedés különböző típusai és kialakulásuk körülményei (Tóth, 2007)

Jegesedés típusa	Hőmérséklet [°C]	Szélesség [m/s]	Csepp-méret	Víztartalom levegőben	Karakterisztikus idő	Sűrűség [kg/m³]
Csapadékból származó jegesedés						
Ónos eső/szitalás	~ 0	nem játszik szerepet	nagy	közepes	pár óra	900
Tapadó hó	0<t<3	nem játszik szerepet	hópehelyek	nagyon magas	pár óra	300 - 600
Felhőn belüli jegesedés						
Síkjég	ld.1.ábra	ld.1.ábra	közepes	magas	pár óra	900
Durva zúzmara	ld. 1.ábra	ld. 1.ábra	közepes	közepes	napok	600 - 900
Finom zúzmara	ld.1.ábra	ld.1.ábra	kicsi	alacsony	napok	200 - 600



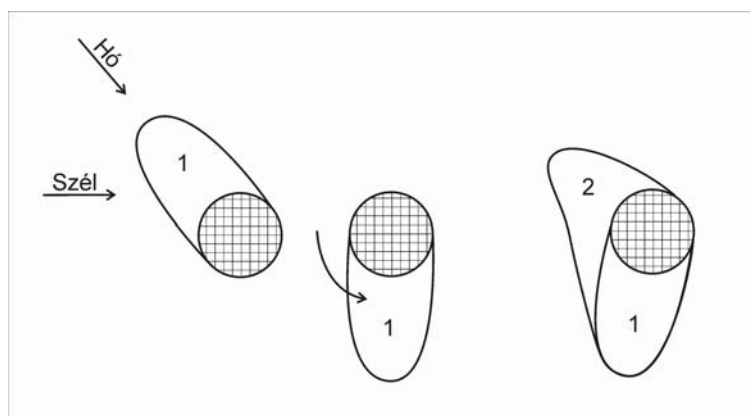
1. ábra. A lerakódott jég típusa a szélesség és levegőhőmérséklet függvényében (Tóth, 2007)



2. ábra. Szabadvezetéken kialakult, körszimmetrikusan lerakódott tapadó hó.
Forrás: E.ON Észak-dunántúli áramhálózati Zrt. 2009. február 9. Bakony

A kialakulás másik fontos tényezője a szél. Bármely szélességnél kialakulhat tapadó hó, de annak erőssége kulcsfontosságú szerepet játszik. A felsővezetékre rakódó hó esetében

két erőről kell említést tenni: a szél által kifejtett aerodinamikai erőről és a gravitációs erőről. Elsősorban e két erő közötti egyensúlyi állapot határozza meg a vezetékre rakódott hó nagyságát és mozgását. Minél nagyobb a szél, annál nagyobb mennyiségben halmozódik fel a hó, mielőtt elfordulna a vezeték mentén. Miután elfordult, kezdődhet előlről a halmozódás mindaddig, míg körszimmetrikusan be nem fedi a teljes vezetéket (3. ábra). Ha a folyamat közben változik a szél sebessége, előfordulhat, hogy a hó aszimmetrikusan rakódik rá a vezetékre, de a szélesebb nagymértékű és hirtelen csökkenése akár a hó teljes lehullását is okozhatja, hiszen emelő ereje a gravitációval szemben megszűnik (Wakahava et al., 1977).



3. ábra. Tapadó hó kialakulásának sematikus ábrája (Wakahava et al., 1977)

A légköri jegesedés mennyiségi előrejelzése

A jegesedés mennyiségének becslésére sok módszer megtalálható a nemzetközi szakirodalomban, de ezek közül azok, amelyek a legpontosabb megoldást szolgáltatják, több olyan paraméter ismeretét is feltételezik, amelyek a kialakulás során valóban fontos szerepet játszanak, de mérési technikájuk, illetve becslési eljárásuk még nem kiforrott. Ilyen például a hópelyhek és vízcseppek méret szerinti eloszlása, vagy koncentrációja. Éppen ezért a legtöbb alkalmazott módszerekben erős egyszerűsítésekkel élnek.

Munkánk során 2 egyszerű eljárást használtunk a jeges lerakódások mennyiségi előrejelzésére.

$$1. \text{ Sundin és Makkonen (1998): } m = P \cdot t \cdot R \quad (1)$$

ahol m az akkumulált hó tömege [kg/m], P a csapadék intenzitása [mm/h], t az idő [h], R a körkörös felhalmozódott hó sugara [m]

Azzal a feltételezéssel éltünk, hogyha a nedves hőmérséklet 0 és 4 °C között alakul, valamint a hópelyhek mennyisége legalább 60 %, a vízcseppeké pedig maximum 40 % (Farzaneh, 2008), akkor megfelelőek a körülmények tapadó hó kialakulásához. Ez utóbbi feltételezés azért volt fontos, hogy kiszűrjük azokat az eseteket, amikor hasonló hőmérsékleti körülmények között havas eső, vagy eső alakul ki. Ha pedig a száraz hőmérséklet legalább 3 órán keresztül 4 Celsius fok felett alakul, akkor feltételezésünk szerint a teljes hótömeg leolvad vagy leesik a felsővezetékéről.

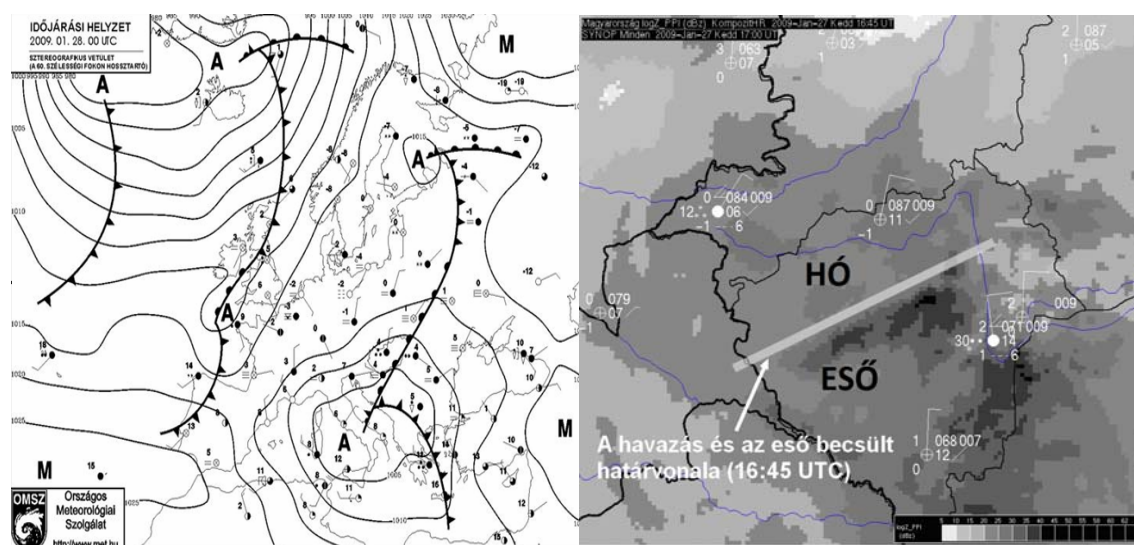
$$2. \text{ Poots (1996): } \delta m = P \cdot U \cdot \sigma \cdot a \cdot dt = 2\pi \cdot \rho_s \cdot a \cdot da \quad (2)$$

ahol δm a felhalmozódott hó tömege ($t, t+dt$) időpont között [kg/m], P a csapadék intenzitása [mm/h], U a szélesebbesség [m/s], σ dimenzió nélküli felhalmozódási együttható, a a

körkörösén felhalmozódott hó sugara t időpontban [mm], ρ_s a felhalmozódott hó sűrűsége, amely a szélsőbesség függvénye [kg/m^3]

Eredmények bemutatása a 2009. január 27–28-i események tükrében

2009. január 27-én egy mediterrán ciklon érte el az országot, amelynek áramlási rendszerében délnyugat felől nedves, kelet felől pedig enyhébb levegő érkezett a Kárpát-medence térségébe. Ennek következményeként az ország nagy részén eső volt az uralkodó csapadékforma, de a Dunántúl bizonyos tájain, illetve a hegyvidéki területeken a csapadék intenzívebbé válásának köszönhetően havas eső, majd havazás vált uralkodóvá. Zala és Vas megyékben ideális körülmények alakultak ki tapadó hó felhalmozódásához (4. ábra).



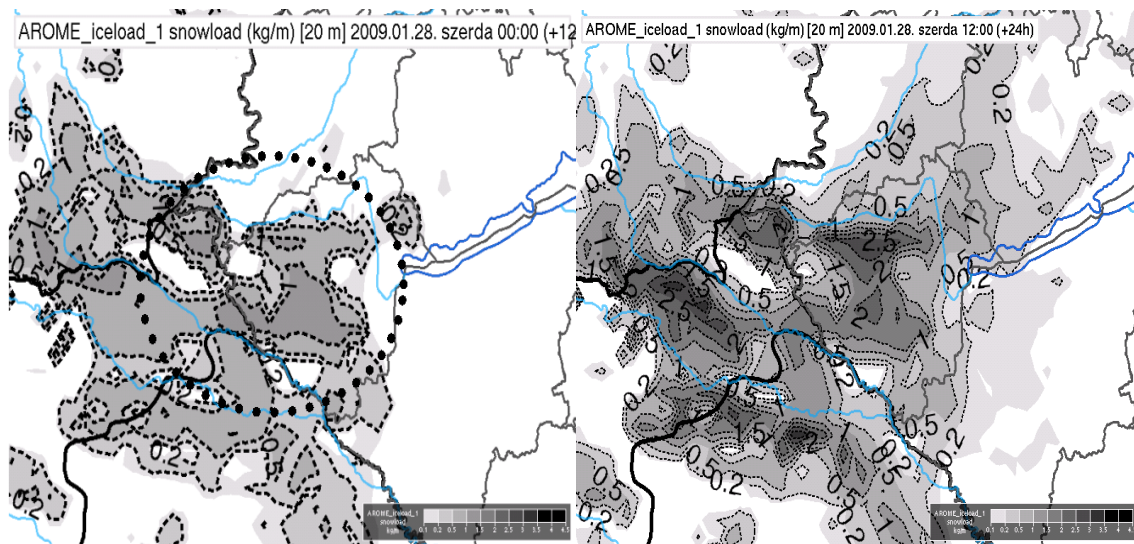
4. ábra. Talajanalízis 2009. január 28-án 00 UTC időpontban. A mediterrán ciklon középpontja az Adriai-tenger fölött helyezkedik el (balra). A szinoptikus állomások jelentései és egy jellemző radarkép a kritikus órákban (17:45, 16:45 UTC) (jobbra).

A kísérleti futtatások közül annak az eredményeit mutatjuk be, amely mind térben, mind mennyiségben a legjobb eredményt szolgáltatva. Ez az AROME numerikus modell január 27-i 12 UTC kezdeti időpontból készült futtatása. Általában a modellek jól jelezték előre a nagy mennyiségű csapadék területét. Az AROME sikerének kulcsa azonban a szinte tökéletes hőmérsékleti előrejelzés volt. Mint korábban említettük, nagyon szűk az a hőmérsékleti tartomány, ahol nedves tapadó hó alakul ki. A modellben az érintett megyék területén a hőmérséklet 0 és 1 °C között mozgott azokban az időlépcsőkben, mikor a kritikus mennyiségű csapadék is megjelent.

A felhalmozódott hó maximális tömege szimulációnk szerint 2,5 kg/m, illetve kevéssel e fölött alakult. Mint azt az 5. ábra is mutatja, nemcsak Magyarországon, hanem a tőlünk nyugatra fekvő szomszédos országokban is nagy mennyiségű tapadó hó halmozódott fel a felsővezetéseken. Külföldi hírforrások szerint a dunántúlihoz hasonló üzemzavarok sújtották azt a térséget is.

A BME a károk vizsgálata során megállapította, – amelyet fényképes beszámolók is alátámasztottak – hogy a 12,5 mm keresztmetszetű sodronyokon a körszimmetrikusan lerakódott hó súlya 2,7 és 7,7 kg között mozgott méterenként (Szabó és Farkas, 2009). Az OMSZ által készített tanulmány a Szentgotthárd állomáson mért zúzmaramérő műszerrel mért adatok felhasználásával készült. Az eredményekből kiderül, hogy Szentgotthárd térségében az ilyen típusú és hasonló anyagi károkkal járó havazás visszatérési ideje rendkívül nagy, 40–50 év (Lakatos és Bihari, 2009).

Bízunk benne, hogy a jövőben elérhető fejlett mikrofizikai leírást alkalmazó és nagyobb megbízhatóságú numerikus modellek segítségével a kritikus tömegű tapadó hóteher kialakulását egyre nagyobb pontossággal jelezhetjük előre.



5. ábra. Várható akkumulált hóteher az AROME 12 UTC-s futtatásának 12. órájában (január 28. 00 UTC). A maximális értékek 1 kg/m körül adódnak. A tapadó hóhoz köthető 27-i esti káresemények helyszínei hozzávetőlegesen a pontozott ellipszisen belülré esnek (balra). Várható akkumulált hóteher az AROME 12 UTC-s futtatásának 24. órájában (január 28. 12 UTC). A maximális értékek 2,5 kg/m körül adódtak (jobbra).

Hivatkozások

- Farzaneh M. (Editor), 2008: *Atmospheric Icing of Power Networks*, Springer Science+Business Media B.V., Chicoutimi, Canada
- Krómer Dr. I., 1995: Hungarian icing activity survey, *Atmospheric Research* 36, 311-319
- Lakatos M., Bihari Z., 2009: A 2009. január 27-28-án kialakult időjárási helyzet elemzése Vas és Zala megye területén, *Léggör* 54-2, 6-9
- Makkonen L., 1987: Salinity and growth rate of ice formed by sea spray. *Cold Regions Sci. Technol.* 14, 163-171.
- Poots G. 1996: *Ice and Snow Accretion on Structures*. Research Studies Press LTD, Tauton, England
- Poots, G. & Skelton, P. L. I., 1995: The effect of aerodynamic torque on the rotation of an overhead line conductor during snow accretion, *Atmospheric Research* 36, 251-260
- Tóth K. 2007: Zúzmaraképződés előrejelezhetősége numerikus modell outputok alapján, *MSc Thesis*, Eötvös Loránd University, Institute of Geography and Earth Sciences, Department of Meteorology, 2007
- Sundin, E. and Makkonen, L., 1998: Ice loads on a lattice tower estimated by weather station data, *Journal of Applied Meteorology* 37, 523-529
- Szabó, Gy. és Farkas, Gy.: 2009. 01.27-30. közötti időszakban, Vas és Zala megyében tömeges üzemzavart okozó közép feszültségű (KÖF) oszlopok kitörési okainak, vezetékek szakadásának feltáró elemzése, *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar. Hidak és Szerkezetek Tanszéke*
- Wakahawa g. et al, 1977: Snow Accretion on Electric Wires and Its Prevention. *Journal of Glaciology*, 19, 479-487

Az EGYETEMI METEOROLÓGIAI FÜZETEK

eddig megjelent kötetei

- No. 1. RÁKÓCZI FERENC és WEIDINGER TAMÁS szerkesztők (1990): A II. Planetáris Határréteg Szeminárium előadásai. Debrecen, 1989. szeptember 14–15.
- No. 2. MATYASOVSKY ISTVÁN, WEIDINGER TAMÁS és GYURÓ GYÖRGY szerkesztők (1990): Különböző típusú előrejelzések. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája. Balatonalmádi, 1990. augusztus 29–31. A Nyári Iskola előadásainak összefoglalói.
- No. 3. GYURÓ GYÖRGY (1990): Rövidtávú előrejelzések egy háromparaméteres modellcsaláddal.
- No. 4. GYURÓ GYÖRGY, BOZÓ LÁSZLÓ, MATYASOVSKY ISTVÁN és WEIDINGER TAMÁS (1992): Szakköri tematika középiskolásoknak meteorológiából és levegő-környezetvédelemből.
- No. 5. BARTHOLY JUDIT és WEIDINGER TAMÁS szerkesztők (1992): A felszín-légkör kölcsönhatások, környezetvédelem. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája. 1992. szeptember 2–4. A Nyári Iskola előadásainak összefoglalói.
- No. 6. SZUNYOGH ISTVÁN szerkesztő (1992): Emlékkötet Makainé Császár Margit, Erdős László és Felméry László docensek tiszteletére, I–II.
- No. 7. BARTHOLY JUDIT és WEIDINGER TAMÁS szerkesztők (1994): Nemzetközi tudományos együttműködések a meteorológiában. Magyarország részvétele a kutatási projekteken. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája. 1994. szeptember 5–7. A Nyári Iskola előadásainak összefoglalói.
- No. 8. BARTHOLY JUDIT, MÉSZÁROS RÓBERT és WEIDINGER TAMÁS szerkesztők (1996): Mérés, modellezés és a meteorológiai információk felhasználása. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája. 1996. szeptember 2–5. A Nyári Iskola előadásainak összefoglalói.
- No. 9. PONGRÁCZ RITA és TÓTH ÁGNES szerkesztők (1997): A meteorológus PhD-hallgatók I. országos konferenciája. 1996. november 26–27. Az előadások összefoglalói.
- No. 10. MÉSZÁROS RÓBERT, WEIDINGER TAMÁS, BARTHOLY JUDIT és TÓTH ÁGNES szerkesztők (1997): A felszín-légkör kölcsönhatások és szerepük az időjárás, illetve az éghajlat alakításában. A PhD-hallgatók I. Nyári Iskolája. 1997. szeptember 1–5. Az előadások összefoglalói.
- No. 11. RADICS KORNÉLIA, WEIDINGER TAMÁS, BARTHOLY JUDIT és MÉSZÁROS RÓBERT szerkesztők (1998): Az óceán időjárás- és éghajlatalakító szerepe. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája. 1998. szeptember 7–10. Az előadások összefoglalói.
- No. 12. PONGRÁCZ RITA és SZANDÁNYI EMESE szerkesztők (1999): Megújuló tantárgypedagógiák és módszertan a meteorológiai felsőoktatásban. 1999. május 31.–június 1. Az előadások összefoglalói.
- No. 13. KIRCSI ANDREA és PONGRÁCZ RITA szerkesztők (1999): A meteorológus PhD-hallgatók II. országos konferenciája. 1999. szeptember 20–21. Az előadások összefoglalói.
- No. 14. BARTHOLY JUDIT és RADICS KORNÉLIA (2000): A szélenergia-hasznosítás lehetőségei a Kárpát-medencében.

- No. 15. PONGRÁCZ RITA, WEIDINGER TAMÁS, BARTHOLY JUDIT és MÉSZÁROS RÓBERT szerkesztők (2000): A meteorológia alkalmazásai. Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája. 2000. szeptember 4–7. Az előadások összefoglalói.
- No. 16. GYURÓ GYÖRGY (2001): Szinoptikus előadások. Az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársai számára tartott továbbképzési előadások szerkesztett változata.
- No. 17. WEIDINGER TAMÁS, BARTHOLY JUDIT, MÉSZÁROS RÓBERT, DEZSŐ ZSUZSANNA és PINTÉR KRISZTINA szerkesztők (2002): Az Időjárás előrejelzése. Az ELTE Meteorológus TDK Iskolája. 2002. szeptember 9–12. Az előadások összefoglalói.
- No. 18. GYURÓ GYÖRGY (2004): Száz éve született meg a légkörmodellezés alap gondolata.
- No. 19. WEIDINGER TAMÁS és KUGLER SZILVIA szerkesztők (2004): A meteorológia és a társtudományok kapcsolata. Az ELTE Meteorológus TDK Iskolája. 2004. szeptember 6–9. Az előadások összefoglalói.
- No. 20. WEIDINGER TAMÁS, TARCZAY KLÁRA és BARTHOLY JUDIT szerkesztők (2006): Mérések a lokális skálától a globális folyamatokig – De miért is? Az ELTE Meteorológus TDK Iskolája. 2006. augusztus 28–31. Az előadások összefoglalói.
- No. 21. WEIDINGER TAMÁS, TARCZAY KLÁRA és BARTHOLY JUDIT szerkesztők (2007): Mérések a lokális skálától a globális folyamatokig – De miért is? A Meteorológus TDK 2006. évi nyári iskola előadásainak összefoglalói, II. kötet.
- No. 22. WEIDINGER TAMÁS, TASNÁDI PÉTER és BARTHOLY JUDIT szerkesztők (2008): Meteorológia és az alaptudományok. Az ELTE Meteorológus TDK Iskolája. 2008. augusztus 27–30. Az előadások összefoglalói.
- Különszám. A Meteorológus TDK 2008. évi kari konferenciája. Az előadások összefoglalói. Szerkesztette: Weidinger Tamás (2008)
- Különszám. A Meteorológus TDK 2009. évi kari konferenciája. Az előadások összefoglalói. Szerkesztette: Weidinger Tamás (2009)
- No. 23. MÉSZÁROS RÓBERT és KOMJÁTHY ESZTER szerkesztők (2010): Hallgatók részvétele a kutatásban. (Aktuális kutatási témák meteorológus hallgatók számára). Az ELTE Meteorológus TDK Nyári Iskolája. 2010. augusztus 25–27. Az előadások összefoglalói.