

**36. METEOROLÓGIAI TUDOMÁNYOS NAPOK**

**2010. NOVEMBER 18-19.**

**Változó éghajlat és következményei  
a Kárpát-medencében**

Szerkesztette: Lakatos Mónika

ISBN 978-963-9931-05-3

## Tartalom

Climate Dynamics as a Dynamical Systems Problem <b>Michael Ghil</b> .....	3
Az IPCC jelentések sorozata: tények, erősségek, bizonytalanságok <b>Bartholy Judit</b> .....	7
A statisztikus klimatológia szerepe és lehetőségei a változó éghajlat kutatásában <b>Szentimrey Tamás</b> .....	22
Térbeli statisztikai vizsgálatok, átlagos jellemzők és statisztikák Magyarországon <b>Bihari Zita</b> .....	30
Hazai megfigyelt hőmérsékleti és csapadék tendenciák, szélsőségek alakulása a múlt század elejétől <b>Lakatos Mónika</b> .....	42
Az ENSEMBLES projekt regionális modelleredményeinek alkalmazhatósága Magyarország éghajlatának jellemzésére <b>Szépszó Gabriella és Zsebeházi Gabriella</b> .....	60
A szélsőségek várható alakulása a Kárpát-medence térségében az ENSEMBLES projekt eredményei alapján <b>Pieczka Ildikó, Pongrácz Rita, Bartholy Judit, Kis Anna és Miklós Erika</b> .....	77
Az Országos Meteorológiai Szolgálat regionális klímamodellezési tevékenysége: ALADIN- Climate és REMO <b>Szabó Péter, Horányi András, Krüzselyi Ilona, Szépszó Gabriella</b> .....	88
Az ELTE regionális klímamodelljei: PRECIS és RegCM <b>Pongrácz Rita, Bartholy Judit, Pieczka Ildikó és Torma Csaba</b> .....	102
A hazai regionális klímamodellek eredményeinek együttes kiértékelése <b>Horányi András, Bartholy Judit, Krüzselyi Ilona, Pieczka Ildikó, Pongrácz Rita, Szabó Péter, Szépszó Gabriella, Torma Csaba</b> .....	113
A modellezett éghajlatváltozás becsült hatása a Balaton párolgására <b>Kovács Ákos, Szilágyi József</b> .....	129
A természetes élővilág és az éghajlatváltozás – a modellezés lehetőségei <b>Czucz Bálint, Molnár Zsolt, Kröel-Dulay György</b> .....	138
Az éghajlatváltozás és az aszály <b>Szalai Sándor, Lakatos Mónika</b> .....	147
Hozzászólás.....	156
<b>Mika János</b> .....	156

# Climate Dynamics as a Dynamical Systems Problem (Az éghajlat, mint dinamikai rendszer)

Michael Ghil

Ecole Normale Supérieure, Paris and University of California at Los Angeles  
email: ghil@lmd.ens.fr

**Summary** – The components of the climate system — the atmosphere, oceans and cryosphere — are active across a wide range of space and time scales. The physical and chemical processes within each of these components are nonlinear and quite complex, and the interactions among these components are even more so. Moreover, the whole system is open to external fluxes of energy and momentum. As a result, it is not possible to model the entire climate system — on all space and time scales — by using a single model, no matter how detailed or costly in terms of computing and storage requirements. The climate community has developed, therefore, a modelling approach based on a hierarchy of models, from the simplest “toy” models via intermediate ones and on to the most detailed general circulation models (GCMs). The guiding thread through this hierarchy, as well as in comparing modelling results with observations, is the dynamical systems approach. We illustrate this approach by applying it to the problem of intraseasonal variability of the mid-latitude atmosphere. We review work on multiple weather regimes, such as blocking and zonal flow, and on intraseasonal oscillations arising from large-scale flow interaction with the topography. This review covers observations, statistical analysis, and modelling from toy models with a few variables all the way to GCMs.

The atmosphere is an open system subject to multiple instabilities — convective, baroclinic, barotropic and others. These instabilities interact nonlinearly and are limited in energy, due to the overall bound on the thermal energy available to the system. Bounded energy and prevalence of dissipation suggest the existence of lower-dimensional attractors; the presence of the competing instabilities, on the one hand, and the available observations of irregular behavior, on the other, suggest that these attractors are strange (Lorenz, 1963; Ruelle & Takens, 1971; Smale, 1967) or worse. The boundedness of system trajectories in its phase space also suggests recurrence of large-scale features on time scales of interest, as do the existing observations (Ghil & Childress, 1987; Ghil et al., 1985).

The components of the climate system — the atmosphere, oceans and cryosphere — are active across a wide range of space and time scales. The physical and chemical processes within each of these components are nonlinear and quite complex, and the interactions among these components are even more so (Houghton *et al.*, 1991; Solomon *et al.*, 2007).

As a result, it is not possible to model the entire climate system — on all space and time scales — by using a single model, no matter how detailed or costly in terms of computing and storage requirements. The climate community has developed, therefore, a modelling approach based on a hierarchy of models (Schneider & Dickinson, 1974), from the simplest “toy” models via intermediate ones and on to the most detailed general circulation models (GCMs). The guiding thread through this hierarchy, as well as in comparing modelling results with observations, is the dynamical systems approach (Ghil & Robertson, 2000).

We illustrated this approach by applying it to the problem of intraseasonal variability of the mid-latitude atmosphere. We reviewed work on multiple weather regimes,

such as blocking and zonal flow (Charney & DeVore, 1979; Weeks *et al.*, 1997), and on intraseasonal oscillations arising from large-scale flow interaction with the topography (Ghil *et al.*, 2003). This review talk covered observations, statistical analysis, and modelling — from toy models with a few variables all the way to GCMs.

Within the framework of our dynamical systems approach, we noted that two types of recurrent, but unstable features — fixed points (“particles”) and limit cycles (“waves”) — seem to dominate low-frequency variability (LFV). They lie at the basis of two mutually complementary approaches to long-range forecasting (LRF): Markov chains and spectral methods (Ghil & Robertson, 2002). Simple, “toy” models can provide useful ideas as to how to deal with the complexities of the observed and GCM-simulated atmosphere, while the hierarchical modelling approach allows one to go back-and-forth between toy (“conceptual”) and detailed (“realistic”) models, and between models and data.

The talk reviewed the following topics:

- Motivation of the dynamical systems approach and outline of the atmospheric model hierarchy, as suggested above.
- Coarse-graining of the system’s phase space, in terms of
  - clustering and multiple regimes, and of
  - transition probabilities between regimes and associated predictors.
- Empirical model reduction (EMR)
  - for models, *viz.* the so-called quasi-geostrophic three-level (QG3) model, and
  - for observational data, *viz.* Northern Hemisphere (NH) mid-latitude flows.
- Conclusions, open questions and bibliography

In addition to the references already mentioned, the discussion of the QG3 model relied also on Marshall & Molteni (1993) and on Kondrashov *et al.* (2006), while that of EMR models relied on the review by Kravtsov *et al.* (2009).

We concluded that dynamical systems theory does provide major insights into nonlinear planetary flows: bifurcation theory helps understand how spatio-temporal patterns arise in observed flows and in detailed numerical simulations using GCMs, while the ergodic theory of dynamical systems, *i.e.* the theory of the invariant probability measures associated with them (Eckmann & Ruelle, 1985) helps connect the statistics of the planetary flows — such as their empirical orthogonal functions (EOFs), probability density functions (PDFs), power spectra and Markov chains — to their dynamics.

These theoretical insights are most easily understood for highly simplified models but they do apply to the full systems of nonlinear partial differential equations that govern the actual planetary flows. The simplification often consists in a reduced number of modes (degrees of freedom), as well as in simplified physical processes. To move up the modelling hierarchy, one has to gradually increase model resolution and sophistication, and then move up and down the model hierarchy, while continuously comparing models with the data.

The spectral, or “waves” approach to LFV and LRF is reviewed by Ghil *et al.* (2002). Similar ideas and methods — as reviewed, for instance, by Dijkstra (2005) and by Dijkstra & Ghil (2005) — have been applied to the oceans’ circulation.

### **References**

- Charney, J. G., and J. G. DeVore, 1979: Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking. *J. Atmos. Sci.*, **36**, 1205–1216.
- Dijkstra, H.A., 2005: *Nonlinear Physical Oceanography: A Dynamical Systems Approach to the Large-Scale Ocean Circulation and El Niño*, 2nd edn., Springer, 532 pp.
- Dijkstra, H. A., and M. Ghil, 2005: Low-frequency variability of the large-scale ocean circulation: A dynamical systems approach, *Rev. Geophys.*, **43**, RG3002, [doi:10.1029/2002RG000122](https://doi.org/10.1029/2002RG000122).
- Eckmann, J.-P., and D. Ruelle, 1985: Ergodic theory of chaos and strange attractors. *Rev. Mod. Phys.*, **57**, 617–656 (addendum, *Rev. Mod. Phys.*, **57**, 1115, 1985).
- Ghil, M., and S. Childress, 1987: *Topics in Geophysical Fluid Dynamics: Atmospheric Dynamics, Dynamo Theory and Climate Dynamics*, Springer-Verlag, New York/Berlin/London/Paris/ Tokyo, 485 pp.
- Ghil, M., and A. W. Robertson, 2000: Solving problems with GCMs: General circulation models and their role in the climate modeling hierarchy. *General Circulation Model Development: Past, Present and Future*, D. Randall (Ed.), Academic Press, San Diego, pp. 285–325.
- Ghil, M., and A. W. Robertson, 2002: "Waves" vs. "particles" in the atmosphere's phase space: A pathway to long-range forecasting? *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **99** (Suppl. 1), 2493–2500.
- Ghil, M., R. Benzi, and G. Parisi (Eds.), 1985: *Turbulence and Predictability in Geophysical Fluid Dynamics and Climate Dynamics*, North-Holland Publ. Co., Amsterdam/New York/Oxford/Tokyo, 449 pp.
- Ghil, M., M. R. Allen, M. D. Dettinger, K. Ide, D. Kondrashov, M. E. Mann, A. W. Robertson, A. Saunders, Y. Tian, F. Varadi, and P. Yiou, 2002: Advanced spectral methods for climatic time series, *Rev. Geophys.*, **40**(1), pp. 3.1–3.41, [doi: 10.1029/2000RG000092](https://doi.org/10.1029/2000RG000092).
- Ghil, M., D. Kondrashov, F. Lott, and A. W. Robertson, 2003: Intraseasonal oscillations in the mid-latitudes: observations, theory and GCM results, in *Proc. ECMWF/CLIVAR Workshop on Simulation and Prediction of Intra-Seasonal Variability with Emphasis on the MJO*, 3–6 Nov. 2003, ECMWF, Reading, UK, pp. 35–53.
- Houghton, J. T., G.J. Jenkins, J.J. Ephraums (Eds.), 1991: *Climate Change, The IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, MA, 365 pp.
- Kondrashov, D., S. Kravtsov, and M. Ghil, 2006: Empirical mode reduction in a model of extratropical low-frequency variability, *J. Atmos. Sci.*, **63**, 1859–1877.
- Kravtsov S., D. Kondrashov and M. Ghil, 2009: Empirical model reduction and the modelling hierarchy in climate dynamics, in *Stochastic Physics and Climate Modelling*, T. N. Palmer and P. Williams (Eds.), Cambridge University Press, pp. 35–72.

- Lorenz, E. N., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130–141.
- Marshall, J., and Molteni, F., 1993: Toward a dynamical understanding of atmospheric weather regimes. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1792–1818.
- Ruelle, D., and F. Takens, 1971: On the nature of turbulence. *Commun. Math. Phys.*, **20**, 167–192, and **23**, 343–344.
- Schneider, S. H., and R. E. Dickinson, 1974: Climate modeling. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **12**, 447–493.
- S. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller (Eds.), 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Weeks, E. R., Y. Tian, J. S. Urbach, K. Ide, H. L. Swinney, and M. Ghil, 1997: Transitions between blocked and zonal flows in a rotating annulus with topography. *Science*, **278**, 1598–1601.

# Az IPCC jelentések sorozata: tények, erősségek, bizonytalanságok

Bartholy Judit

ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék  
1117 Budapest Pázmány P. s. 1/a.; email: bari@ludens.elte.hu

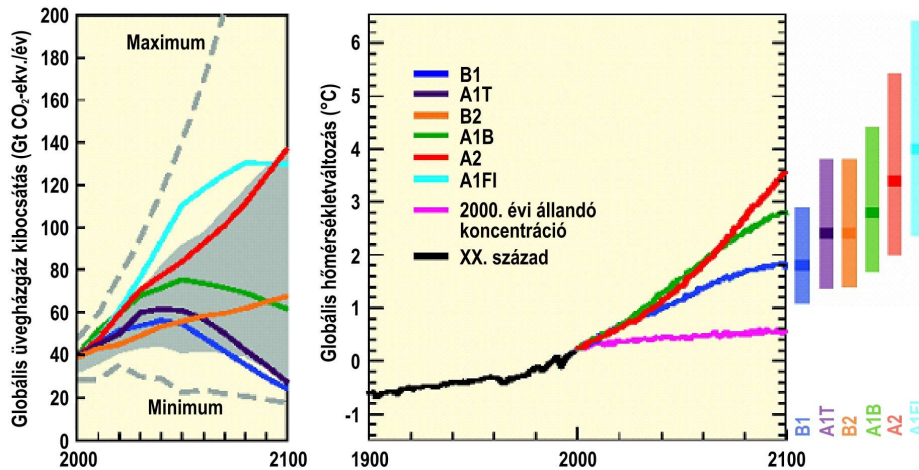
**Összefoglaló** – Az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, azaz Éghajlatváltozási Kormányközi Testület) szervezetet a Meteorológiai Világszervezet és az ENSZ Környezeti Programja alapította 1988-ban. A nemzetközi testület, a fennállása óta eltelt évtizedek alatt egy hálózattá erősödött, mely tagjainak sorában tudhatja a világ vezető klímakutatóit, s szakértőit. Az öt-hat évente megjelenő jelentések céljai között szerepel az éghajlati rendszer működési folyamatainak megismerése terén elért eredmények tárgyszerű összegzése. Ugyancsak fontos cél az éghajlati rendszer azon érzékenység-vizsgálatainak áttekintése, összefoglalása, értékelése, melyek az üvegházhatású gázok emissziójára vonatkoznak. A 2007-ben megjelent negyedik helyzetértékelő jelentés példáját említve láthatjuk, hogy az IPCC minél szélesebb körű konszenzusra törekszik: a többezer-oldalas jelentés szövegét 30 országból 152 vezető-szerző írta, több mint 600 szakértő bírálta, s végül 113 ország kormányzati képviselője fogadta el. Mivel a jelentés összefoglalójának minden sorát teljes konszenzussal kell, hogy elfogadja a szerkesztőbizottság, ezért a megjelent helyzetértékelés visszafogott, de megalapozott állításokat tartalmaz. A cikk elsőként bemutatja a 2007-es helyzetértékelő jelentés legfontosabb tényeit, megállapításait. Ezután tematikusan osztályozott formában ismertetésre kerül az antropogén eredetű globális melegedés tényében kételkedők néhány érvelése. Majd végül megvizsgáljuk, hogy mi rejlik a közvélemény körében tapasztalható IPCC iránti bizalom-gyengülés mögött.

## ***A XXI. század végére várható globális tendenciák***

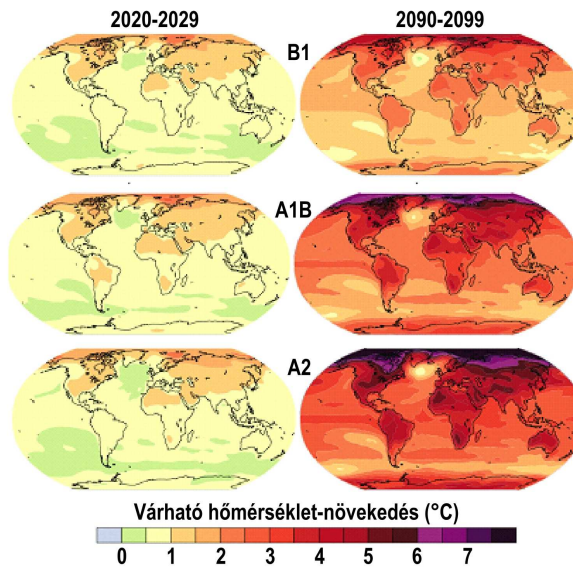
A legfrissebb IPCC Helyzetértékelő Jelentés 2007-ben jelent meg, melynek összefoglaló eredményét az *1. ábrán* mutatjuk be. Az ábra bal oldalán a XXI. század emisszió szcenáriói láthatók, azaz hogy milyen mennyiségű üvegházgáz kibocsátást feltételezünk a század végéig. Az ábra jobb oldalán található sávok az egyes emisszió szcenáriókhoz tartozó XXI. század végére várható globális átlaghőmérséklet-emelkedés intervallumát illusztrálják, melyek a különböző modellfuttatásokból származó eredményeket foglalják össze. A középső grafikon részletesen mutatja három alapszcenárió (B1, A1B, A2) esetén a század során várható hőmérsékletváltozások ütemét. Az ábra alapján jól látszik, hogy a legnagyobb hőmérsékletnövekedés az A1FI alszcenárió esetén várható (azaz ha a század végéig a fosszilis energiahordozók intenzív felhasználását feltételezzük). A melegedés mértéke ebben az esetben várhatóan 2,4-6,4 °C az 1980-1999 időszak átlagához viszonyítva. A legkisebb melegedésre a B1 szcenárió esetén számíthatunk, melynek várható mértéke a XXI. század végére csupán 1,1-2,9 °C.

A várható hőmérsékletváltozás területi eloszlását két évtizedre (2020-2029, illetve 2090-2099) vizsgálva levonható az a következtetés, hogy a XXI. század harmadik évtizedében még nem különülnek el egymástól jelentős mértékben a különböző szcenáriók adta előrejelzések (*2. ábra*). Ezzel szemben a század utolsó évtizedére már markáns különbségek jelentkeznek, különösen a sarkvidéki területeken. Az északi sark környékén a legjelentősebb a melegedés mindkét évtizedben: 2 °C körüli hőmérsékletnövekedés várható 2030-ig, majd 2100-ig rendre mintegy 5 °C-os, 6 °C-os, 7 °C-os hőmérsékletemelkedés prognosztizálható a B1, A1B, illetve A2 szcenárió esetén. Jól látható, hogy a szárazföldi

területeken nagyobb mértékű a várható melegedés, mint az óceáni területeken, továbbá az északi félteke melegedése jelentősen meghaladja a déli féltekét.



**1. ábra.** Az üvegházhatású gázok várható kibocsátása a XXI. században és a várható globális átlaghőmérséklet-változás a különböző scenáriók esetén. (Forrás: IPCC).

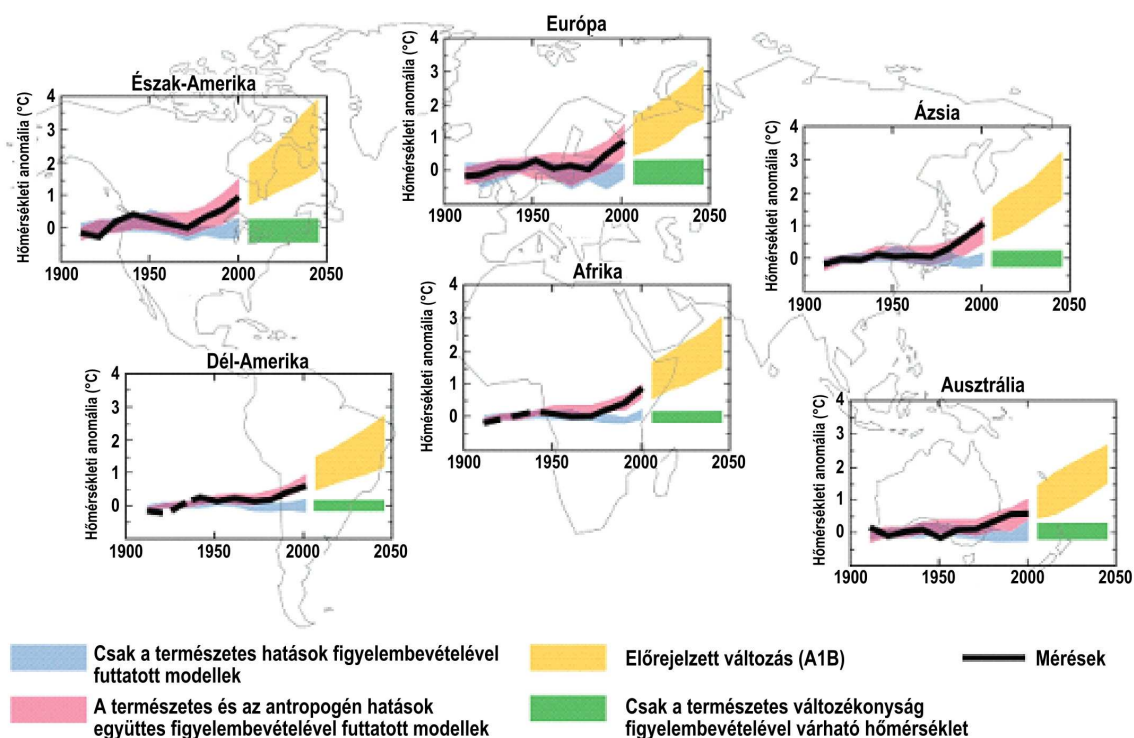


**2. ábra.** Az éves átlagos felszínközeli hőmérsékletváltozás területi eloszlása a B1 (fent), A1B (középen), A2 (lent) scenárió esetén a 2020-2029 és 2090-2099 közötti időszakra. Referencia időszak: 1980-1999. (Forrás: IPCC).

A XX. században bekövetkezett, illetve a XXI. század első felében kontinensenként várható hőmérsékletváltozás szimulációs eredményeit összegzi a 3. ábra. Látható, hogy a XX. századra vonatkozó szimulációkat (kék és rózsaszín sávok) kiterjesztették a 2001-2050 időszakra, a zöld sáv (a kék sáv folytatásaként) azokat a modelleredményeket tartalmazza,

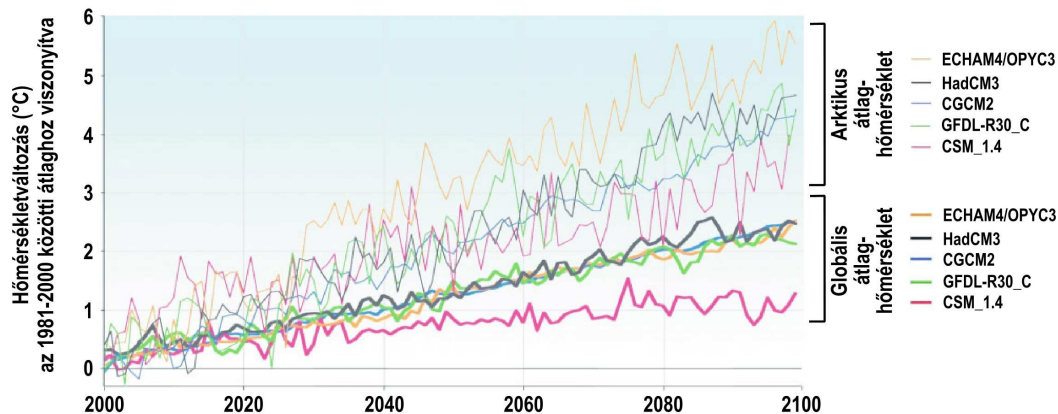


melyek csak a természetes okokra (napsugárzás változására, vulkáni tevékenységre) visszavezethető kényszereket veszik figyelembe, míg a sárga sáv (a rózsaszín folytatásaként) ezeken felül az emberi tevékenység hatására történő üvegházgáz-koncentráció növekedését is számításba veszik. A zöld és a sárga sávok egyre jelentősebb mértékű szétválása előrevetíti a többfokos melegedést egyöntetűen minden kontinensen, és illusztrálja az antropogén hatások várható következményét.



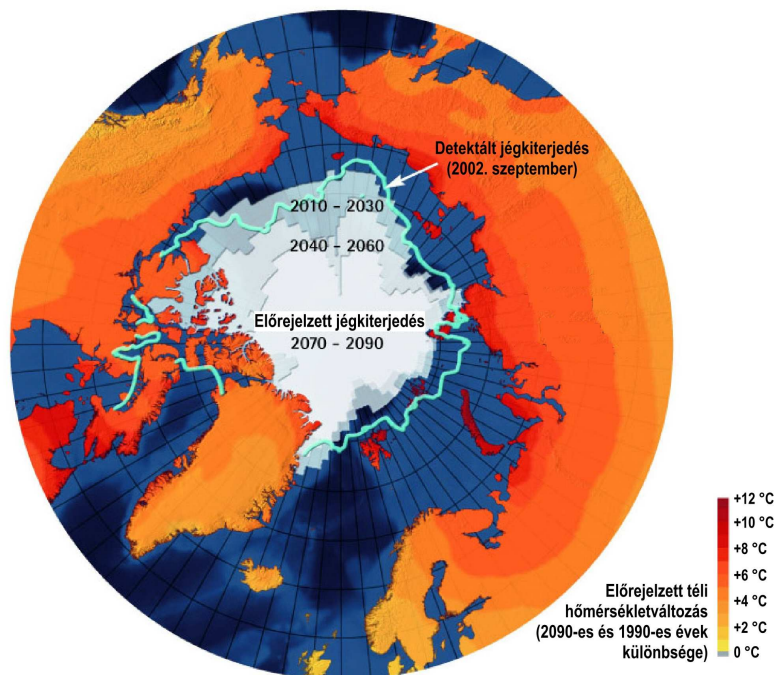
**3. ábra.** A kontinensek éves átlagos felszínközeli hőmérsékletének 1906-2005 között detektált és 2001-2050 között várható változása az A1B scenárió esetén. Referencia időszak: 1980-1999. (Forrás: IPCC).

A 2. ábrán bemutattuk, hogy az arktikus területek várható melegedése lényegesen nagyobb mértékű, mint a globális átlag. A 4. ábra összegzi öt jelentős globális klímamodellel a XXI. századra szimulált átlaghőmérséklet növekedést az egész Földre, illetve az arktikus régióra. A modellek megközelítőleg háromszoros melegedést prognosztizálnak az arktikus régióra a globális átlaghoz viszonyítva.



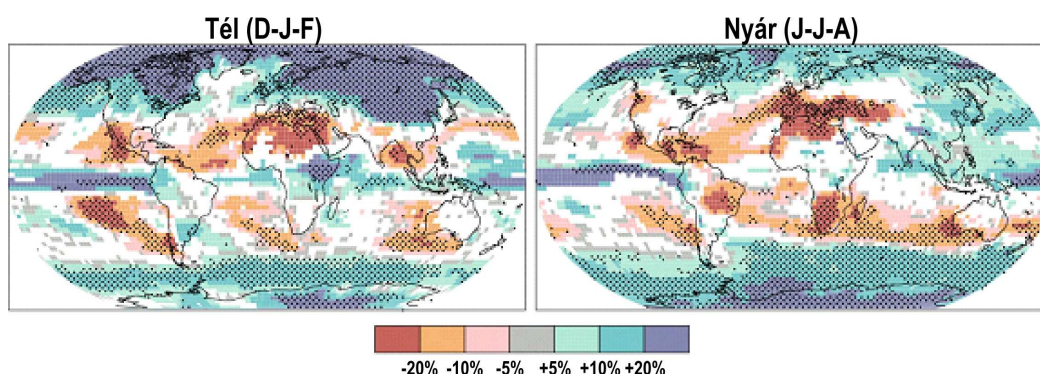
4. ábra. A GCM-ek által prognosztizált globális és arktikus átlaghőmérséklet növekedés 2001-2100 között. Referencia időszak: 1981-2000. (Forrás: ACIA).

A hőmérsékletemelkedés következtében várhatóan jelentős mértékű lesz a tengeri jég kiterjedésének csökkenése. Az 5. ábrán világoskék vonal jelzi a tengeri jég 2002 szeptemberében detektált határait, a különböző szürke árnyalatok pedig a 2010-2030, 2040-2060 és 2070-2090 időszekekre az éves minimális kiterjedésben várható változásokat. A sárga-piros színek a kontinentális területeken várható hőmérsékletnövekedést jelzik 1990-1999 és 2090-2099 között.



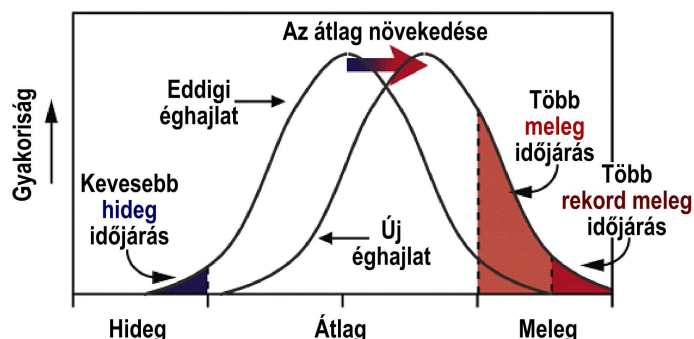
5. ábra. A tengeri jég évi minimális kiterjedésének várható változása 2010-2030, 2040-2060 és 2070-2090 időszekekre. Referencia időszak: 1981-2000. A sárga-piros színárnyalatok a 2090-es és 1990-es évek között várhatóan bekövetkező melegedés mértékét mutatják. (Forrás: ACIA).

A csapadék XXI. század végére várható alakulását a 6. ábra szemlélteti az A1B szcenárió esetén. A jelentős éves menet miatt nem az éves összegben várható változást mutatjuk be, hanem elkülönítve a téli (december-január-február) és a nyári (június-július-augusztus) csapadékösszeg várható változásának területi eloszlását. Az egyik legjelentősebb szárazodásra a Földközi-tenger térségében számíthatunk mindkét évszakban, télen ez a szárazodás inkább a déli részre, s Észak-Afrikára terjed ki, míg nyáron északabbra húzódik, s így egészen Közép-Európáig felhúzódik. A magasabb földrajzi szélességeken mindkét féltéken csapadéknövekedés várható.



6. ábra. A téli és nyári átlagos csapadékváltozás várható mértéke az A1B szcenárió esetén a 2090-2099 közötti időszakban. Referencia időszak: 1980-1999. (Forrás: IPCC).

A globális hőmérséklet jelentős növekedése természetesen érinti a szélsőséges hőmérsékletek gyakoriságát. A 7. ábra illusztrálja a melegedő klíma hatására eltolódó hőmérsékleti eloszlásokat: míg a hideg extrémumok várhatóan ritkábban fordulnak majd elő, addig a meleg extrémumok gyakrabban. A XXI. század közepére és végére adott klímaszimulációk alapján a globális melegedés következtében az időjárási és éghajlati szélsőségekben is jelentős változások várhatók. Többek között például a forró napok és éjszakák, a hóhullámok, a heves csapadéktevékenység, az aszály, az intenzív trópusi ciklon aktivitás, a heves óceáni hullámzás valószínűsége várhatóan növekszik. Ezen változások természetesen közvetve érintik a mezőgazdasági, erdőgazdasági, vízgazdálkodási, egészségügyi, ipari, s társadalmi tevékenységeket.



7. ábra. A hőmérsékletnövekedéssel várható eloszlásbeli eltolódás hatására az extrém melegek gyakorisága növekszik. (Forrás: IPCC).

Szerte a világon vannak olyan emberek, akik nem fogadják el az utolsó IPCC helyzetértékelő jelentésben közölt eredményeket, s egy-egy állítás, részeredmény megcáfolásán fáradoznak. A következő alfejezetben ezen nézetek tematikus osztályozását mutatjuk be vázlatosan.

### ***Klímaszkeptikus nézetek osztályozása***

A szkepticizmus pozitív szerepe a tudományokban nem vitatható. A kételkedés szerves része minden tudományos fejlődésnek és az új eredmények megkérdőjelezése segít a hibás, nem bizonyított elképzelések felismerésében és kiszűrésében. Ugyanakkor teljességgel haszontalan a pusztá tagadás, mely mentes az alternatív hipotézisektől, új elképzelésektől. A tagadás önmagában semmivel sem viszi előbbre a tudományt.

Nemcsak a klímaszkeptikus elképzelések száma növekszik az utóbbi évtizedben, azon éghajlatkutatók száma is nő, akik szisztematikusan számbaveszik, s tudományosan megcáfolják a változások tagadóinak állításait. Sőt már elkészült a klímaszkeptikus elképzelések osztályozása is. Míg a kérdőjelek megválaszolására nem ad lehetőséget e cikk szűk terjedelmi kerete (a cáfolatok mind több helyen megtalálhatók az Internet klímaváltozással foglalkozó vitafórumain), addig a klímaszkeptikus elképzelések négy csoportját felvázolom az alábbiakban.

#### **I. csoport – A globális melegedés megkérdőjelezése**

Kérdés, hogy melegszik vagy hűl a Föld. Nem tudunk eleget éghajlatunk múltjáról. Többször volt már a Föld története során a jelenleginél melegebb klíma.

1. Hűl az éghajlat, illetve megállt a melegedési folyamat.
2. A sarkvidéki területeken a tengeri jég mennyisége kezd visszatérni a néhány évtizeddel korábbi állapotába.
3. Az Antarktiszon nincs melegedés, a tengeri jég mennyisége növekszik.
4. A Középkorban melegebb volt – a melegedés hátterében a napfoltszámok ingadozása áll.
5. Az éghajlat mindig is változott, s a múltban sokszor volt a mainál melegebb klíma.
6. Egy kismértékű melegedés hasznos lenne a Földön.
7. Valójában nincs melegedés, csak a városi hősziget jelenségét észleljük.
8. A tengerszint nem emelkedik, illetve az emelkedés mára már megállt.

#### **II. csoport – Üvegházhatású gázok szerepe**

Valóban hozzájárul-e az emberi tevékenység az üvegházhatáshoz? Ha igen ismerjük-e ennek következményeit?

1. A légköri CO<sub>2</sub> többlet nem a fosszilis tüzelőanyagokból származik.
2. A szén-dioxid gáz összömege a légkörnek csak egy elenyészően kicsi hányada, így koncentráció változásának hatása sem lehet jelentős.
3. A vízgőz sokkal fontosabb üvegházhatású gáz, mint a szén-dioxid, így az utóbbi hatása sem lehet számottevő.
4. A CO<sub>2</sub> többlet segíti a növények jobb növekedését, így hasznos.
5. A CO<sub>2</sub> a légkörben már telített állapotban van, így további hatása nem lehet jelentős.

### **III. csoport – A fizikai folyamatok ismeretének hiányosságai**

Ismerjük-e kellő pontossággal az éghajlati rendszerben zajló fizikai, kémiai folyamatokat?  
Modellezhető-e kellő pontossággal az éghajlat?

1. A globális melegedés háttérében természetes folyamatok állnak, úgy mint a Föld pályaelemeinek, illetve a Nap sugárzásának változása.
2. A globális, illetve regionális klímamodellek csak számítógépes programok, melyek nem adnak megbízható becsléseket a jövőre vonatkozóan.
3. A hőmérséklet, s a CO<sub>2</sub> közötti korreláció nem bizonyít ok-okozati összefüggést, eleve az utóbbi években a CO<sub>2</sub> koncentráció nőtt, míg a hőmérséklet csökkent (mely a XX. század során máskor is előfordult).
4. A globális melegedés jelenleg csak egy nem bizonyított elmélet. A tudomány sem foglalt állást egyértelműen.
5. Számos kutató nem ért egyet az IPCC jelentés állításaival, s az IPCC testülete nem tudományos, hanem politikai jellegű.
6. Jégfuratminták idősorai azt mutatják, hogy a CO<sub>2</sub> koncentráció növekedését megelőzi a hőmérséklet növekedése.

### **IV. csoport – Téves elképzelések terjesztése**

Irreleváns információk, félígazságok közlése, melyek csak összezavarják a médiát, s az embereket.

1. Korábbi korok melegedési periódusai a növény- és az állatvilág számára előnyösek voltak.
2. A technológiák gyors fejlődése meg fogja oldani a problémát a fölösleges CO<sub>2</sub> gáz föld alá sajtolásával.
3. A fejlődő országok növekvő mennyiségű szén-dioxid kibocsátása a fejlett országok minden emisszió csökkentését felemészti.
4. Magyarországon (vagy sok-sok más országban) a teljes emisszió mennyisége sokkal kisebb, mint például Kínában, Brazíliában, stb. Miért nekünk kell csökkentenünk a kibocsátásunkat?
5. Mozgalmak, vallások gyakran óvtak globális katasztrófáktól korábban is, melyek sohasem következtek be.
6. Az 1970-es években a klímaprognózisok tévesen egy jégkorszak közeledtét jelezték.
7. A klímakutatók feltört levelezései bizonyítják, hogy manipulálták az adatokat.

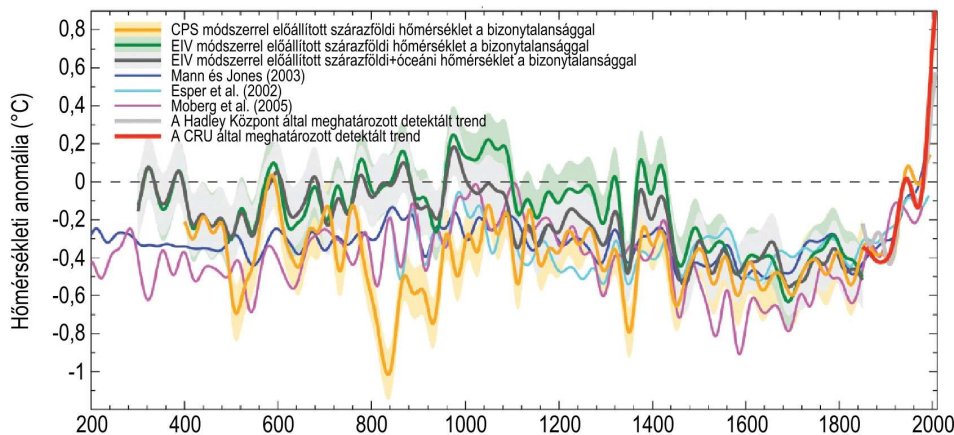
A teljesség igénye nélkül a fenti állítások közül néhányra adott szakmai válaszokat, illetve az állítások ismert cáfolatát közreadom.

*I/4. A Középkorban melegebb volt, mint most, a melegedés háttérében a napfoltszámok ingadozása áll*

A Közép- és Észak-Európában markánsan jelentkező ún. középkori meleg időszak 1000 körül tetőzött, mely egyben a megelőző néhány évezred legmelegebb periódusa is volt. Arról heves szakmai viták folynak, hogy a középkori meleg időszak melegebb volt-e a jelenlegi klímánál, vagy csak megközelítette azt. E témával kapcsolatos legújabb eredményeket összegzi a 8. ábra, melyet az ún. Koppenhágai Diagnózisban (Allison et al.,

2009) is közöltek. A grafikon nemcsak összefoglalja mai tudásunkat az elmúlt 2000 évben bekövetkezett klímaváltozásokról, hanem számszerűsíti a különböző módszerekkel kapott eredmények bizonytalanságait. Nagy jelentőségű ez a vizsgálat, hiszen az eredmények ismeretében lehetőségünk van az elmúlt évszázadokban természetes okokból létrejött változásokat összehasonlítani a napjainkban zajló antropogén eredetű tendenciákkal. Ugyancsak lehetővé válik a jövőre vonatkozó modellszimulációk által jelzett melegedés kockázatának értékelése. Az elemzés egyedülálló, mert elsőként alkalmazza és értékeli az ún. Proxy Adatbázis Hálózatban (Proxy Data Network) szereplő összes 1209 adatbázist, melyek közül 1158 éves és 51 évtizedes felbontású adatsorokat tartalmaz. Komplex adatbázisról van szó, hiszen egyaránt szerepelnek benne a fák évgyűrűi, a tengeri és édesvízi üledékek rétegezettsége, a cseppkövek, a korallok, a jégfurat minták, valamint a történeti feljegyzések alapján meghatározott idősorok. Az összes adatbázis visszanyúlik minimum 1800-ig, 460 közülük egészen 1600-ig, 177 1400-ig, 59 1000-ig, 36 500-ig, s 25 adatsor időszámításunk kezdetéig. Ez a felsorolás jól tükrözi a klímarekonstrukciók forrásainak időbeni ritkulását, vagyis minél távolabbi múltba megyünk vissza, annál kevesebb proxy adatsor áll rendelkezésre, s így a levonható következtetések bizonytalansága is nő. A teljes adatbázisban a Föld különböző régiói elég jól lefedettek: egyrészt a trópusi, a sarkvidéki és a mérsékeltövi területekről egyaránt vannak felhasználható források; másrészt mind az óceáni, mind a szárazföldi térségeket megfelelően nagy mennyiségű adat reprezentál. A részletes elemzést megelőzően az adatsorokat különféle érzékenységi vizsgálatoknak vetették alá, s többféle statisztikai módszerrel is ellenőrizték azok minőségét.

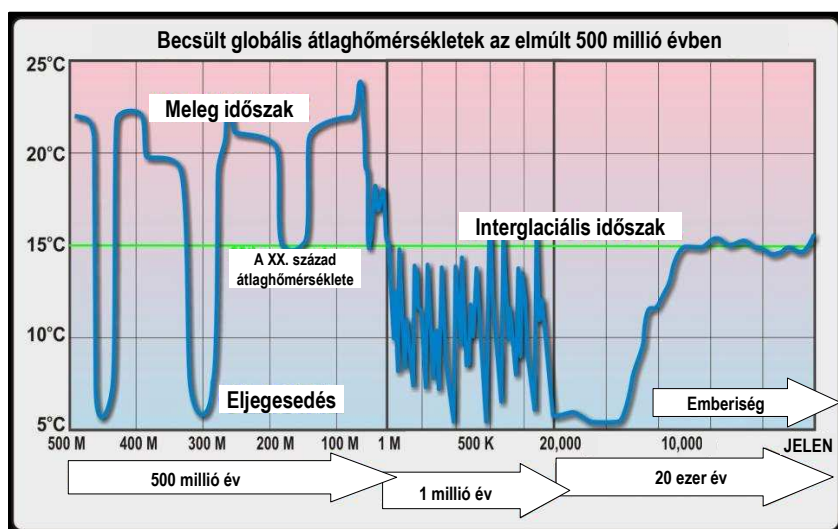
A minőségileg szűrt proxy adatbázis északi félgömbre vonatkozó komplex analíziséből levonhatjuk azt a következtetést, hogy az elmúlt néhány évtized hemiszférikus skálájú melegedése jelentős pozitív anomáliának számít minimum az elmúlt 1300 évben (ebben a becslésben nem szerepelnek a nagyobb bizonytalansággal rendelkező évgyűrű-idősorok). Abban az esetben, ha a fák évgyűrűinek esetenként vitatott proxy adatsorait is figyelembe vesszük, akkor az elmúlt 1700 évre vonatkozóan állíthatjuk ugyanezt. A déli félgömből jóval kevesebb adat áll rendelkezésre, mint az északi félgömből, ezért a hőmérsékleti becslések bizonytalansága nagyobb mind a déli félgömbre, mind a globális átlagra vonatkozóan. Így a déli félgömb éghajlati viszonyait vagy a globális klímát tekintve nem kizárt, hogy az elmúlt 1500 évben előfordulhattak az utóbbi néhány évtized melegedéséhez hasonló rövidebb periódusok.



**8. ábra.** Az északi-félgömb rekonstruált hőmérsékleti menete különböző elemzések alapján az elmúlt 2000 évben. A CPS (composite plus scale) módszer azt jelenti, hogy a kompozit idősort a proxy adatok standardizálásával és súlyozásával állítják elő. Az EIV (error in variables) módszer során szintén súlyozást alkalmaznak, de a skálázás regresszióval történik. (Forrás: Mann et al., 2008).

I/5. Az éghajlat mindig is változott, s a múltban sokszor volt a mainál melegebb klíma.

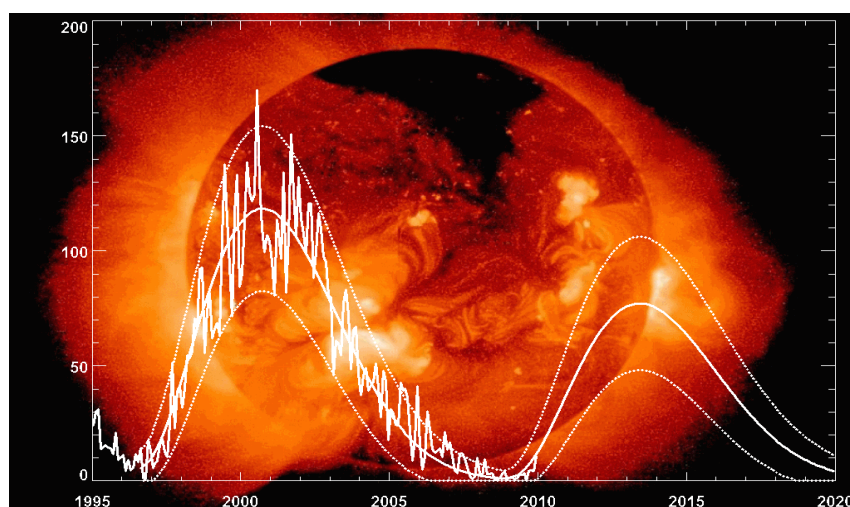
Az elmúlt 500 millió évre a NASA összeállította a proxy adatok alapján becsült globális átlaghőmérsékletek idősorát (9. ábra). Jól látszik, hogy igen szerencsés módon az elmúlt 10000 évben, az emberi civilizációk megjelenése óta az éghajlat kiegyenlített, az éghajlati ingadozás mértéke nem haladja meg a  $\pm 0,5$  °C-ot. Az ezt megelőző közel egymillió évben döntően a mainál hidegebb klímafeltételek jellemezték a Földet. Valóban voltak a földtörténeti korok során a jelenleginél lényegesen melegebb éghajlati viszonyok, de ezek sorában a legelső is több, mint 50 millió évvel ezelőtt volt, így ezen időszakok nem tekinthetők releváns analógiáknak a mai klímához.



**9. ábra.** A proxy adatok alapján becsült globális átlaghőmérséklet alakulása az elmúlt 500 millió évben. (Forrás: NASA, 2010).

*III/1. A globális melegedés hátterében természetes folyamatok állnak, úgy mint a Föld pályaelemeinek, illetve a Nap sugárzásának változása*

Amennyiben a globális melegedés hátterében valóban elsődlegesen a naptevékenység erősödése, pontosabban a napfoltszámok növekedés állna, úgy a 2000-2010 időszakban jelentős lehülésnek kellett volna bekövetkeznie a 10. ábra csökkenő napfoltszámai alapján. Ennek ellenkezője történt, ebben az időszakban tovább nőtt a Föld átlaghőmérséklete, s 2010-ben egy újabb rekord meleg volt, azaz a több mint száz éves idősorban soha nem mértek a 2010-nél nagyobb éves átlaghőmérsékletet.



**10. ábra.** A napfoltszám mért és előrejelzett értékei az 1995-2020 időszakra. (Forrás: NASA, 2010).

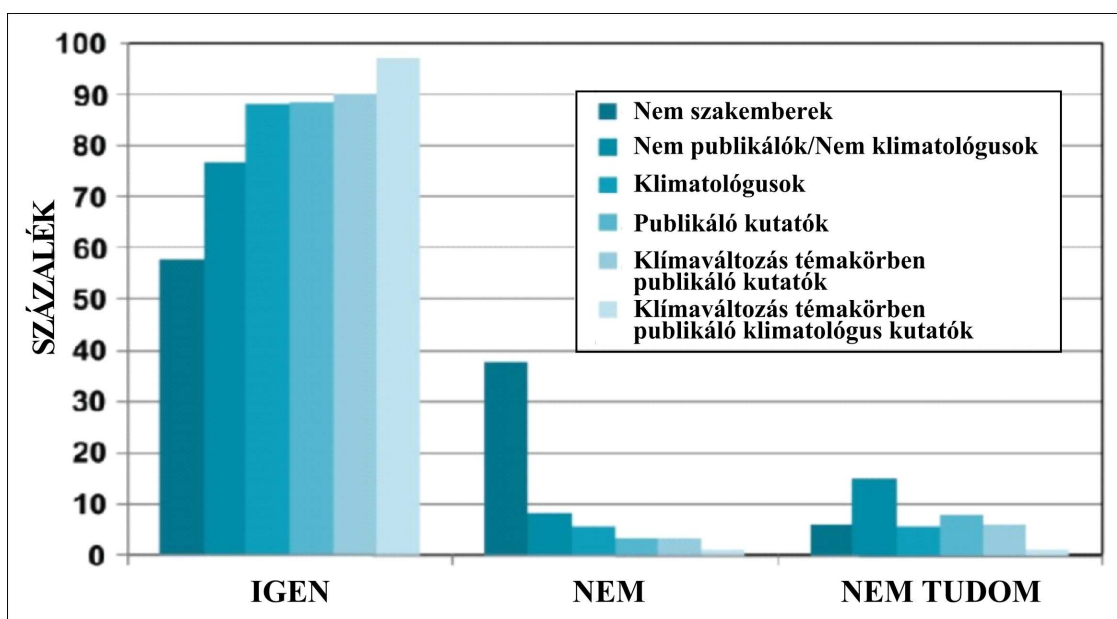
*III/5. Számos kutató nem ért egyet az IPCC jelentés állításaival*

Összefoglalóan elmondhatjuk e témakörben, hogy minimális számú publikált cikk van, amely alternatív magyarázatot próbál adni a globális melegedésre. Maga a kételkedés természetes folyamat, ugyanakkor egyetlen cikk sem tagadja, vagy cáfolja a globális melegedés egészében, illetve általánosságban, csak annak egy-egy aspektusában kételkedik. A cikkek formájában megjelenő klímaszkeptikus gondolatok általában egy éven belül tisztázásra, megcáfolásra kerülnek, de ennek ellenére a klímaszkeptikusok továbbra is komoly fegyvertényként hivatkoznak rá, mintha nem lett volna bebizonyítva az állítás hibás jellege.

A fentiek illusztrálására bemutatjuk az amerikai Illinoisi Egyetem által 2010-ben végzett vizsgálat néhány eredményét. A Föld és Környezettudományi Intézet munkatársai egy kérdőívet állítottak össze, mely a klímakutatók éghajlatváltozással kapcsolatos álláspontját volt hivatott felmérni. A kérdőív egyik kérdése így hangzott: Egyetért-e azzal az állítással, hogy a globális átlaghőmérsékletek növekedésének egyik jelentős tényezője az emberi tevékenység? A megkérdezettek száma összesen 10.247 volt, akik 30,7%-a adott értékelhető választ. A beérkezett 3146 válasz kiértékelése látható a 11. ábrán.



A laikus, nem szakemberek esetén a legalacsonyabb azon emberek száma 58%, akik jelentős tényezőnek tartják a globális melegedés folyamatában az emberi tényezők szerepét, s ugyanezen csoportban a legmagasabb e tényező szerepében való kételkedők aránya. A klímaváltozás témakörében dolgozó és publikáló kutatók legnagyobb hányada (98%-ka) tartja jelentős tényezőnek az antropogén tevékenységet a melegedési folyamatban. Tehát e vizsgálat eredménye egyáltalán nem támasztja alá, azt az állítást, hogy számos klímakutató nem ért egyet az IPCC jelentés globális melegedésre vonatkozó állításaival.



**11. ábra.** Az Illinois-i Egyetem által összeállított felmérésében adott válaszok megoszlása arra a kérdésre, hogy „Egyetért-e azzal az állítással, hogy a globális átlaghőmérsékletek növekedésének egyik jelentős tényezője az emberi tevékenység?”. (Forrás: A tudományos konszenzus ellenőrzésére lefolytatott vizsgálat. Doran, P.T. and Zimmerman, M.K., *Earth and Environmental Sciences*, University of Illinois at Chicago, 2010).

#### **Az IPCC jelentések, az IPCC működése**

Az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 1988-ban történt alapítása óta négy helyzetértékelő jelentést adott közre.



*12. ábra. Az IPCC 4. helyzetértékelő jelentés készítésénél közreműködő szakértők, szerzők, lektorok száma, a jelentés szerkezete.*

A 12. ábra számokkal illusztrálja, hogy az utolsó 4. helyzetértékelő jelentés (AR4) elkészüléséhez hány ország (130), hány tudományos szakértőjének (2500), hány vezető (450) és közreműködő (800) szerzőjének együttműködésére volt szükség. Arra is következtethetünk e számokból, hogy a szerzők, lektorok nem kevesebb, mint 18000 referált cikk eredményeinek feldolgozásával évek munkája során hozták létre a több mint 3000 oldalas jelentés nyers változatát. Ezt ellenőrizte a több ezer lektor, s a 90000 megjegyzés, korrekció elfogadása, illetve elvetése vezetett el a jelentés végleges változatához

Az IPCC helyzetértékelő jelentések egyik pozitívuma, hogy a döntések, a szövegezesek elfogadása konszenzus alapján történik. Gyenge pontjai közé tartozik egyrészt, hogy a kormányzatok túl nagy szerepet kapnak a bizottságokban, illetve a plénumon, másrészt, hogy olyan sok ponton van beillesztve ellenőrzés a folyamatba, hogy nagy eséllyel ennyi ellenőrzés már nem végre hajtható, s féltő, hogy elsikkad.

Az utóbbi állítás illusztrálására alább bemutatom az IPCC jelentések elkészítésének és elfogadásának folyamatát:

- A kormányok jelölik a szakértőket
- A szakértői területek és az egyensúlyok figyelembe vételével kijelölik a szerzői csoportokat
- A tartalomjegyzék jóváhagyása a kormányokkal való egyeztetés után
- A jelentés első nyers változatának elkészítése
- Szakértői összefoglalók
- Ellenőrzés, az ún. „szerkesztő lektorok“ bevonásával
- A jelentés második nyers változatának elkészítése

- Kormányzati és szakértői lektorálás
- Ismételt ellenőrzés, az ún. „szerkesztő lektorok“ bevonásával
- A kijelölt szerzők elkészítik az összefoglalót a politikusok részére (SPM)
- Az SPM kormányzati és szakértői lektorálása
- Ismételt ellenőrzés
- Az SPM jelentés sorról-sorra történő elfogadás a Plenáris ülésen a kormányzati delegáltak jelenlétében

Egy másik sokat vitatott kérdés, hogy az IPCC jelentésekben mi a bizonytalanság megjelenítésének optimális formája. Az érvényben lévő megállapodások alapján az állítások megfogalmazása, valószínűségi becslések formájában történik. A konfidencia szintek megadása mindhárom munkacsoportban egységesen (WG1, WG2, WG3) az alábbiak szerint jelenik meg:

Valószínűségi indikátorok megadása (WG1)

- Rendkívül valószínű: >95% (az előfordulás valószínűsége)
- Nagyon valószínű: >90%
- Valószínű: >66%
- Valószínűbb, mint nem: >50%
- Nagyon nem valószínű: <10%
- Rendkívül valószínűtlen: <5%

Megbízhatósági indikátorok (WG1 & WG2)

- Nagyon magas megbízhatósággal: Legalább 9/10 az esélye (hogy igaz)
- Magas megbízhatósággal: kb. 8/10 eséllyel
- Közepes megbízhatósággal: kb. 5/10 eséllyel
- Alacsony megbízhatósággal: kb. 2/10 eséllyel
- Nagyon alacsony megbízhatósággal: kevesebb, mint 1/10 eséllyel

A bizonytalanság minőségi, 2-dimenziós kezelése (WG3)

- Az egyetértés szintje (magas, közepes, alacsony): egyetértés szintje a szakirodalomban
- Bizonyítékok száma (sok, közepes, kevés): a független források száma és minősége

Kritikus megállapítások, ajánlások az IPCC működésével kapcsolatban

Az elmúlt néhány évben számos bizottság elemezte az IPCC szervezeti felépítését, működését abból a célból, hogy feltárják a szervezet működési nehézségeit, problémáit, s jobbító szándékkal módosítási javaslatokat teyenek. Ezen jelentések ajánlásait az alábbiakban összegezzük:

- Az irányítás, vezetés a résztvevő országok és nem a tudományos közösség kezében van.
- A kormányok alakítják ki a működés szabályait, s választják ki a szerzői és lektoráló csoportokat. Ők gyűjtik össze a tudományos szakirodalomból a relevánsnak ítélt tudományos közleményeket.

- A szerzői csoportok összeállítása a szakterület, valamint a földrajzi régiók arányos reprezentációja alapján történik.
- Az IPCC jelentések lektorálásának nagyon fontos eleme, hogy azt a kormányok és a szakértők együtt végzik.
- Legyen jobb a földrajzi területenkénti reprezentativitás a jelentés elkészítésében résztvevők között.
- Legyen jobb a tudományos hitelesség a szakértők kiválasztásánál.
- Szükséges javítani az IPCC szervezet hatékonyságát, a management munkáját, s a klímapolitikai kommunikációt.
- Jelentősen javítani szükséges az IPCC jelentéssel összefüggő kommunikációt mind a szakértők, mind a média, illetve a nagyközönség felé.

### ***Összefoglaló***

Az IPCC jelentések sorozata nagyon fontos információkat tartalmaz, s nem pótolható annak ellenére, hogy a szervezet működése lehetne átláthatóbb, jobban szervezett. Az elmúlt években számos bizottság világitotta át, s elemezte jobbitó szándékkal az IPCC munkáját, szervezetét. Sok ajánlás fogalmazódott meg e tárgykörben, s talán valamilyen megújulási folyamat is megindult.

Ezek az esetleges változások azonban nem késleltethetik a következő jelentés előkészületi munkáit, hiszen a helyzetértékelő jelentések tényeire, a modell-eredményekre szükség van az emissziócsökkentési tárgyalások érdekében. Ezek a kérdések ugyan elsődlegesen az utánunk jövő generációkat érintik majd, mégis a felelősség minket terhel: vajon minden tőlünk telhetőt megteszünk-e, megtettünk-e annak érdekében, hogy az éghajlati rendszer megismerési folyamata előbbre jusson, hogy a változó klíma hatáselemzéseire (az élelmezésbiztonság, az árvízvédelem, az egészségügy területén) szolgáltatunk-e megfelelő minőségű adatokat.

### ***Köszönetnyilvánítás***

Kutatásainkat támogatta az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával az „Európai Léptékkel a Tudásért, ELTE-TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003. A felsőoktatás minőségének javítása a kutatás-fejlesztés-innováció-oktatás fejlesztésén keresztül” pályázat, 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 Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott CCWATERS projekt (SEE/A/022/2.1/X).

### ***Irodalomjegyzék***

- ACIA, 2005: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, New York, NY. 1042p.
- Allison, I., Bindoff, N.L., Bindshadler, R.A., Cox, P.M., de Noblet, N., England, M.H., Francis, J.E., Gruber, N., Haywood, A.M., Karoly, D.J., Kaser, G., Le Quéré, C.,

- Lenton, T.M., Mann, M.E., McNeil, B.I., Pitman, A.J., Rahmstorf, S., Rignot, E., Schellnhuber, H.J., Schneider, S.H., Sherwood, S.C., Somerville, R.C.J., Steffen, K., Steig, E.J., Visbeck, M., Weaver, A.J., 2009: The Copenhagen Diagnosis, 2009: Updating the World on the Latest Climate Science. University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, Australia, 60p.*
- 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. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2001., New York, NY. 944p. (available online: <http://www.ipcc.ch>)*
- 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. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York, NY. 996p. (available online: <http://www.ipcc.ch>)*
- Mann, M.E., Zhang, Z., Hughes, M.K., Bradley, R.S., Miller, S.K., Rutherford, S., Ni, F., 2008: Proxy-Based Reconstructions of Hemispheric and Global Surface Temperature Variations over the Past Two Millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, pp. 13252-13257.*

# **A statisztikus klimatológia szerepe és lehetőségei a változó éghajlat kutatásában**

**Szentimrey Tamás**

Országos Meteorológiai Szolgálat, Éghajlati Elemző Osztály  
1024 Budapest Kitaibel Pál utca 1., email: szentimrey.t@met.hu

**Összefoglaló** – Az éghajlat kutatásának egyik alapvető területe a statisztikus klimatológia, melynél sztochasztikus közelítésből indulunk ki, és matematikai módszertant a valószínűségszámítás és matematikai statisztika szolgáltat. A statisztikus klimatológiai vizsgálatok célja az időben változó valószínűségi eloszlás jellemzése, becslése, míg tárgya a meteorológiai megfigyelési és mérési adatok, hiszen az éghajlatra és változására vonatkozó alapvető információt a meteorológiai adatok hordozzák. Röviden áttekintjük a főbb témaköröket, mint a múlt és jelen kutatása, illetve a jövő modellezésével való viszony, továbbá részletesebben foglalkozunk az adatszerzési kérdésekkel, úgymint adatellenőrzés, homogenizálás, interpoláció. Ehhez kapcsolódóan ismertetjük a MASH homogenizáló és a MISH térbeli interpolációs rendszereinket. Végezetül kitérünk a múlt és jelen éghajlatának kutatásának néhány módszertani kérdésére és magyarországi eredményére is.

## ***A statisztikus klimatológia célja, tárgya, eszközei***

A statisztikus klimatológiában a sztochasztikus sémából indulunk ki, és a meteorológiai események valószínűségeit kívánjuk megismerni, jellemezni. A meteorológiai éghajlat fogalmát az események valószínűségeinek, illetve általánosabban a valószínűségi eloszlásnak feleltetjük meg. Ilyen értelemben egy adott időpont éghajlatát, beleértve a változékonyságot is, az aktuális valószínűségi eloszlás jelenti, míg az éghajlat változása a valószínűségi eloszlás - feltételezhetően lassú - változásával ekvivalens. A statisztikus klimatológia célja az időben változó valószínűségi eloszlás jellemzése, becslése, melyhez matematikai módszertant a valószínűségszámítás és matematikai statisztika szolgáltat. Vizsgálatának tárgya elsősorban a meteorológiai megfigyelési és mérési adatok, hiszen az éghajlatra és változására vonatkozó alapvető információt a meteorológiai adatok hordozzák, lényegében ezek játsszák a statisztikai minta szerepét.

Változó éghajlat esetén a statisztikus klimatológia feladata bővebb és sokkal bonyolultabb is, mint állandó éghajlat esetén. Bővebb, hiszen kiemelt feladatként megjelenik magának a változásnak a detektálása és jellemzése, továbbá bonyolultabb is, mivel csak olyan matematikai statisztikai modellek és módszerek alkalmazhatók, melyek megengedik, illetve képesek figyelembe venni a valószínűségi eloszlás, azaz az éghajlat változását.

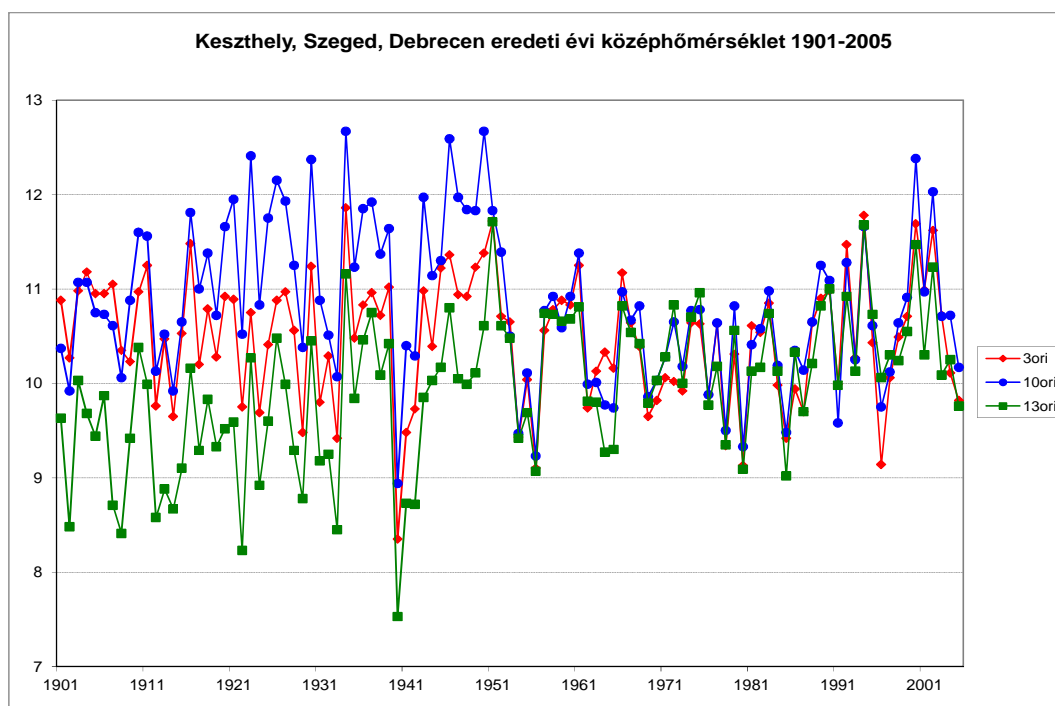
Ami a statisztikus klimatológia témaköreit illeti, az egyik fő terület az adatszerzés, ugyanis jó minőségű, reprezentatív meteorológiai adatokra van szükség, mégpedig térben és időben egyaránt. Ide olyan témák tartoznak, mint adatpótlás, adatellenőrzés, homogenizálás valamint interpoláció térben és időben. Ezek alapján történhet a múlt és jelen éghajlatának térbeli és időbeli vizsgálata, azaz a valószínűségi eloszlás és változásának becslése, matematikai statisztikai elemzése. Ami a jövő éghajlatának előrejelzését illeti, a statisztikus klimatológiának szintén szerepe kell, hogy

legyen, egyrészt a modellek felépítésében és validálásában, másrészt a projekciós eredmények matematikai statisztikai elemzésében.

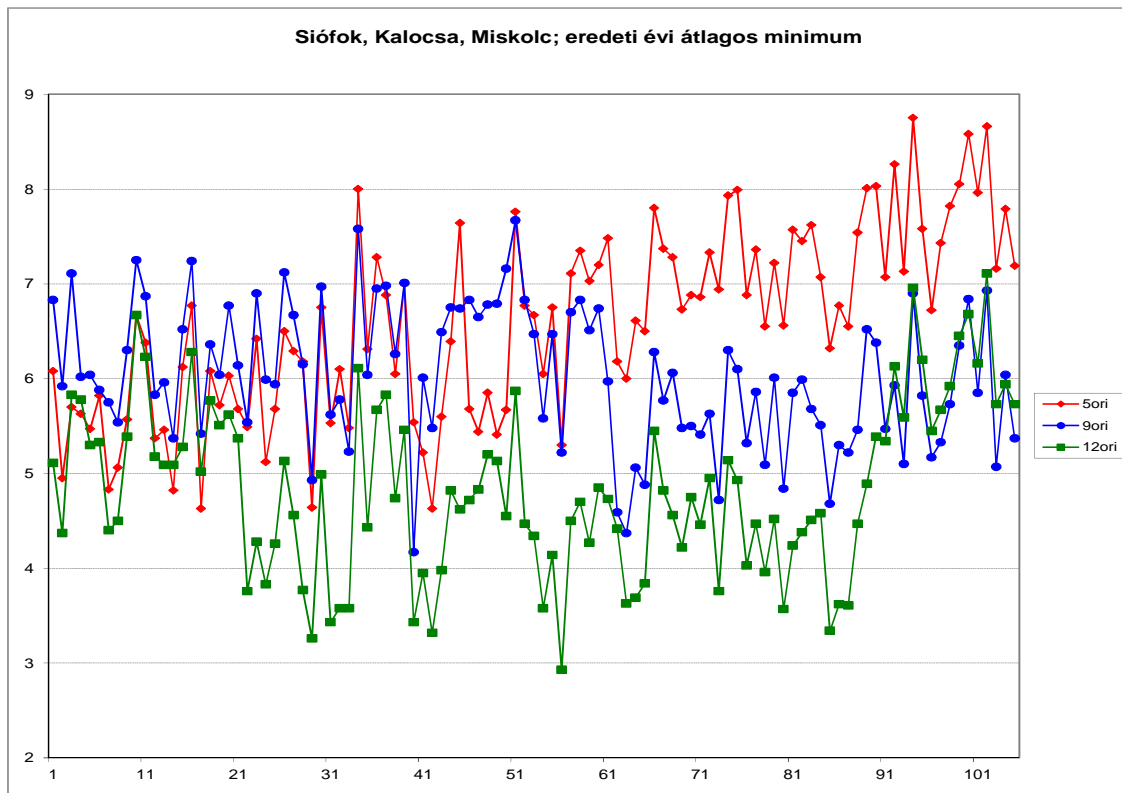
### ***Meteorológiai adatok és éghajlati vizsgálatok kapcsolatrendszere***

A meteorológiai adatokat a vizsgálatoknál általában eleve adottként szokták feltételezni. Nem igazán köztudott, hogy az adatok használhatóságához bizonyos speciális eljárások szükségesek, melyek maguk is éghajlati információkat igényelnek. Ezeket az információkat viszont megint csak az adatok vizsgálata által szerezhethetjük meg. Az alábbiakban a meteorológiai adatok és az éghajlati vizsgálatok nem is olyan egyszerű kapcsolatrendszerét mutatjuk be.

A meteorológiai vizsgálatoknál, a minőség szempontjából komoly problémát jelentenek az adathiányok, a mérési hibák, valamint a mérőhálózat változásából következő inhomogenitások. Ennek illusztrálására mutatjuk be az 1., 2. ábrákat.



**1. ábra.** Keszthely(3), Szeged(10), Debrecen (13) eredeti (ori) évi középhőmérsékleti sorai (1901-2005)

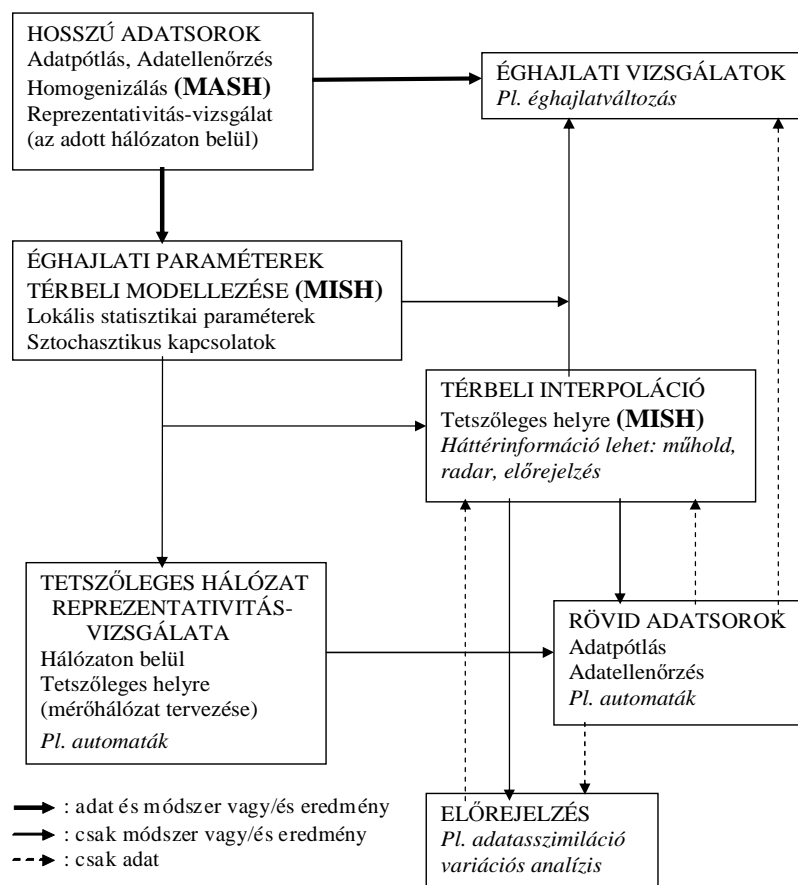


**2. ábra.** Siófok(5), Kalocsa(9), Miskolc (12) eredeti (ori) évi átlagos minimum hőmérsékleti sorai (1901-2005)

A térbeli reprezentativitás szempontjából, a pontonkénti mérések, továbbá ezek és a rácshálózatokra adott háttér-információk (pl. radar, műhold, előrejelzési adatok) együttes kezelése okoz nehézséget. Ugyanakkor, jó minőségű térbeli és időbeli adatok biztosítása, előállítás, nem lehetséges az éghajlat vizsgálata nélkül. Hangsúlyozzuk az előállítást, ugyanis az alapot jelentő, igen értékes nyers adatok nem tesznek eleget az elvárásoknak. A nyers adatok feldolgozásához, illetve az immár mesterséges adatok előállításához olyan eljárások szükségesek, mint például, adatpótlás, adatellenőrzés, homogenizálás, interpoláció térben és időben. Az ilyen – egymással szorosan összefüggő – eljárások jó minőségű megvalósítása azonban már maga is éghajlati vizsgálatokat igényel. Ezek a vizsgálatok a statisztikus klimatológia műfajába tartoznak, és erős matematikai alappal kell rendelkezniük. Továbbá, a vizsgálatok során kapott eredmények már önmagukban is hasznos éghajlati, meteorológiai információt jelentenek. Tehát a két problémát – jó minőségű adatok biztosítása és éghajlat vizsgálata – nem lehet, nem szabad mereven szétválasztani. A kérdés ennél sokkal bonyolultabb, az egyszerű, mechanikus megközelítés sehova sem vezet.

A következő kérdés, hogy az adatokat biztosító eljárások, illetve éghajlati vizsgálatok, hogyan foglalhatók egységes és megvalósítható rendszerbe. Ezzel kapcsolatos elképzelésünket, koncepciónkát a 3. ábrán látható blokk-diagram illusztrálja.





3. ábra. Éghajlati témák, rendszerek kapcsolata

Felhívjuk a figyelmet, hogy nem csupán egy tervet mutatunk be, hanem már jórészt működő programrendszerekről van szó (MASH, MISH). Megjegyezzük, hogy a blokk-diagramon látható fontos meteorológiai, éghajlati témákat általában külön-külön szokták kezelni, pedig ezek együtt egy komplex rendszert képeznek. Együttes kezelésük teszi lehetővé a jó minőségű térbeli és időbeli adatok biztosítását, előállítását is. Lényegében az ÉGHAJLATI VIZSGÁLATOK, beleértve az alkalmazott klimatológiát is, valamint az ELŐREJELZÉS blokkjai számára a többi öt – egymással is szorosan összefüggő – témakör, illetve rendszer szolgáltat adatokat és éghajlati információkat.

### **Homogenizálás, adatellenőrzés, adatpótlás (MASH)**

A MASH rendszert (Multiple Analysis of Series for Homogenization) hosszú havi és napi adatsorok pótlására, ellenőrzésére és homogenizálására dolgoztuk ki (Szentimrey, 1999, 2008). Lényegében ez a többi rendszerünk alapja is, hiszen az éghajlatra vonatkozó

információ szempontjából a hosszú adatsorok jelentik a térbeli és időbeli mintát. A legújabb MASHv3.02 verzió (Szentimrey, 2007) módszertani alapelvei az alábbiak.

Havi adatsorok homogenizálása, ellenőrzése, pótlása:

- A rendszer az úgynevezett a relatív homogenitásvizsgálati elv alapján működik. Ennek lényege, hogy egy adott éghajlati elem, különböző megfigyelési állomásokhoz tartozó, azonos időszakra vonatkozó, ugyanazon havi – vagy ugyanazon évszakos, esetleg éves – adatsorait hasonlítjuk össze, és az esetleges ellentmondásokat keressük, vizsgáljuk. Az ezen elv alapján történő homogenizálás célja pedig, pontosan a felfedezett ellentmondások megszüntetése, vagyis az ezeket okozó inhomogenitások kiszűrése az adatsorokból.
- Havi adatsorokat homogenizálunk, és a homogenizált évszakos, éves sorokat a homogenizált havi sorokból származtatjuk.
- A rendszer alkalmas additív (pl. hőmérséklet) és kumulatív (pl. csapadék) természetű éghajlati elemek havi, évszakos, éves adatsorainak homogenizálására.
- Lépésről lépésre működtethető interaktív, félautomatikus iterációs eljárás.
- Az adattörténeti információkat (meta adatok) a rendszer képes automatikusan használni.
- A homogenizálás eredménye kiértékelhető, verifikálható. Ez annyit jelent, hogy az eredeti adatsorok és az eredményül kapott sorok inhomogenitásának mértékét, valamint a változtatás mértékét az eljárás során kvantitatíve jellemezzük.

Napi adatsorok homogenizálása, ellenőrzése, pótlása:

- A napi adatok homogenizálása a becsült havi inhomogenitások felhasználásával történik.
- A rendszer automatikus adatellenőrző és adatpótló eljárást is tartalmaz.

A MASH rendszerünknel különösen az erős matematikai statisztikai megalapozottságra törekedtünk, ugyanis sok, a gyakorlatban elterjedt módszer gyengesége pontosan ennek hiányával, azaz az elmélet elhanyagolásával magyarázható. Mint oly sokszor, ez esetben sem vezet eredményre a túlzott gyakorlatiasság. Ez utóbbi problémára az alábbiakban egy példát is bemutatunk.

*Példa a COSTES0601 (HOME) Akció eredményeiből*

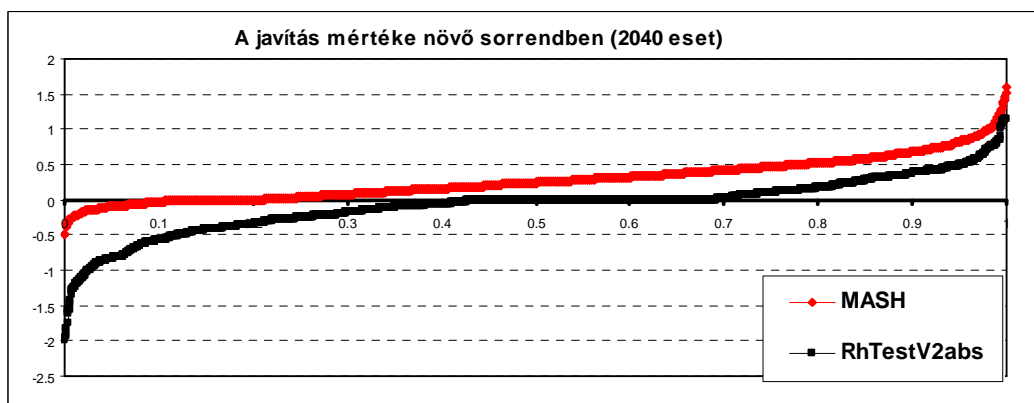
Ezen COST Akció célja a homogenizálási módszerek tesztelése, kiértékelése, mégpedig elsősorban generált benchmark adatbázis alapján. Megjegyezzük, hogy sajnálatos módon, az elméleti szempontok ezen együttműködés keretében is meglehetősen elhanyagoltak.

A benchmark adatbázis összesen 2040 generált „havi hőmérsékleti” adatsort tartalmaz, és alkalmazzuk az adatsorokra a következő jelöléseket: homogén adatsor:  $X_H(t)$ , inhomogén adatsor:  $X_{IH}(t) = X_H(t) + IH(t)$ , ahol  $IH(t)$  a mesterséges, hozzáadott inhomogenitás jele.

A homogenizálás célja pontosan ezen inhomogenitás kiszűrése, azaz az  $X_H(t)$  homogén adatsor becslése, tehát legyen a homogenizált adatsor jelölése:  $\hat{X}_H(t)$ . A homogenizáló módszereket sokféle szempont szerint lehet értékelni, pl. a javítás mértékével, azaz az

$$SDEV(X_H(t) - X_{IH}(t)) - SDEV(X_H(t) - \hat{X}_H(t)),$$

statisztikával, ahol SDEV a szórást jelöli. A 4. ábrán a MASH-re és egy RhTestV2abs nevű módszerre vonatkozó vizsgálati eredményeket mutatjuk be. Ez utóbbi, nem túl erős matematikai alapokkal rendelkező módszert sajnálatos módon meglehetősen sok helyen alkalmazták, alkalmazzák, szerzőjének megnevezésétől, a gyenge minőség miatt eltekintünk. Mint az ábrán látható, ez a módszer a homogenizálás során nagyobb valószínűséggel ront, mint javít, ami az adatsorok szempontjából katasztrofális eredményhez vezethet.



4. ábra. A MASH és RhTestV2abs homogenizáló módszerek hatékonyságának összehasonlítása

### Térbeli interpoláció (MISH)

A MISH rendszert (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis) meteorológiai elemek földfelszíni értékeinek interpolációjára dolgoztuk ki (Szentimrey és Bihari, 2006, 2007a). Az alábbiakban röviden összefoglaljuk a MISHv1.02 programrendszerrel (Szentimrey és Bihari, 2007b) kapcsolatos legfontosabb tudnivalókat. A rendszer tulajdonképpen két részre bontható, nevezetesen az éghajlati modellező és interpolációs részre. Az interpolációs rendszer a modellező rendszer eredményei alapján működik.

Modellező programrendszer az éghajlati statisztikai paraméterekre:

- Hosszú homogenizált adatsorok és determinisztikus modellváltozók (pl. topográfia) alapján működik.
- A modellezést csak egyszer kell elvégezni az interpolációs alkalmazások előtt.

Interpolációs programrendszer:

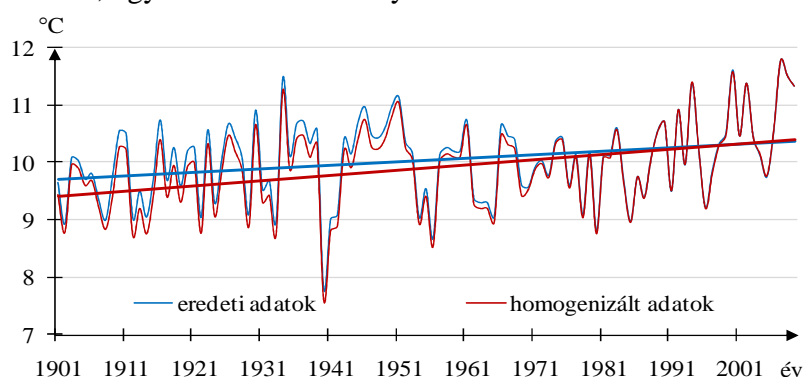
- Additív (pl. hőmérséklet) vagy multiplikatív (pl. csapadék) modell és interpolációs formula alkalmazható, a meteorológiai elem eloszlásától függően.
- Napi, havi értékek és sokévi átlagok interpolálhatók.
- Kevés prediktor is elegendő, tekintettel a korábbi modellezésre.
- Becslés az interpolációs hibákra, mégpedig a reprezentativitás értékekre.

- Lehetőség háttérinformáció használatára, pl. műhold, radar, előrejelzés.
- Képesség adatsorok rácspontokba való interpolációjára (gridding).

A MISH rendszerrel kapcsolatban természetesen felvethető a kérdés, hogy egyáltalán miért készült, különös tekintettel a térinformatikai rendszerekbe (GIS) beépített interpolációs módszerekre, melyeket manapság a meteorológiában is széles körben alkalmaznak. A probléma az, hogy ezek a matematikai szempontból korrekt, de speciális geostatistikai (Cressie, 1991) interpolációs módszerek nem képesek a hosszú adatsorokban meglévő éghajlati információ felhasználására (Szentimrey *et al.*, 2007), hiszen nem meteorológiai célra készültek.

### ***A múlt és jelen éghajlatának kutatása***

Magyarország éghajlatára vonatkozó vizsgálatainkat napi és havi, hőmérsékleti (közép, minimum, maximum) illetve csapadékösszeg adatsorok alapján végeztük el. Voltak közöttük hosszabb sorok (1901-2009) ritkább állomáshálózatokra és rövidebb sorok sűrűbb hálózatokra. Az előbbieket különösen az időszerelemzések esetén fontosak, míg az utóbbiak a térbeli vizsgálatoknál. A MASH rendszerrel valamennyi adatsorra végrehajtottuk a homogenizálást, adatellenőrzést és szükség esetén a pótlást. A MISH interpolációs rendszerhez szükséges, a szóban forgó elemek valószínűségi eloszlását jellemző, éghajlati statisztikai paraméterek (pl. korrelációszerkezet) modellezése már az utóbbi évek folyamán megtörtént. A térbeli reprezentativitás növelése érdekében, az állomások adatsorait sűrű rácssystemre interpoláltuk (gridding), és a matematikai statisztikai elemzéseknél ezeket is vizsgáltuk, pl. az éghajlati extrém indexek esetében. Az országos átlagok sorait pedig, a rácsponti adatsorok átlagaiként számoltuk, hiszen ezek az elméleti országos átlagok interpolált értékeivel ekvivalensek. Ily módon az adatoknak egy - reményeink szerint - jó minőségű, valamint térben és időben reprezentatív rendszeréhez jutottunk. Példaként mutatjuk be az 5. ábrát, ahol az eredeti és homogenizált évi középhőmérséklet interpolált országos átlagsorai láthatók. Az elemzések részletesebben Bihari Zita és Lakatos Mónika cikkeiben találhatóak, ugyanebben a kiadványban.



**5. ábra.** Az eredeti és a homogenizált évi középhőmérséklet interpolált országos átlagsorai (1901-2009), az illesztett lineáris trendvonalakkal

### ***Konklúzió***

A statisztikus klimatológiának bőven vannak lehetőségei a változó éghajlat kutatásában, csak komolyabban kellene venni a matematikát.

### ***Irodalomjegyzék***

- Cressie, N., 1991: Statistics for Spatial Data. Wiley, New York, 900p.
- Lakatos, M., Szentimrey, T., Bihari, Z., 2009: Gridded daily data series for mapping of extreme temperature and precipitation indices in Hungary, Proceedings of 2nd Conference on the Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology, Budapest, 11-15 May 2009
- Szentimrey, T., 1999: Multiple Analysis of Series for Homogenization (MASH), Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data, Budapest, Hungary; WMO, WCDMP-No. 41, pp. 27-46.
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2006: MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis), COST Action 719 Final Report, The use of GIS in climatology and meteorology, Edited by Ole Einar Tveito, Martin Wegehenkel, Frans van der Wel and Hartwig Dobesch, 2006, pp. 54-56
- Szentimrey, T., 2007: Manual of homogenization software MASHv3.02, Hungarian Meteorological Service, p. 61.
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007a: Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis), Proceedings from the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology, Budapest, Hungary, 2004, COST Action 719, COST Office, 2007, pp. 17-27
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007b: Manual of interpolation software MISHv1.02, Hungarian Meteorological Service, p. 32
- Szentimrey, T., Bihari, Z., Szalai, S., 2007: Comparison of geostatistical and meteorological interpolation methods (what is what?), Spatial Interpolation for climate data - the use of GIS in Climatology and meteorology, Edited by Hartwig Dobesch, Pierre Dumolard and Izabela Dyras, 2007, ISTE ltd., London, UK, 284pp, ISBN 978-1-905209-70-5, pp.45-56
- Szentimrey, T., 2008: Development of MASH homogenization procedure for daily data, Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, Budapest, Hungary, 2006; WCDMP-No. 71, WMO/TD-NO. 1493, 2008, pp. 123-130.

# Térbeli statisztikai vizsgálatok, átlagos jellemzők és statisztikák Magyarországon

**Bihari Zita**

Országos Meteorológiai Szolgálat, Éghajlati Elemző Osztály  
1024 Budapest Kitaibel Pál utca 1., email: bihari.z@met.hu

**Összefoglaló** – A múlt és a jelen éghajlatának jellemzéséhez nagyon fontos, hogy térben és időben jó minőségű, ellenőrzött adatsorokat használjunk fel. Az első rész a megfigyelt adatok térbeli elemzésének, a térbeli interpoláció különböző lehetőségeinek bemutatásával foglalkozik. Az OMSZ-ban kidolgozott MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized databases) interpolációs módszer (Szentimrey, Bihari) kimondottan meteorológiai célú, az ismert és általánosan alkalmazott geostatistikai módszerekkel szemben felhasználja az adatsorokban rejlő információ tartalmát is, ezáltal alkalmazásával pontosabb eredményeket lehet elérni. A módszer jellegzetessége, hogy egy nagysűrűségű, hosszú időszakra vonatkozó, homogenizált állomási adatbázis alapján modellezi a szükséges éghajlati statisztikai paramétereket, majd ezeket felhasználva interpolál. Az interpolációhoz így már kevesebb állomási adat is elegendő, de ugyanakkor egy rácshálózaton elérhető háttérinformációkat (radar, műhold, előrejelzés) is fel lehet használni a térbeli szerkezet pontosításához. Az OMSZ Éghajlati Elemző Osztályán folyó klimatológiai vizsgálatokhoz a MISH felhasználásával készítettünk térképeket, rácsponti adatsorokat. Az elméleti áttekintés után Magyarország néhány éghajlati jellemzőjét is bemutatjuk, különös tekintettel az elmúlt évtizedekben bekövetkezett változások területi különbségeire.

## **Bevezetés**

Térbeli vizsgálatokat a térinformatikai szoftverek megjelenésével gombnyomásra lehet készíteni. Ezekben a rendszerekben rendelkezésre állnak könnyen alkalmazható interpolációs módszerek, és nagyon nagy a csábítás, hogy minden további gondolkodás és problémamegoldás helyett ezeket a módszereket használjuk.

E módszerek között legegyszerűbb az inverz távolság módszere, mely csupán a prediktorok távolságát felhasználva becsli az interpolált értéket. Vannak matematikailag egzaktabb, a becslés hibájának minimalizálására törekvő bonyolultabb módszerek is, mint például a különböző kriging és spline eljárások.

Bár ez utóbbi módszerek matematikailag teljesen korrektek, számos probléma már azonnal jelentkezik, ugyanis (az univerzális krigingtől eltekintve) nem tudják kezelni a meteorológiában nyilvánvalóan létező térbeli trendet, így például nem tudják kezelni a domborzat okozta hatásokat. További korlátaik közé tartozik, hogy az interpolációhoz szükséges, térbeli sztochasztikus kapcsolatok megállapításához csupán egyetlen időbeli realizációt, az éppen interpolálandó adatokat veszik figyelembe. Sokszor persze ez az egyetlen járható út.

A meteorológia abban a szerencsés helyzetben van, hogy rendelkezik hosszú adatsorokkal, ezáltal sokkal több információ van az adott térségre. Az interpolációs hibát minimalizáló optimális statisztikai paraméterek tehát pontosabban modellezhetők.

Az adatsorok felhasználását különböző módon elterjedten használják a meteorológiában a térbeli trend modellezésére (residual vagy detrendezett kriging, AURELHY-módszer), de a sztochasztikus kapcsolatok modellezésénél megmaradnak az egy időbeli realizációt felhasználó geostatistikus közelítésnél.

Az OMSZ-ban kidolgozásra került egy kimondottan meteorológia célú MISH interpolációs módszer (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis, Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007a), mely a fent vázolt problémák megoldására készült. Részletes leírására jelen publikációban nem vállalkozunk, de főbb sajátosságait bemutatjuk.

### ***A MISH interpolációs módszer***

#### ***A MISH fő sajátosságai***

A MISH egy meteorológiai célú és eszköztárú interpolációs módszer, mely felhasználja a hosszú adatsorokban rejlő információ tartalmát. Az éghajlati statisztikai paramétereket hosszú, homogenizált adatsorok felhasználásával modellezi. Kiszámolja az optimális interpolációs paramétereket, melyek a modellezett éghajlati paraméterek bizonyos ismert függvényei. A modellezés környezetenként történik, tehát csak a legközelebbi prediktorokat használja fel. Az interpolációs formulába behelyettesíti a modellezett optimális interpolációs paramétereket és a prediktor értékeket.

#### ***Interpolációs formulák***

A térbeli interpolációs feladat megoldásakor az ismeretlen prediktandust próbáljuk megbecsülni ismert prediktorok valamilyen függvényével. Az interpolációs függvény típusa elvileg függ az adott (meteorológiai) elem jellegétől, valószínűségi eloszlásától. Lineáris formula használható normális eloszlású elem esetén, ami a meteorológiában pl. a hőmérsékletre alkalmazható.

A gyakorlatban az interpolációs módszerek döntő többsége a vizsgált elemtől függetlenül lineáris formulát használ. Ezzel ellentétben a MISH-ben kidolgozásra került egy multiplikatív formula is, ami a kvázi lognormál eloszlású elemekre (például csapadék) használható.

Additív formula a MISH-ben

$$\hat{Z}(s_0, t) = E(s_0) + \sum_{i=1}^M \lambda_i (Z(s_i, t) - E(s_i)) = \sum_{i=1}^M \lambda_i (E(s_0) - E(s_i)) + \sum_{i=1}^M \lambda_i Z(s_i, t) \quad (1)$$

Multiplikatív formula a MISH-ben

$$\hat{Z}(s_0, t) = \vartheta \cdot \left( \prod_{q_i \cdot Z(s_i, t) \geq \vartheta} \left( \frac{q_i \cdot Z(s_i, t)}{\vartheta} \right)^{\lambda_i} \right) \cdot \left( \sum_{q_i \cdot Z(s_i, t) \geq \vartheta} \lambda_i + \sum_{q_i \cdot Z(s_i, t) < \vartheta} \lambda_i \cdot \left( \frac{q_i \cdot Z(s_i, t)}{\vartheta} \right) \right) \quad (2)$$

ahol:

$\hat{Z}(s_0, t)$	interpolált érték
$Z(s_i, t) (i = 1, \dots, M)$	prediktorok, mért értékek
$E(s_i) (i = 0, \dots, M)$	térbeli trend

$\lambda_i$	súlytényezők, melyek a kovarianciáktól függnnek
$q_i, \vartheta$	interpolációs paraméterek

### ***A MISH programrendszer***

A fentiekben vázolt elvi alapokra építve elkészült a MISH programrendszer, jelenleg a MISHv1.02 verzió a legújabb (Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007b). A program 4 alrendszerből áll, melyek a következők:

- Modellező programrendszer
- Interpolációs programrendszer
- Adatpótlás
- Griddingelés

A következő részben ezeket az alrendszereket ismertetjük.

### ***Modellező programrendszer***

A modellező alrendszer a MISH alapja. Ennek során állnak elő azok a paraméterfájlok, melyeket az interpoláció során input adatként használunk. A modellezés hosszú homogenizált adatsorok és determinisztikus modellváltozók (pl. topográfia) felhasználásával működik. Az adatsorokból különböző éghajlati statisztikai paramétereket állítunk elő, a determinisztikus modellváltozókkal pedig ezeket modellezzük. A modellezés, az adatsorok feldolgozása, a determinisztikus modellváltozók kiválasztása nagyfokú körültekintést, hosszú futtatási időt igénylő folyamat, de szerencsére csak egyszer kell elvégezni az interpolációs alkalmazások előtt. A modellezés havi adatok elemzésére épül, de az eredményül kapott statisztikai paraméterek napi adatok interpolációjához is felhasználhatók.

A modellezés folyamán az (1), illetve (2) interpolációs formulákban található ismeretleneket kell megbecsülni. Belátható (Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007a), hogy additív formula esetén ezen ismeretlenek modellezése visszavezethető a szórás, a korrelációk és a várható értékek különbségének modellezésére.

A modellezést eddig 9 meteorológiai elemre végeztük el. Az additív formulát használjuk a közép-, maximum- és minimumhőmérséklet, a légnyomás, az átlagos relatív nedvesség interpolálásához. A multiplikatív formulát alkalmazzuk a csapadék, a relatív nedvesség és az átlagos szélesség interpolációjakor.

Jelenleg folyik a napfénytartam modellezése, valamint pontosítjuk a szél interpolálásához szükséges paraméterfájlokat, nemcsak az átlagos szél, hanem a napi és havi maximális szélsebesség esetére is.

A várható értékek különbségének modellezésére a térbeli trend kiszűréséhez van szükség. E folyamat során olyan modellváltozókat keresünk, melyek nem változnak az időben (determinisztikusak), és változásuk egyértelmű változást okoz a vizsgált meteorológiai elem értékében. Ilyen modellváltozó lehet elsősorban a tengerszint feletti magasság, de más ebből származtatott topográfiai (pl. lejtéssel, kitettséggel kapcsolatos) paraméter is. E topográfiai paraméterek egy speciális csoportja az ún. AURELHY paraméterek, melyek egy pont környezetében figyelembe vett magasságkülönbségekből



főkomponens analízis segítségével származtatott paramétereket jelentenek (Benichou, P. és Le Breton, O., 1987). A gyakorlatban a modellezési folyamatban a tengerszint feletti magasságot és az AURELHY paramétereket használjuk modellváltozóként.

Néhány elemnél e modellváltozók alkalmazása nem hozott kellő eredményt. A szélsősebesség régebbi és most folyamatban lévő modellezésénél a fentiek mellett két másik modellváltozót, az érdességi paramétert és a szélmérő magasságát is felhasználtuk, mert alkalmazásukkal nagymértékben javult a modellezés pontossága.

A modellezést egy Magyarországot lefedő, téglalap alakú, 30" felbontású rácshálózat pontjaira végezzük el.

### *Néhány példa a modellezésre*

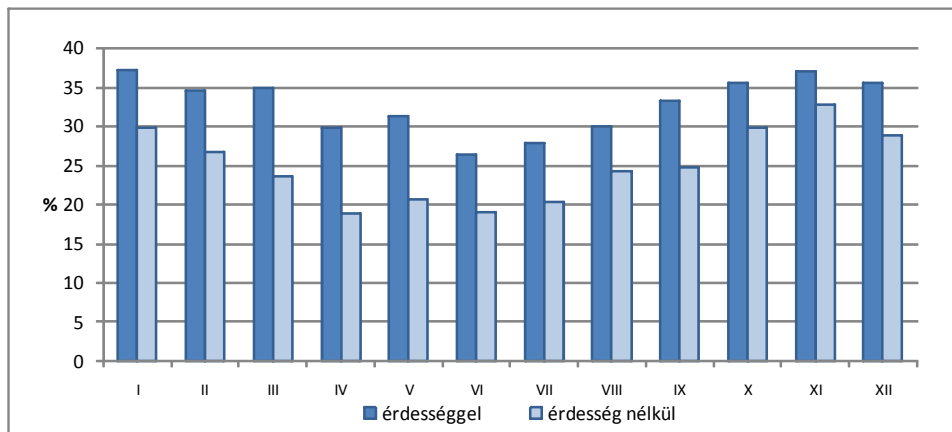
A középhőmérséklet modellezésére 57 állomás, míg a csapadékra 500 állomás havi homogenizált adatsorát használtuk fel az 1971-2000, illetve 1951-2000 időszakból. Ez az állomásszám különbség a környezetenkénti modellezésben hatalmas eltérést okoz, középhőmérséklet esetén a legközelebbi 10 állomás, csapadéknál a legközelebbi 30 állomás adatait vettük figyelembe, melyek ~600, illetve ~18000 kombináció végigszámolását eredményezték.

Az 1. táblázatban a középhőmérséklet modellezésének néhány eredményét mutatjuk be. A modellezés során a modellváltozók összes lehetséges kombinációját vizsgáljuk, el kell dönteni, hogy hány elemű és milyen összetételű kombinációt használjunk. Optimális kombinációként azt választjuk ki, amelyik a lehetséges legjobb kombinációt (legkisebb standardizált négyzetes hiba) 95 %-ban közelíti meg. Az 1. táblázatban látható, hogy ez a megoldás az eredményességet csak kis mértékben rontja, de a figyelembe veendő modellváltozók száma kevesebb mint felére csökken.

**1. táblázat.** A havi középhőmérséklet várható értékének a domborzat által meghatározott része éves átlagban

A várhatóérték domborzat által meghatározott része %-ban (1)		(1)	(2)
	Csak a magasság figyelembe vételével	51	0
	A magasság és a főkomponensek legjobb kombinációjának figyelembe vételével	62	8,1
A figyelembe vett főkomponensek száma (2)	A magasság és a főkomponensek legjobb kombinációját 95 %-ban megközelítő kombináció figyelembe vételével	59	3,5

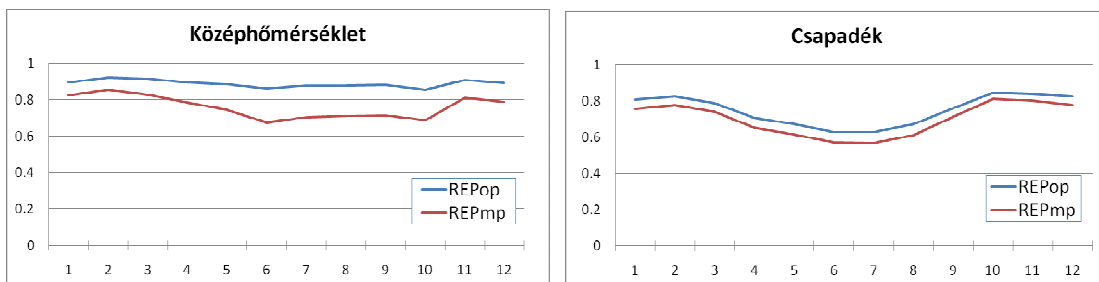
Mint már említettük, a szél esetében figyelembe vettük az érdességi magasságot is. Az 1. ábrán ennek eredményét mutatjuk be. Jól látható, hogy az érdességi paraméter használatával a szélsősebesség várható értékének a domborzat által meghatározott része minden hónapban magasabb volt.



1. ábra. A havi átlagos szélesség várható értékének a domborzat által meghatározott része az érdesség figyelembevételével és anélkül

### A modelleredmények tesztelése

A modellező programrendszer alkalmas az eredmények tesztelésére is az állomások adatsorainak egymás közötti interpolációjával, a reprezentativitás értékek vizsgálata alapján (reprezentativitás érték: 1 – relatív hiba). Az interpolációt, illetve a reprezentativitás-értékekre vonatkozó számításokat kétféle módon végeztük el:  $REP_{opt}$ , interpoláció a valódi éghajlati statisztikai paraméterekkel (optimális), illetve  $REP_{mod}$ , interpoláció a modellezett éghajlati statisztikai paraméterekkel. A 2. ábrán látható, hogy a középhőmérséklet esetén a havi optimális reprezentativitás értékek általában 0,9 fölött vannak, a modellezés a nyári hónapokban a leggyengébb. Csapadék esetén az optimális értékek nem jók ennyire, viszont jóval kisebb a különbség az optimális és a modellezett értékek között.



2. ábra. A középhőmérsékletre (57 állomás) és a csapadékösszegre (500 állomás) kapott átlagos havi reprezentativitás-értékek

### Az interpolációs programrendszer

Az interpolációs programrendszer a modellező alrendszer eredményein alapszik. A modellezett statisztikai paramétereket és a prediktor értékeket kell behelyettesíteni az (1) vagy (2) interpolációs formulába a meteorológiai paraméter eloszlásától függően.

Az interpoláció során napi, havi értékek és sokévi átlagok egyaránt interpolálhatók a modellezett havi paraméterek felhasználásával. Tekintettel a korábbi modellezésre, melynél sok adatot felhasználunk, így jól tudjuk jellemezni a térbeli eloszlást, az interpolációnál már kevés prediktor is elegendő.

A modellezési részhez hasonlóan itt is van lehetőség az interpolációs hibákra, pontosabban a reprezentativitás értékek becslésére.

A rendszer további előnye, hogy lehetőség van ún. háttérinformáció, vagyis valamilyen ritkább rácshálózatra számolt adatok használatára. Ilyenek lehetnek a műhold- és radarmérések, illetve az előrejelzések. A gyakorlatban a napi csapadékösszeg interpolálásakor rendszeresen felhasználjuk a 24 órás radarcsapadékot is.

### ***Griddingelés***

Az interpoláció során leggyakrabban az a cél, hogy egy adott időpontra készítsünk nagyfelbontású térképet. Ugyanakkor más feladatok is jelentkezhetnek, amikor nem egyetlen időpontra kellene rácsponti értékek, hanem egy egész adatsort akarunk interpolálni. A MISH újabb verziói erre is alkalmasak, azaz egy lépésben képesek hosszú, napi vagy havi adatok interpolálására előre magadott pontokra vagy rácshálózatra. Természetesen ez a programrendszer is a modellező programrendszer eredményei alapján működik. Az interpolációhoz hasonlóan a griddingeléshez is elegendő kevesebb prediktor.

### ***Legújabb eredmények***

A bemutatott MISH módszerrel rendszeresen elemezzük Magyarország időjárását, éghajlatát, az éghajlat változékonyságát és változását az elmúlt hosszabb- rövidebb időszakokban. Az interpoláció segítségével vizsgáljuk például egy-egy szélsőséges időjárású nap vagy hónap meteorológiai paramétereinek térbeli eloszlását, de ugyanezzel a módszerrel készítünk sokévi átlagokból éghajlati térképeket is.

Az alábbiakban hazánk jelenlegi éghajlatának néhány hőmérsékleti és csapadék jellemzőjét mutatjuk be a mért adatok feldolgozása alapján (Lakatos M., Bihari Z., 2011).

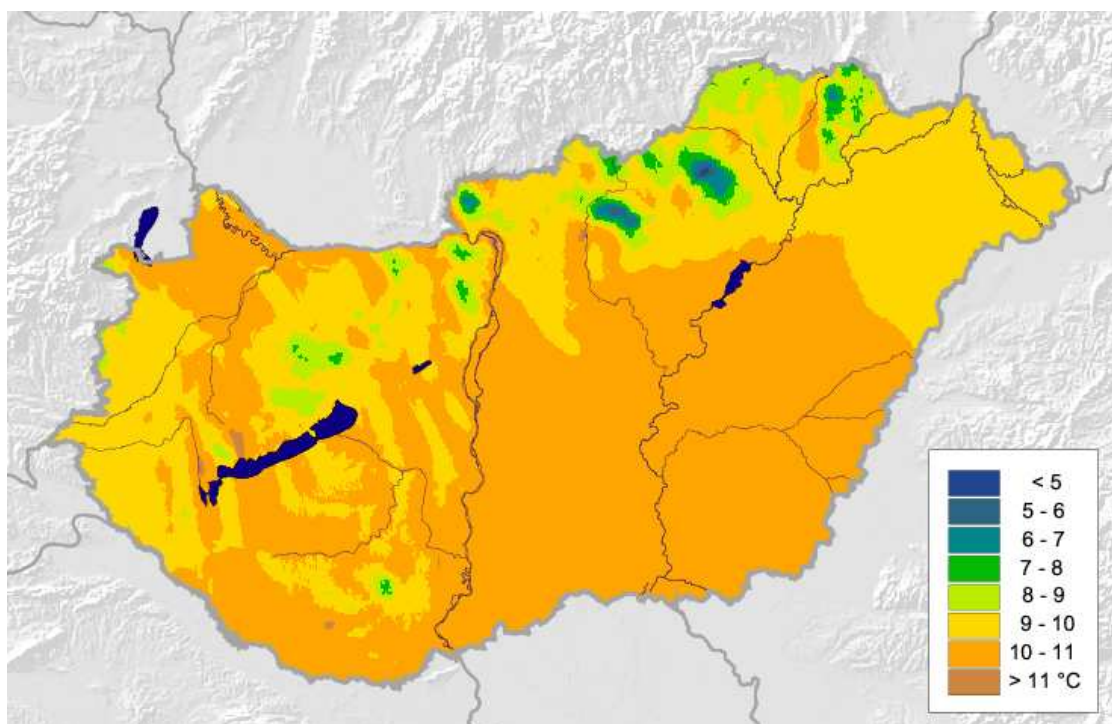
A vizsgálatokhoz havi középhőmérséklet és csapadék adatsorokat használtunk fel az 1971-2009, illetve az 1951-2009 időszakból. Az interpoláció előtt a MASH rendszerrel (Szentimrey, T., 1999) valamennyi adatsorra végrehajtottuk a homogenizálást, adatellenőrzést és szükség esetén a pótlást.

Az éghajlat állandóságának és változékonyságának szemléltetésére átlag- és változás térképeket egyaránt bemutatunk. Sokévi átlagon a legutóbbi teljes 30 év, az 1971-2000 közötti időszak átlagát értjük. A változás bemutatásakor a hőmérséklet esetében minimálisan 10, a sokkal változékonyságosabb csapadék esetében minimálisan 30 év alatt történő változásokat elemzünk.

### ***Az évi átlagos középhőmérséklet és változása***

Magyarország évi középhőmérséklete országos átlagban 10,0 °C az 1971-2000-es adatok alapján. A területi eloszlást (3. ábra) elsősorban a zonalitás és a domborzat határozza meg. Az ország legnagyobb része a 10-11 °C közötti évi középhőmérsékletű zónába tartozik,

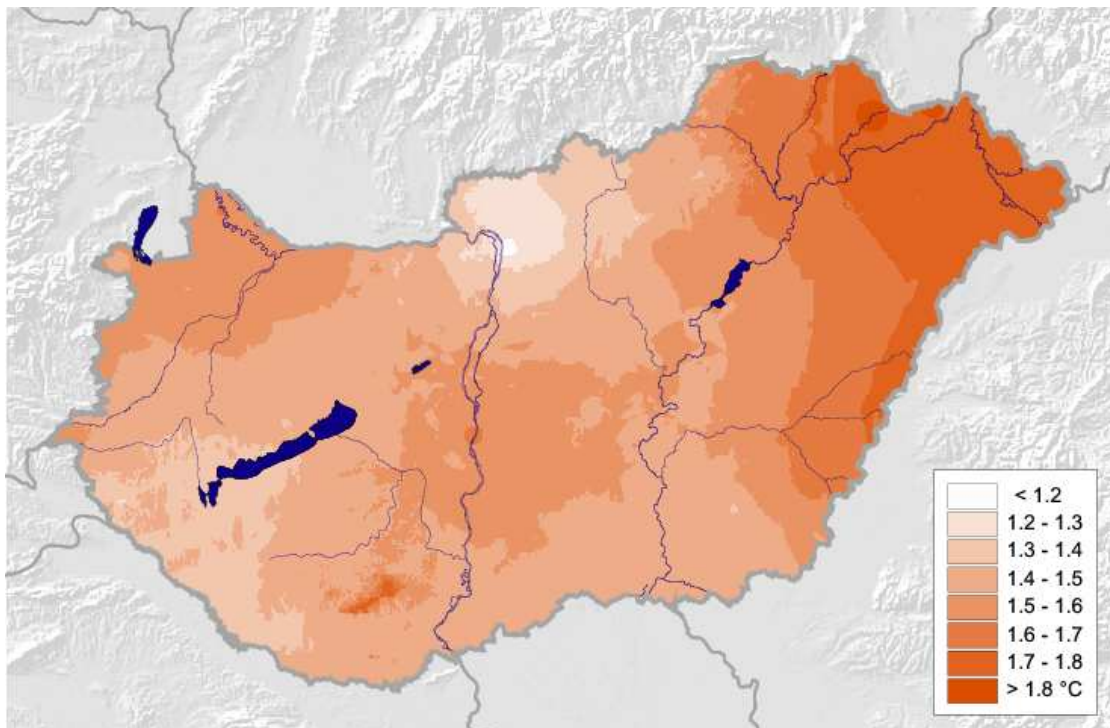
ugyancsak gyakori a 9-10 °C-os tartomány. Ezekről eltérő hőmérséklettel csak kisebb, elsősorban a domborzati tényezők által meghatározott területek rendelkeznek. A magasabban fekvő tájakon, valamint az északias lejtőkön 9 °C-nál alacsonyabb, a leghidegebb területeken, a Mátra és a Bükk térségében 5 °C alatti hőmérsékletek jellemzőek, míg a déli, délnyugati lejtőkön és a városhatás következtében Budapest körzetében 11 °C-nál melegebb régiók is megjelennek.



3. ábra. Az évi középhőmérséklet, 1971-2000

A hőmérséklet intenzív emelkedése a XX. század utolsó évtizedeiben kezdődött, a melegedés azonban nem egyenletes az ország különböző részein. A 4. ábrán a térbeli eltéréseket szemléltetjük, bemutatjuk az elmúlt 30 évben, 1980 és 2009 között bekövetkezett változásokat. Az értékek a 30 év alatti teljes változást jelzik, lineáris trendet feltételezve.

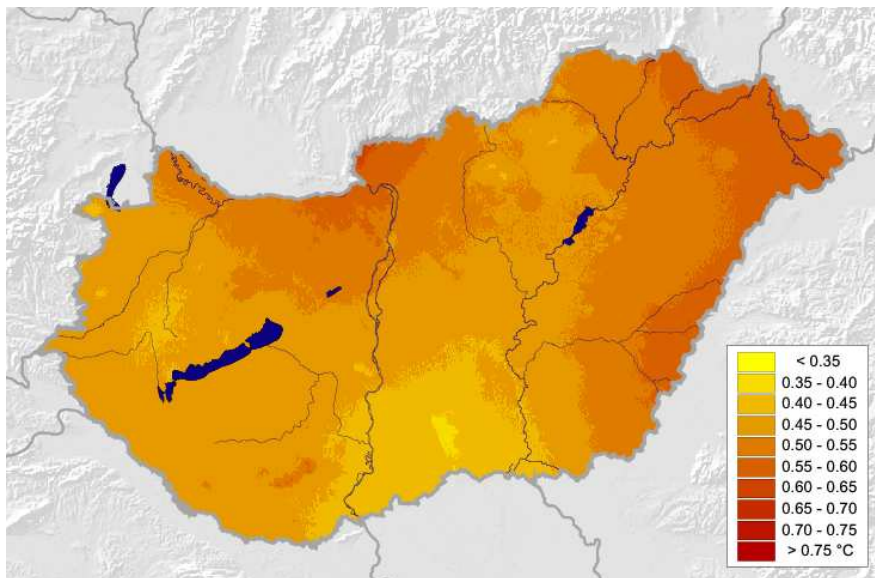
Az ország egész területén egyértelmű és 95%-os megbízhatósággal szignifikáns a növekedés, az évi középhőmérséklet országos átlagban 1,5 °C-ot emelkedett 1980 és 2009 között. A legalacsonyabb értékek is megközelítik a 0,5 fokot, a keleti, északkeleti országrészben fellépő legnagyobbak pedig kiterjedt területeken meghaladják az 1,7 °C-ot. Emellett az ország középső része és a Kisalföld is az átlagosnál jobban melegedett.



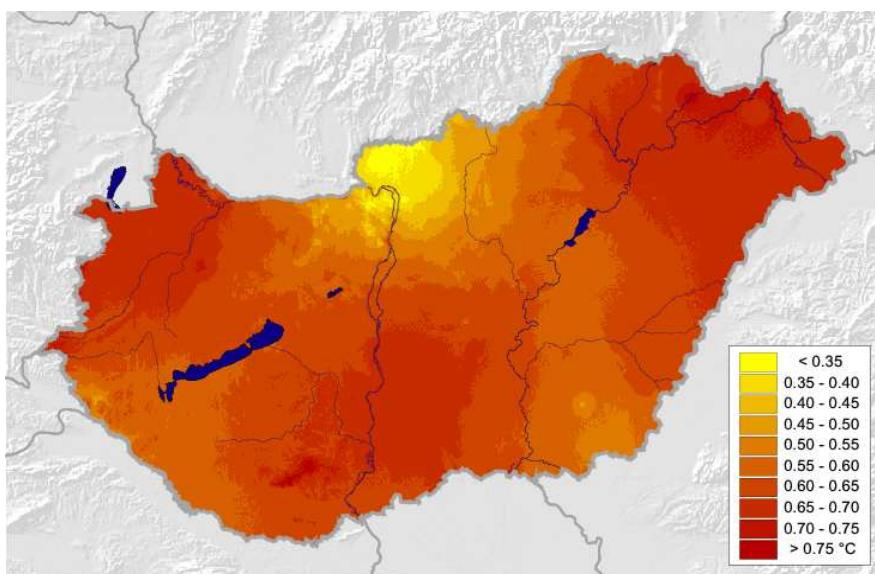
**4. ábra.** A középhőmérséklet változása 1980 és 2009 között (lineáris trend, °C/ 30 év)

Az előző ábrán egy 30 éves időszak egésze alatt bekövetkezett változást mutattuk be. Jól tudjuk azonban, hogy a változás nem egyenletes, melegebb és hűvösebb évek követik egymást.

Az 5-6. ábrákon a melegedés változó ütemét figyelhetjük meg azáltal, hogy az egymást követő évtizedek átlaghőmérsékletének különbségét elemezzük. Az 5. ábra az 1990-1999-es és az 1980-1989-es, míg a 6. ábra a 2000-2009-es és az 1990-1999-es évtizedek éves átlaghőmérsékletei közötti eltérést mutatja. Az ábrákról látható, hogy a melegedés mindkét periódusban egyértelmű, de mértéke és térbeli eloszlása különbözik. Országos átlagban az első időszakban 0,5 °C, míg a másodikban ennél magasabb, 0,6°C melegedést tapasztalhatunk, ami nem meglepő annak tudatában, hogy a 2000-2009-es évtized a legmelegebb 10 év a XX. század elejétől fogva Magyarországon és globálisan is. A térbeli eloszlásban is jelentős különbségeket figyelhetünk meg. Mindkét esetben jelentős a melegedés üteme a keleti, északkeleti országrészben, de a további maximumok elhelyezkedése már eltérő, az első időszakban a Duna-kanyar, a másodikban a Kisalföld és a Duna-Tisza közének déli része emelkedik ki. Nagyjából hasonló eloszlást figyelhetünk meg a legalacsonyabb értékek tekintetében is, csak az időszakok szerepe cserélődik meg.



**5. ábra.** Az 1990-1999-es és az 1980-1989-es évtized éves átlaghőmérsékletének különbsége

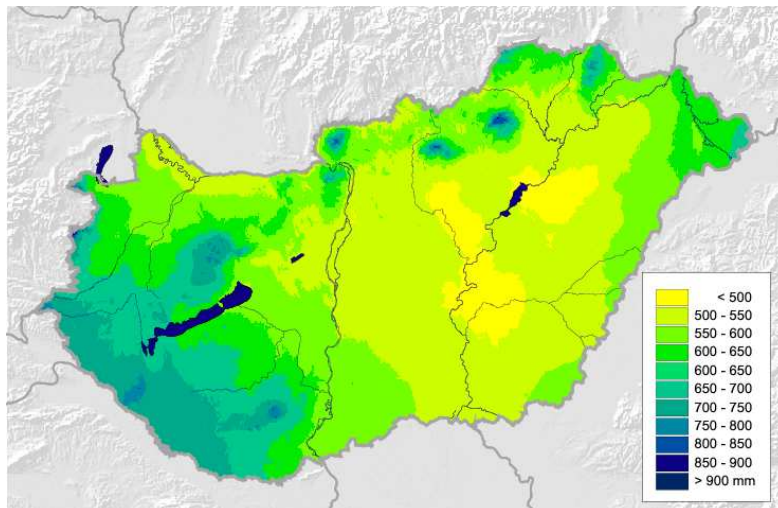


**6. ábra.** A 2000-2009-es és az 1990-1999-es évtized éves átlaghőmérsékletének különbsége

#### **Az éves csapadékösszeg és változása**

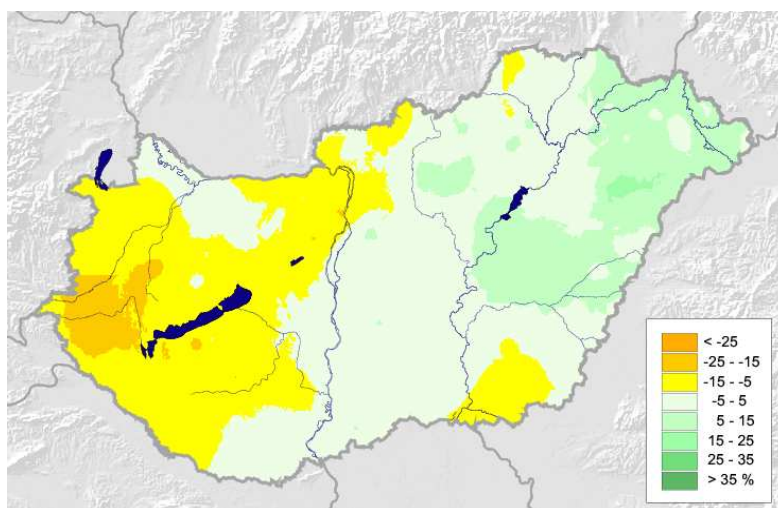
A csapadék területi eloszlását a tengerektől – elsősorban a Földközi-tengertől – való távolság és a domborzat határozza meg. Az 1971-2000-es normálérték 560 mm körüli (7. ábra). A legszárazabb alföldi területeken 500 mm alatti, míg a délnyugati határszélen és a Bakony térségében 700 mm fölötti összegek jellemzők. Ennél magasabb, 800 mm-t

meghaladó értékek csak kis foltokban, a Mátra és a Bükk csúcsai közelében, valamint a Kőszegi-hegységben jelennek meg.



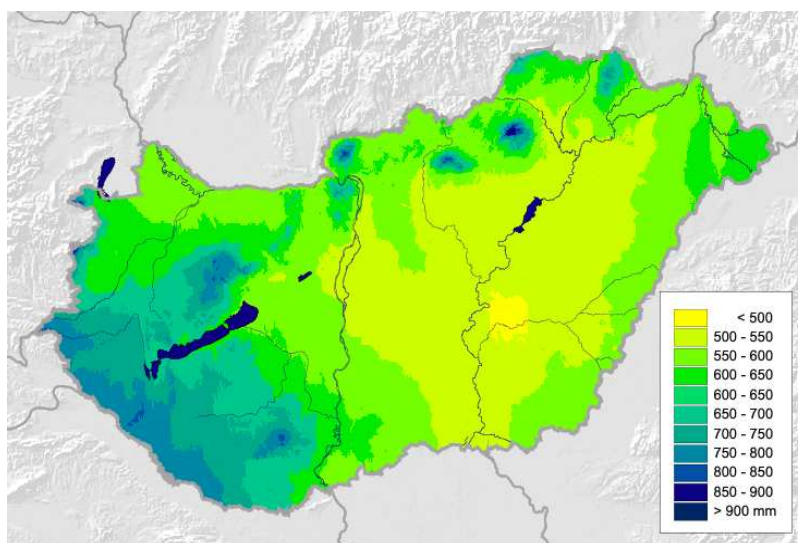
7. ábra. Az éves csapadékösszeg, 1971-2000

A csapadék térben és időben nagyon változékony, így – az éghajlatváltozás hatására bekövetkező – tendenciákat nehezebb kimutatni, mint a hőmérséklet esetén. Míg az évi középhőmérséklet az elmúlt 30 évben egyértelmű, szignifikáns növekedést mutat, addig a csapadék változása még a hosszabb, 50 évet felölelő időszakban sem mutatható ki egyértelműen, 95%-os megbízhatósággal. A térbeli eltéréseket trendtérképen szemléltetjük. Az elmúlt 50 évben, 1960 és 2009 között bekövetkezett éves változásokat bemutató térkép (8. ábra) az exponenciális trendillesztésből adódó 50 év alatti teljes változást jelzi. Az éves trend országos átlagban kismértékű, 1,7%-os csökkenést eredményez, a csökkenés a Dunántúlon az átlagosnál jelentősebb, míg az ország északkeleti részén növekedés tapasztalhatunk.

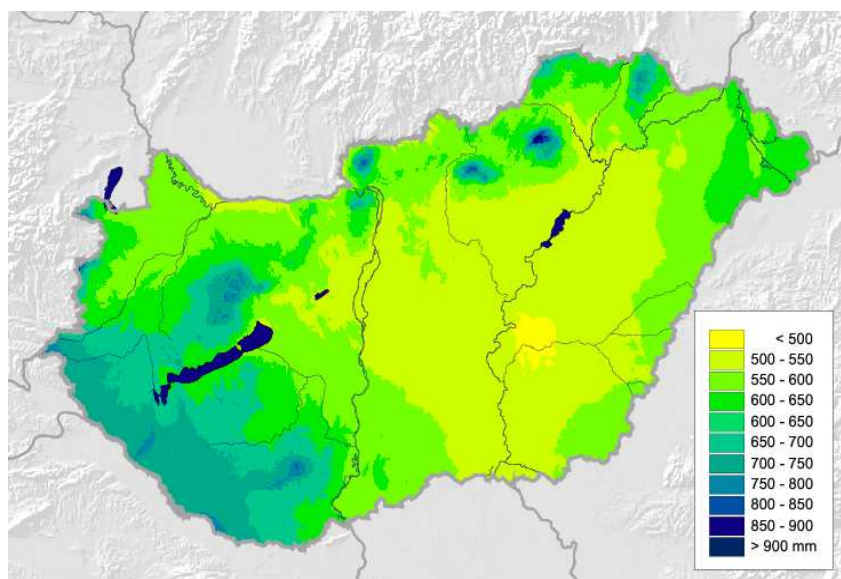


8. ábra. A csapadékösszeg változása 1960 és 2009 között (exponenciális trend, %/ 50 év)

Ahogy a hőmérséklet esetében is megvizsgáltuk, hogy az elmúlt időszak különböző szakaszaiban milyen ütemű volt a változás (5-6. ábra), úgy a csapadékváltozás elemzésénél is felbontottuk a vizsgált elmúlt 50 évet rövidebb periódusokra. A hőmérséklet esetében évtizedeket vizsgáltunk, a csapadék változékonysága miatt azonban a változás ütemét két, 10 évvel elcsúsztatott 40 éves periódus átlagértékeivel jellemezzük. A 9-10. ábrákon az 1960-1999, illetve az 1970-2009-es időszakok átlagos éves csapadékösszegét láthatjuk. Az országos átlag 10 mm-rel különbözik egymástól a két időszakban (1960-1999 között 597 mm, 1970-2009 között 587 mm), aminek az a fő oka, hogy a Dunántúlon, de leginkább a délnyugati országrészben a csapadék mennyisége jelentős mértékben csökkent, a 750 mm feletti csapadéku területek a második időszakra szinte teljesen eltűntek.



9. ábra. Az éves csapadékösszegek átlaga 1960-1999 között



10. ábra. Az éves csapadékösszegek átlaga 1970-2009 között



## *Tervek*

Az előző fejezetben legfrissebb eredményeinket mutattuk be, az alábbiakban röviden kitérünk terveinkre, az előttünk álló feladatokra.

Az Európai Unió Közös Kutatóközpontja (Joint Research Centre) 2010-ben kiírt egy tendert, melynek célja a Kárpát-régió digitális klímaatlaszának létrehozása az 1971-2000 közötti időszakra. A tendert az OMSZ vezette konzorcium nyerte meg, 9 ország vesz részt benne. A tender eredményeképpen közel 40 meteorológiai paraméterre és indexre készül rácsponti adatbázis.

Bár a Kárpát-régióra készülő klímaatlasz az 1971-2000-es bázisidőszakot fogja elemezni, felmerült az igény, hogy készítsük el a lezáruló 1981-2010-es 30 év elemzését is, vagyis készítsünk új magyar éghajlati atlaszt. E feladatot is szeretnénk megvalósítani az elkövetkező 1-2 év alatt.

## *Irodalomjegyzék*

- Benichou, P. és Le Breton, O., 1987: Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. La Météorologie 7e série, n 19
- Lakatos M., Bihari Z., 2011: A közelmúlt megfigyelt hőmérsékleti- és csapadéktendenciái, in Klímaváltozás – 2010, Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére (szerk: Bartholy et al, megjelenés alatt)
- Szentimrey, T., 1999: Multiple Analysis of Series for Homogenization (MASH), Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data, Budapest, Hungary; WMO, WCDMP-No. 41, pp. 27-46.
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007a: Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis), Proceedings from the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology, Budapest, Hungary, 2004, COST Action 719, COST Office, 2007, pp. 17-27
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007b: Manual of interpolation software MISHv1.02, Hungarian Meteorological Service, p. 32

# Hazai megfigyelt hőmérsékleti és csapadék tendenciák, szélsőségek alakulása a múlt század elejétől

Lakatos Mónika

Országos Meteorológiai Szolgálat  
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1., email: lakatos.m@met.hu

**Összefoglaló** – Éghajlati, különösen éghajlatváltozással kapcsolatos vizsgálatokhoz hosszú, jó minőségű, ellenőrzött, térben és időben egyaránt reprezentatív adatsorok szükségesek. A változó mérési körülmények, például az állomások áthelyezése, a mérési idő megváltozása vagy műszercsere inhomogenitást, indokolatlan törést eredményeznek az idősorban.

A hazai tendencia elemzésekhez az OMSZ elektronikus adatbázisában fellelhető, a teljes 20. századot napjainkig átölelő hőmérsékleti és csapadék idősorokat használtunk. A trendbecslést és a szignifikancia vizsgálatot minden esetben megelőzte a MASH (Szentimrey, 1999) homogenizálási eljárás alkalmazása. A lineáris trendbecslést konfidencia intervallumok megadásával egészítettük ki, ami a változás mértékét magas megbízhatósággal bizonyos határok közé szorítja. Fontos megjegyezni, hogy az éves és évszakos változások becsléséhez az országos átlagokat rácsponti értékek átlagaként értelmeztük, így elkerülhető az állomások számától és helyzetétől való függés. Az állomási sorok rácsponti értékeit a MISH (Szentimrey, Bihari, 2007) interpolációs módszerrel számoltuk, ami kifejezetten meteorológiai elemek interpolációjára alkalmas.

A hőmérsékleti és csapadék szélsőségek tendenciáit a klímaváltozás detektálása céljából definiált extrém klímaindexek idősorainak elemzésén keresztül mutatjuk be. A klíma megváltozása során a szélsőértékek valószínűségi eloszlása megváltozik, az eloszlásfüggvény paraméterei eltolódnak. Ezt Budapest-Belterület állomáson rögzített maximumhőmérsékletek szélsőértékeinek alakulásával szemléltetjük.

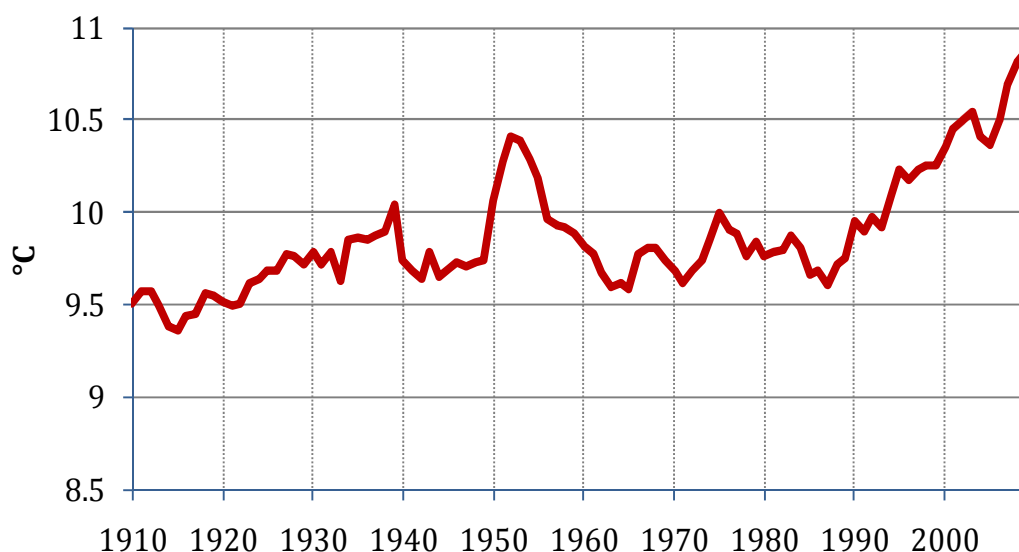
## Bevezetés

A jelen és a közelmúlt éghajlatának megismerése, a változás, változékonyság számszerűsítése meteorológiai mérések, megfigyelések elemzésével lehetséges. Az éghajlati adatbázis forrása a meteorológiai mérőállomások hálózata, ami hazánkban sokáig folyamatosan bővült, majd az utóbbi tizenöt évben az automatizálás során jelentősen átalakult. Az OMSZ klimatológiai adatbázisa ennek megfelelően a mérések kezdetétől felhalmozott, jellegében és minőségében folyamatosan változó adatokat tartalmaz, emiatt az adatok ellenőrzése, az inhomogenitások kiszűrése elengedhetetlen ahhoz, hogy megbízható eredményekre jussunk a tendencia elemzések során. A globális éghajlati adatsorokat előállító központok is egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a tudományosan megalapozott homogenizációs és interpolációs eljárások alkalmazására.

Magyarország elmúlt több mint egy évszázadának hőmérsékleti és csapadék tendenciáit statisztikai klimatológiai eszközökkel elemeztük. Vizsgálatainkat havi és napi, hőmérsékleti (közép, minimum, maximum), illetve csapadékösszeg adatsorok alapján végeztük el. A MASH (Multiple Analysis of Series for Homogenization) rendszerrel valamennyi adatsorra végrehajtottuk a homogenizálást, adatellenőrzést és szükség esetén a pótlást. Az országos átlagok idősorait a MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis) módszerrel kapott rácsponti adatsorok átlagaként számoltuk. Ily módon az adatoknak egy jó minőségű, térben és időben reprezentatív rendszeréhez jutottunk.

### *A megfigyelt hőmérsékleti tendenciák*

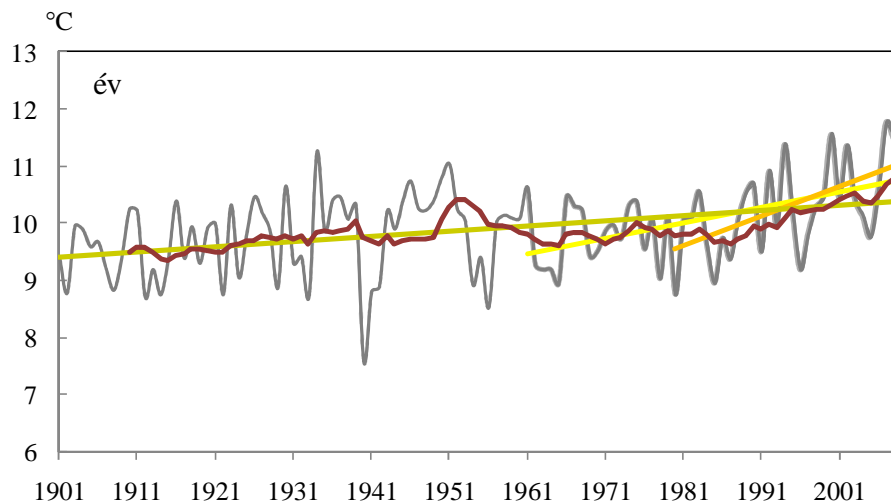
Az 1990-2009 közötti tíz év volt a legmelegebb dekád a mérések kezdete óta globálisan és Magyarországon is (1. ábra). A melegedés a minimum- és maximumhőmérsékletek emelkedésében egyaránt megmutatkozik. Az évek folyamán sorra dőltek meg az eddigi hőmérsékleti rekordok. A 2000-es év 2007-ig tartotta első helyét, 2007-ben új abszolút hőmérsékleti rekord is született Magyarországon, Kiskunhalason július 20-án 41,9 °C-ot mértek.



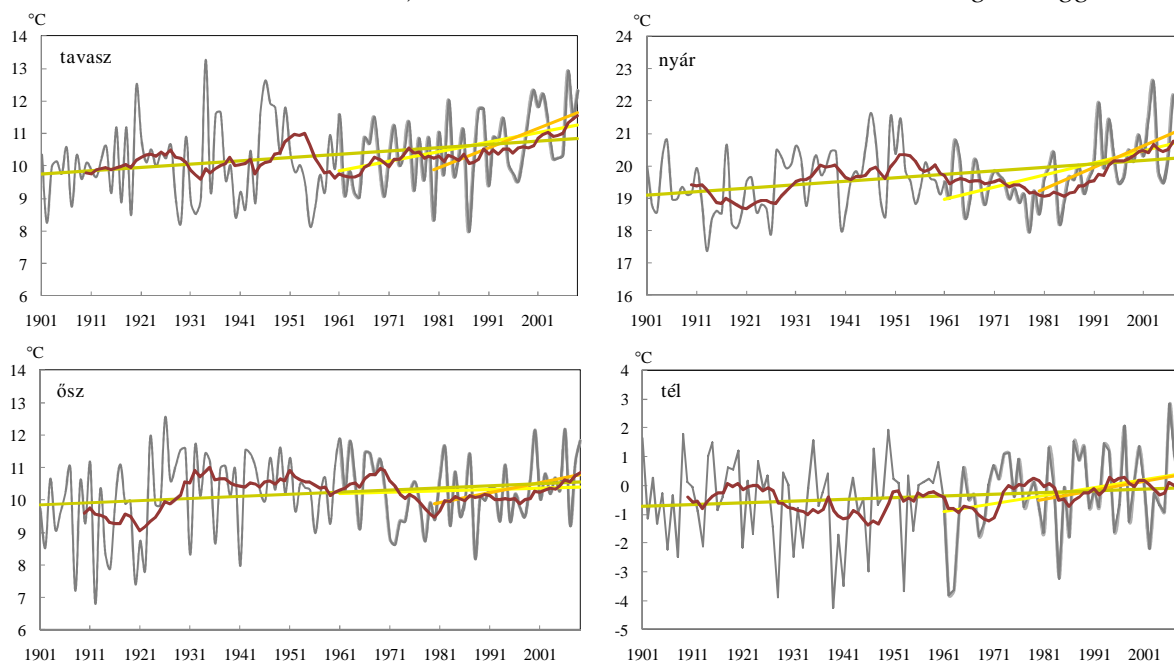
**1. ábra.** A dekádátlagok alakulása az 1901-2009 időszakban

A magyarországi hőmérsékleti idősorok jellemzői jól illeszkednek a hőmérséklet globális tendenciáihoz, a kisebb terület miatt azonban a változékonyság nagyobb. A 2. ábrán az éves, a 3. ábrán pedig az évszakos középhőmérsékletek alakulását követhetjük nyomon.

A trendillesztést három, részben átfedő időszakra mutatjuk be az idősor ábrákon. A múlt század elejétől napjainkig, a hatvanas évek kezdetétől napjainkig, valamint a legutóbbi harminc évre, 1980-2009 között. A teljes idősoron kimutatható szignifikáns változások kétséget kizáróan az éghajlat megváltozását jelzik. A második, 1960-2009 közötti időszak bemutatását az indokolja, hogy az IPCC AR4 (2007) Döntéshozói Összefoglalóban megjelent megállapítások egy része döntően a hatvanas évektől kezdődően fogalmaz meg állításokat a megfigyelt tendenciákra vonatkozóan és ezeknek az állításoknak az igazolását is megkíséreltük, különös tekintettel az extrémumokra. A harmadik, 1980-tól napjainkig tartó periódus pedig a legintenzívebb melegedés korszaka, a jelen éghajlatot és a változás sebességét leginkább ezzel tudjuk jellemezni.



**2. ábra.** Országos éves középhőmérséklet a három különböző időszakhoz (1901-2009, 1960-2009 és 1980-2009) illesztett lineáris trenddel és a tízéves mozgó átlaggal



**3. ábra.** Országos évszakos középhőmérsékletek a három különböző időszakhoz (1901-2009, 1960-2009 és 1980-2009) illesztett lineáris trenddel és a tízéves mozgó átlaggal

A lineáris trendillesztés szerint az országos, évi középhőmérséklet emelkedése  $0,99\text{ }^{\circ}\text{C}$  a múlt század elejétől 2009-ig. E melegedés, a becslés 95%-os megbízhatósági tartományának alsó határát tekintve legalább  $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a felső határ pedig  $1,36\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

A tavasz hőmérséklete 1971 és 2000 között  $10,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A tavaszi középhőmérsékletek az évi középhez hasonló mértékben,  $1,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal emelkedtek a teljes elemzett időszoron. Ha

csak a legutóbbi 30 évet tekintjük, akkor elmondhatjuk, hogy a tavaszi középhőmérséklet jelentősen, 1,75 °C-kal nőtt 95%-os bizonyossággal.

A melegedési tendenciát leginkább a nyarak hőmérséklete tükrözi, a múlt század elejétől napjainkig az emelkedés 1,17 °C-ot tesz ki. A nyarak átlaghőmérséklete 1971-2000 között 19,7 °C. Az utóbbi évtizedben is előfordult egy-egy hűvösebb nyár, de az alacsony értékek inkább a század első felét jellemezték. A legutóbbi harminc évben pedig csaknem 2 °C-ot emelkedett a nyári középhőmérséklet.

Az őszi országos átlaghőmérséklete 9,9 °C. A múlt század közepén előfordult meleg őszyök hatására, a trendérték itt alacsonyabb a XX. század elejétől tekintve, mint a többi évszakban. A lineáris melegedés 0,68 °C, már eléri a 95%-os megbízhatóság szintjét. Az utóbbi 30 év őszeinek változása ugyan jelentős, de nem egyértelmű.

A téli középhőmérséklet az 1971-2000-es normál időszakban 0,0 °C-nak adódik. A telek hőmérséklete 1901-óta 0,65 °C-kal nőtt, ám ez a változás statisztikai szempontból nem szignifikáns, és a legutóbbi 30 tél sem mutat egyértelmű változást, noha a tendencia pozitív.

Ha a hatvanas évektől, az 1. táblázatban foglaltak szerint 1961-től, tekintjük a változásokat, akkor ezen időszakban a tavasz és a nyár a teljes időszakhoz hasonlóan alakult. A legutóbbi harminc évben a telek melegedése az időszakot bevezető hideg teleknek köszönhetően országos átlagban számottevő volt. Az őszyök változása elenyésző ebben a periódusban.

**1. táblázat.** Az átlaghőmérséklet változásának becslése az 1901-2009, 1961-2009 illetve az 1980-2009 időszakokra a 95%-os megbízhatósági intervallum alsó és felső határával. A szignifikáns változást kiemelés jelöli.

Országos átlaghőmérséklet változás			
1901-2009			
	változás °C	alsó határ °C	felső határ °C
tavaszi	<b>1,08</b>	<b>0,48</b>	<b>1,69</b>
nyár	<b>1,17</b>	<b>0,67</b>	<b>1,66</b>
ősz	<b>0,68</b>	<b>0,06</b>	<b>1,29</b>
tél	0,65	-0,12	1,41
év	<b>0,99</b>	<b>0,61</b>	<b>1,36</b>
1961-2009			
	változás °C	alsó határ °C	felső határ °C
tavaszi	<b>1,42</b>	<b>0,45</b>	<b>2,39</b>
nyár	<b>1,79</b>	<b>1,00</b>	<b>2,59</b>
ősz	0,19	-0,75	1,13
tél	<b>1,35</b>	<b>0,08</b>	<b>2,62</b>
év	<b>1,30</b>	<b>0,70</b>	<b>1,90</b>
1980-2009			
	változás °C	alsó határ °C	felső határ °C
tavaszi	<b>1,75</b>	<b>0,67</b>	<b>2,84</b>
nyár	<b>1,93</b>	<b>1,06</b>	<b>2,79</b>

ősz	0,89	-0,03	1,82
tél	0,90	-0,48	2,28
év	<b>1,51</b>	<b>0,85</b>	<b>2,16</b>

### *A megfigyelt csapadék tendenciák*

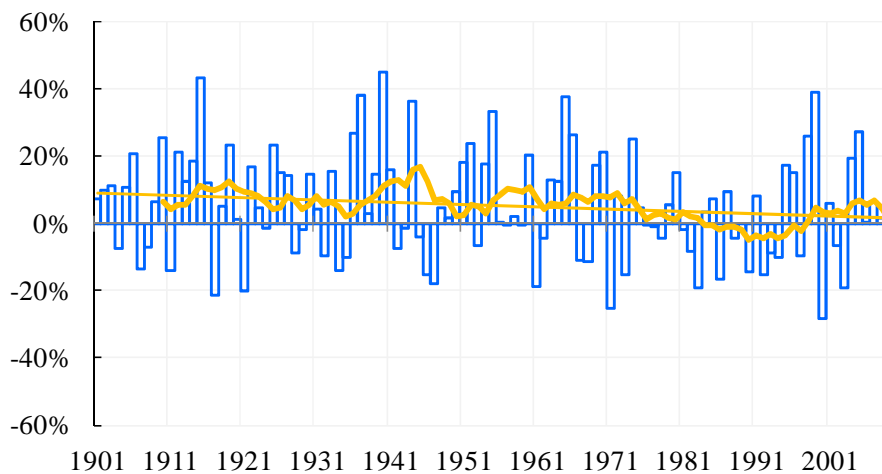
Magyarországon a csapadék térben és időben egyaránt változékony éghajlati paraméter. Míg Észak- és Nyugat-Európában a melegedési tendenciával együtt egyre több csapadék hullik, addig nálunk a Földközi-tenger térségéhez hasonlóan egyre kevesebb.

A 4. ábrán az országos éves csapadékmennyiség 1971-2000 időszak sokéves átlagához viszonyított relatív eltéréseinek idősorát láthatjuk 1901 és 2009 között. A bemutatott országos átlagok a csapadéknál is minden esetben homogenizált, rácsponti értékek átlagai.

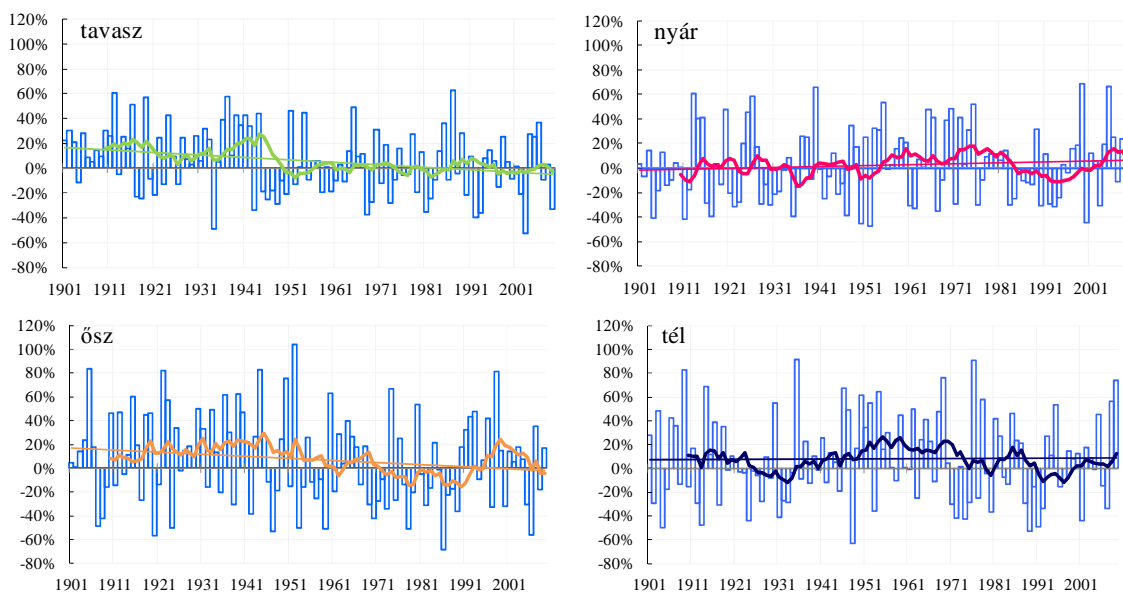
### *Az éves és évszakos csapadékösszegek alakulása*

Az éves összeg átlagosan 568 mm hazánkban az 1971-2000-es normál időszakot tekintve. Évszakos skálán tavasszal átlagban 136 mm, nyáron 189 mm, ősszel 139 mm, télen 105 mm csapadék hullik. Az évszakos összegek országos átlagainak anomáliái az 5. ábra oszlopdiagramjain követhetők nyomon. A csapadék esetében is igaz, hogy minél nagyobb területi és időbeli átlagolást végzünk, annál kiegyensúlyozottabb képet kapunk, s emiatt az évszakokat bemutató grafikonok lényegesen nagyobb változékonyságot mutatnak, mint az éves.

Magyarországon a csapadék éves mennyisége csökken (4. ábra). Csapadékos évek inkább a múlt század első felében léptek fel, a csökkenés 1901-től 7%-os. Ezzel a tendenciával hazánk a dél-európai térséghez hasonló viselkedést mutat a csapadékváltozás terén. A legnagyobb mértékű csökkenés az évszakok közül tavasszal következett be, közel 20% a teljes elemzett idősoron. A száraz nyarak előfordulása viszonylag egyenletes, ami azt mutatja, hogy az aszály hazánk éghajlatának rendszeres velejárója. A nyári csapadék nem szignifikánsan, de növekszik a vizsgált időszakban, az ősszel lehullott csapadék mennyisége viszont 17%-kal kevesebb lett az utóbbi évek száraz őszeinek köszönhetően. A téli csapadék kis növekedést mutat, hatékonysága azonban mezőgazdasági szempontból gyengül, mivel a felszínre érkező csapadék egyre gyakrabban eső formájában hullik, ami kevésbé szivárog be a talajba, mint a lassan olvadó hó. Ezzel a tendenciával ellentétesnek tűnnek az utóbbi évek havas telei.



**4. ábra.** Az évi csapadékösszegek országos átlagainak anomáliái az 1901-2009 időszakban a tízéves mozgó átlaggal és a trenddel. A százalékban kifejezett relatív eltéréseket az 1971-2000-es átlaghoz viszonyítottuk.



**5. ábra.** Az évszakos csapadékösszegek országos átlagainak anomáliái az 1901-2009 időszakban a tízéves mozgó átlaggal és a trenddel. A százalékban kifejezett relatív eltéréseket az 1971-2000-es átlaghoz viszonyítottuk.

A tendenciákat bemutató elemzéseket két időszakra végeztük el, a múlt század elejétől napjainkig, 1961-től 2009-ig és a legutóbbi harminc évre. Az erős változékonyság miatt a hosszabb, majd fél évszázados időszak alatt megfigyelt változások jobban leírják a csapadék változásokat, mint a legutóbbi harminc év trendjei, de ezek sem mutatnak szignifikáns változást. A csapadékváltozásokat jobban szemlélteti a százalékos változás, mint a lineáris közelítésből adódó, milliméterben kifejezett csökkenés, illetve növekedés. A

százalékos változás becslésére az exponenciális közelítés ajánlott, ezért a csapadék esetén exponenciális trendet illesztettünk az idősorokhoz.

A százalékos változásokat tartalmazó 2. táblázat csak hosszú időszoron jelez statisztikailag szignifikáns változást. Országos átlagban tavasszal a múlt század elején tapasztalt csapadékmennyiségnek csupán a 80%-a hullik jelenleg. A rövidebb időszak rendkívül változatos képet mutat mind a tendenciák előjelét, mind pedig a mértékét tekintve. A hőmérséklettel ellentétben a csapadék tendenciák nem egyértelműek a jelenhez közelítve.

**2. táblázat.** A csapadékmennyiség változásának becslése különböző időszakokra országosan exponenciális trend illesztésével. A 95%-os megbízhatóságú változást kiemelés jelöli.

	1901-2009	1961-2009	1980-2009
<b>tavas</b>	<b>-19,8</b>	-5,3	-3,7
<b>nyár</b>	8,9	2,1	22,0
<b>ősz</b>	-16,6	3,1	7,1
<b>tél</b>	1,4	-2,9	21,3
<b>év</b>	-7,0	-0,3	10,3

### A szélsőségek alakulása

A szélsőértékek intenzitásában, gyakoriságában megmutatkozó tendenciák a változó éghajlat jelei. Extrém klímaindexek sorát dolgozták ki a WMO-CCL/Clivar munkacsoportban már 1998-ban, a klímaváltozás detektálása céljából. Ezeknek az indexeknek a sora folyamatosan bővül a szélsőértékek viselkedésének pontosabb megismerése céljából. Nemcsak maguk a hőmérsékleti értékek, hanem a belőlük származtatott egyéb paraméterek, különböző indexek is szolgáltatnak értékes információkat a klíma megváltozására vonatkozóan. Ezeket az úgynevezett klímaindexet használtuk azoknak az állításoknak az igazolására, melyeket az IPCC AR4 Döntéshozói Összefoglalója fogalmaz meg (6. ábra).

Jelenség és a trend iránya	A trend előfordulásának valószínűsége a 20. század második felében (jellemzően 1960 után)	Emberi tényezők hozzájárulásának valószínűsége a megfigyelt trendhez	A jövőbeli trendek valószínűsége a 21. századi előrebecslések alapján az SRES forgatókönyvek felhasználásával
Melegebb és kevesebb hideg nappalok és éjszakák	<b>Nagyon valószínű</b>	<b>Valószínű</b>	<b>Magas</b>



Melegebb és gyakoribb forró nappalok és éjszakák	<b>Nagyon valószínű</b>	<b>Valószínű</b>	<b>Magas</b>
Meleg időszakok /hőhullámok gyakorisága növekszik	<b>Valószínű</b>	<b>Valószínűbb, mint nem</b>	<b>Magas</b>
Nagy csapadékot adó események gyakorisága, vagy a nagy esőzésekből származó csapadék részaránya nő	<b>Valószínű</b>	<b>Valószínűbb, mint nem</b>	<b>Magas</b>
Az aszály által sújtott terület nő	<b>Valószínű</b>	<b>Valószínűbb, mint nem</b>	<b>Helyenként magas</b>

**6. ábra.** A 20. század második felében egyértelmű trendet mutató extrém időjárási események közelmúlt trendjei (DÖ-2. táblázat Éghajlatváltozás 2007)

### **A hőmérsékleti szélsőségek tendenciái**

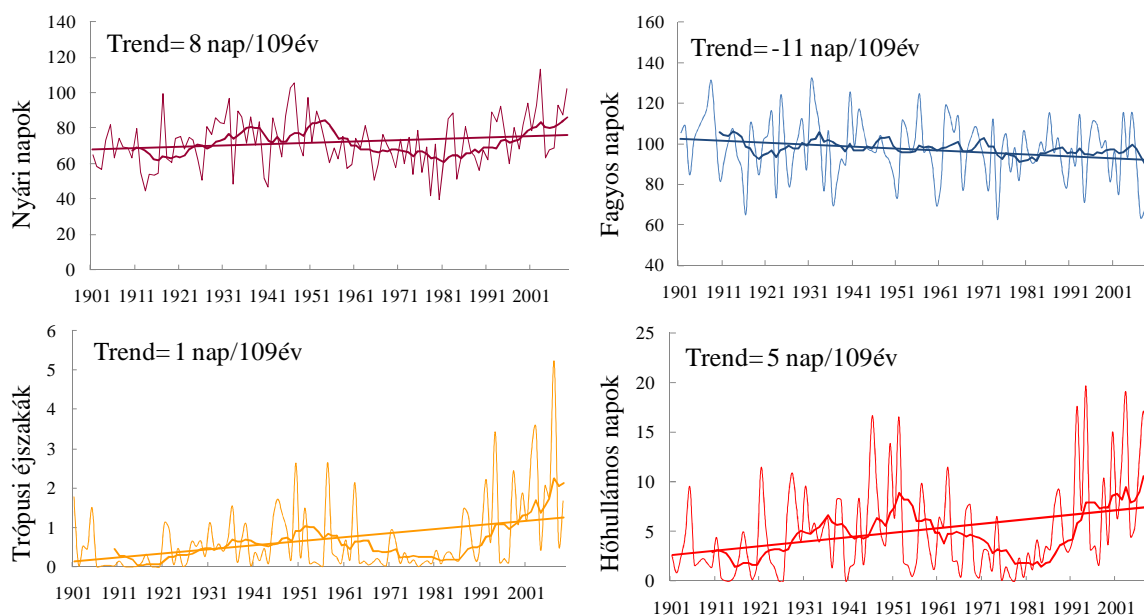
Az extrém klímaindexek jellemzően valamilyen fix vagy percentilis küszöb átlépéséhez köthető paraméterek, tartamok, adott időszakra vonatkozó szélsőértékek. Ilyen indexekkel jellemezzük például a hőhullámokat, vagy ilyen paraméter a fagyos napok éves száma is, amikor a napi minimumhőmérséklet legfeljebb 0 °C. A 3. táblázatban felsorolt indexeket választottuk ki a szakirodalomban fellelhető számos index közül a hazai hőmérsékleti szélsőségek megfigyelt tendenciáinak jellemzésére.

### **3. táblázat. Néhány extrém hőmérsékleti klímaindex**

<b>Extrém hőmérsékleti klímaindexek</b>		
<b>Meghatározása, jele</b>	<b>Definíciója</b>	<b>Mértékegység</b>
Nyári napok száma (TX25)	napi maximum > 25 °C	nap
Fagyos napok száma (DTN0)	napi minimum < 0 °C	nap
Forró napok száma (TX30)	napi maximum ≥30 °C	nap
Trópusi éjszakák (TN20)	napi minimum ≥20 °C	nap
Hőhullámos napok száma (TA25)	napi középhőmérséklet > 25 °C	nap
Meleg hullám (HWDI)	leghosszabb, legalább 5 napos időszak, amikor napi maximum > 1961-90-es normál	nap
Hideg nappalok (TX10p)	napi maximum < a hozzá tartozó 1961-1990-es 10%-os percentilis	%
Meleg nappalok (TX10p)	napi maximum > a hozzá tartozó 1961-1990-es 90%-os percentilis	%

Hideg éjszakák (TN10p)	napi minimum < a hozzá tartozó 1961-1990-es 10%-os percentilis	%
Meleg éjszakák (TN90p)	napi minimum > a hozzá tartozó 1961-1990-es 90%-os percentilis	%
Átlagos napi hőingás (DIUR)	napi maximum és minimum különbsége	°C

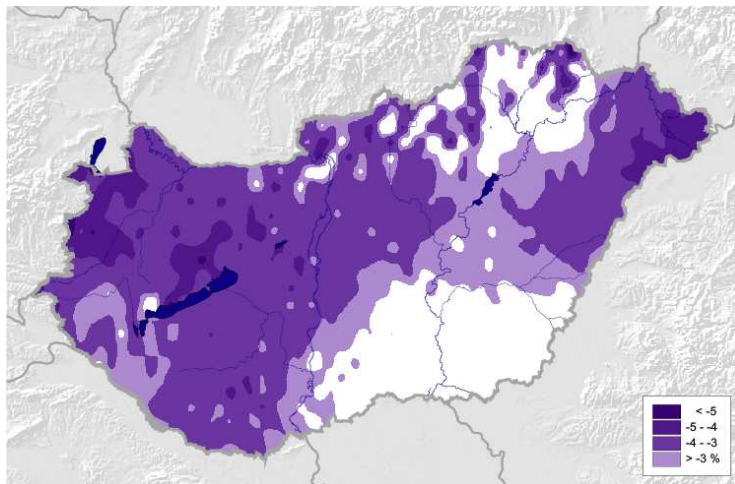
A hőmérsékleti indexek számítása hosszú, napi szélsőérték idősorok alapján történik. Az esetleges adathibák és inhomogenitások kiszűrése, korrekciója, a hiányok pótlása minden esetben megelőzte elemzéseinket. Az országos átlagok és a térbeli tendenciák jellemzésére előállítottuk a napi minimum-, maximum- és középhőmérséklet, valamint az ezekből származtatott extrém indexek rácsponti idősorait egy közel 10 km-es felbontású rácshálóra, az 1901-2009 időszakra. A 7. ábra grafikonjai az átlagos melegedési tendenciával összhangban a meleg szélsőségek gyakoribbá válását jelzik országos átlagban 1901-től. A nyári napok, a trópusi éjszakák és a hőhullámos napok számának növekedése, a fagyos napok számának csökkenése egyaránt a melegedő tendenciát erősíti. Ez a tény a 6. ábra meleg szélsőségekre vonatkozó állításait igazolja hazánk területén a múlt század második felétől, a nyolcvanas évektől pedig szembetűnő az extrém meleg időjárási helyzetek gyakoribbá válása.



**7. ábra.** Néhány extrém hőmérsékleti klímaindex időszora (hazai rácspontok átlaga alapján) a tízéves mozgó átlaggal és a becsült lineáris trenddel, 1901-2009

A napi maximum- és minimumhőmérsékletek rácsponti adatbázisán egy, az egész országot lefedő rácshálózaton is elvégeztük a hőmérsékleti szélsőségek elemzését. Az állomási sorokon megvalósított tendenciaelemzésekkel megegyező módon elemeztük a változásokat a rácsponti idősorokon is. A rácsponti trendeket térképen megjelenítve a

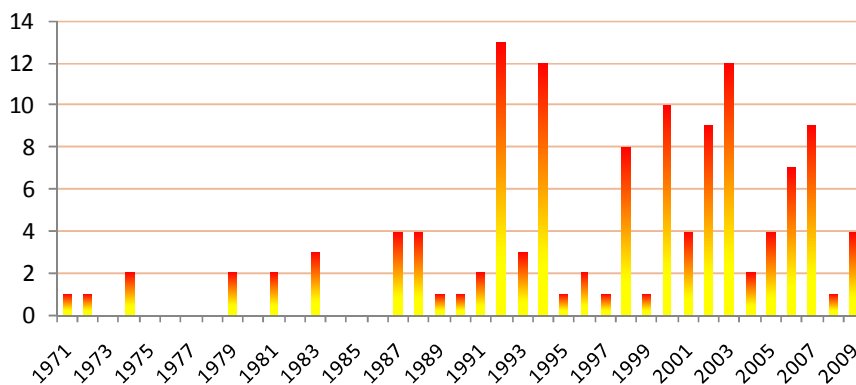
változás területi eloszlásáról is képet kaphatunk. A fagyos napok változását és annak megbízhatóságát mutatja a 8. ábrán látható térkép.



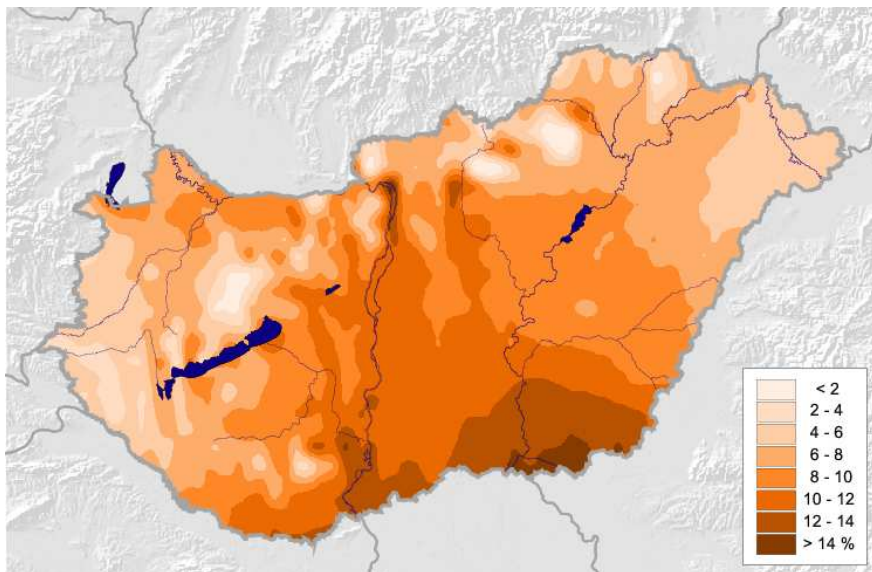
**8. ábra.** A fagyos napok változása az 1961-2009-es időszakban a rácsponti trendbecslés alapján. A fehérre színezett területen a fagyos napok csökkenése 95%-os megbízhatósági szinten nem szignifikáns.

A jelenhez közelítve egyre több hóhullámos időszakot kell leszenvednünk, ahogy ez a Pestszentlőrinci megfigyelésekből is kitűnik (9. ábra). A gyakoribb hóhullámok különösen a középső és délkeleti régiókat sújtják a hatvanas évektől (10. ábra).

**A 27°C -ot elérő középhőmérsékletű napok száma évente  
Budapest-Pestszentlőrinc, 1971-2009  
1971-2000-es átlag 3,2 nap**



**9. ábra.** A hőségriasztás 2. fokozatának megfelelő középhőmérsékletű időszakok alakulása 1971-től



**10. ábra.** A hóhullámos napok (napi átlag eléri a 25°C-ot) számának %-os változása, 1961-2009

Összességében tehát elmondhatjuk, hogy a meleg szélsőségek növekedési tendenciájára vonatkozó állítások érvényesek térségünkben.

#### **A csapadék szélsőségek alakulása**

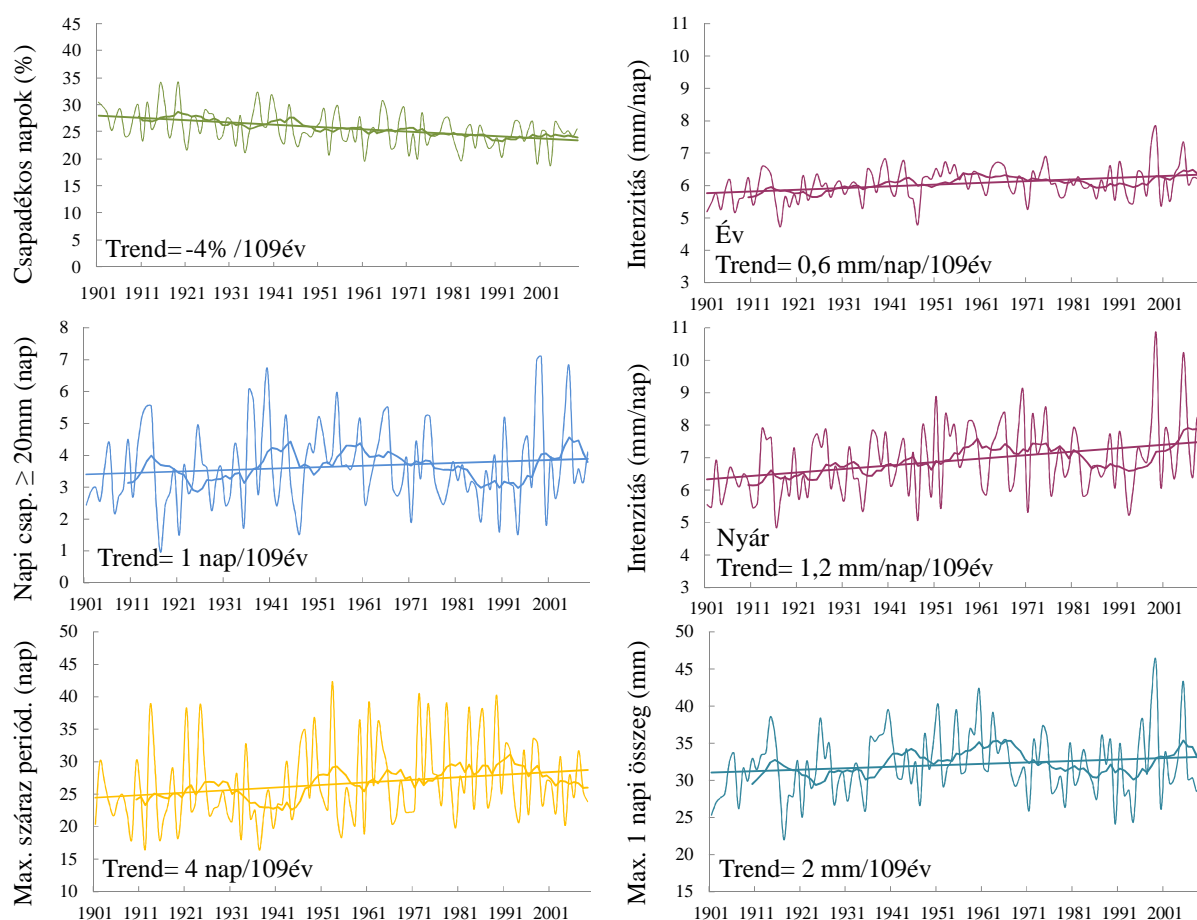
Az átlagosnál bőségesebb csapadékkal, vagy tartós szárazsággal járó események, periódusok előfordulási gyakoriságát extrém csapadék indexek (4. táblázat) idősoraival és a bekövetkezett változásukkal jellemezzük. Kiszámításuk napi csapadék adatokat igényel. A csapadék indexek esetén is, hasonlóan a napi hőmérsékleti szélsőségekhez, homogenizált, interpolált rácsponti adatbázist használtunk.

**4. táblázat.** Néhány extrém csapadék klímaindex

<b>Extrém csapadék klímaindexek</b>		
<b>Meghatározása, jele</b>	<b>Definíciója</b>	<b>Mértékegység</b>
Csapadékos napok száma (RR1)	napi csapadékösszeg $\geq 1$ mm	%
Átlagos napi csapadékosság (SDII)	csapadékos napok átlagos csapadéka	mm/nap
Max. száraz periódus hossza (CDD)	leghosszabb időszak, amikor a napi csapadékösszeg $< 1$ mm	nap
Max. nedves periódus hossza (CWD)	leghosszabb időszak, amikor a napi csapadékösszeg $\geq 1$ mm	nap
20 mm-t elérő csap. napok száma (RR20)	napok száma, amikor a napi csapadékösszeg $\geq 20$ mm	nap
Max. 1 napos csapadékösszeg (RX1)	legnagyobb 1 nap alatt lehullott csapadék mennyiség	mm

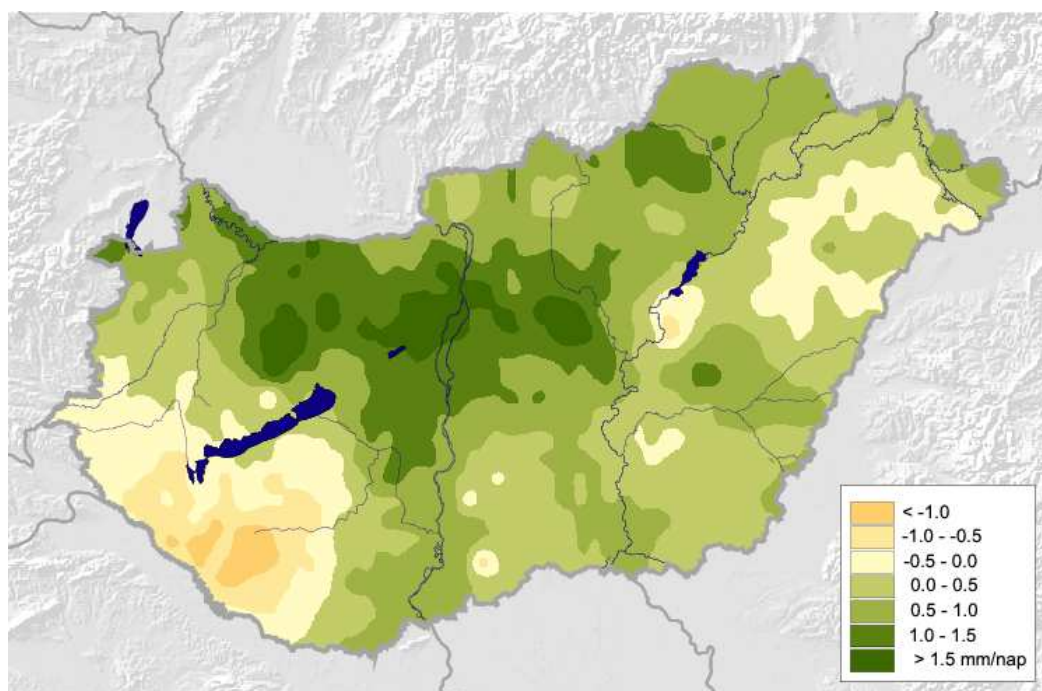
Max. 5 napos csapadékösszeg (RX5)	legnagyobb 5 nap alatt lehullott csapadék mennyiség	mm
Erősen csapadékos napok csapadékösszege az éves csapadék %-ában (R95pTOT)	éves összeg hány %-a hullott az erősen csapadékos napokon (napi összeg > a hozzá tartozó 1961-2000-es 95%-os percentilis)	%

Az országos tendenciákat az indexértékek rácsponti átlagából képzett idősor grafikonjai jellemzik (11. ábra). Kevesebb a csapadékos nap országos átlagban, ahogy a jelenhez közelítünk, a 20 mm-t meghaladó csapadékú napok pedig enyhe növekedést mutatnak. A legnagyobb 1 napos, és 5 napos összegek tendenciája pozitív ugyan, de nem számottevő a változás, a száraz időszakok hossza viszont jelentősen megnövekedett a XX. század eleje óta. Az átlagos napi csapadékok vagy más néven a napi intenzitás növekedése arra utal, hogy a csapadék egyre inkább a rövid ideig tartó, intenzív záporok, zivatarok formájában hullik.



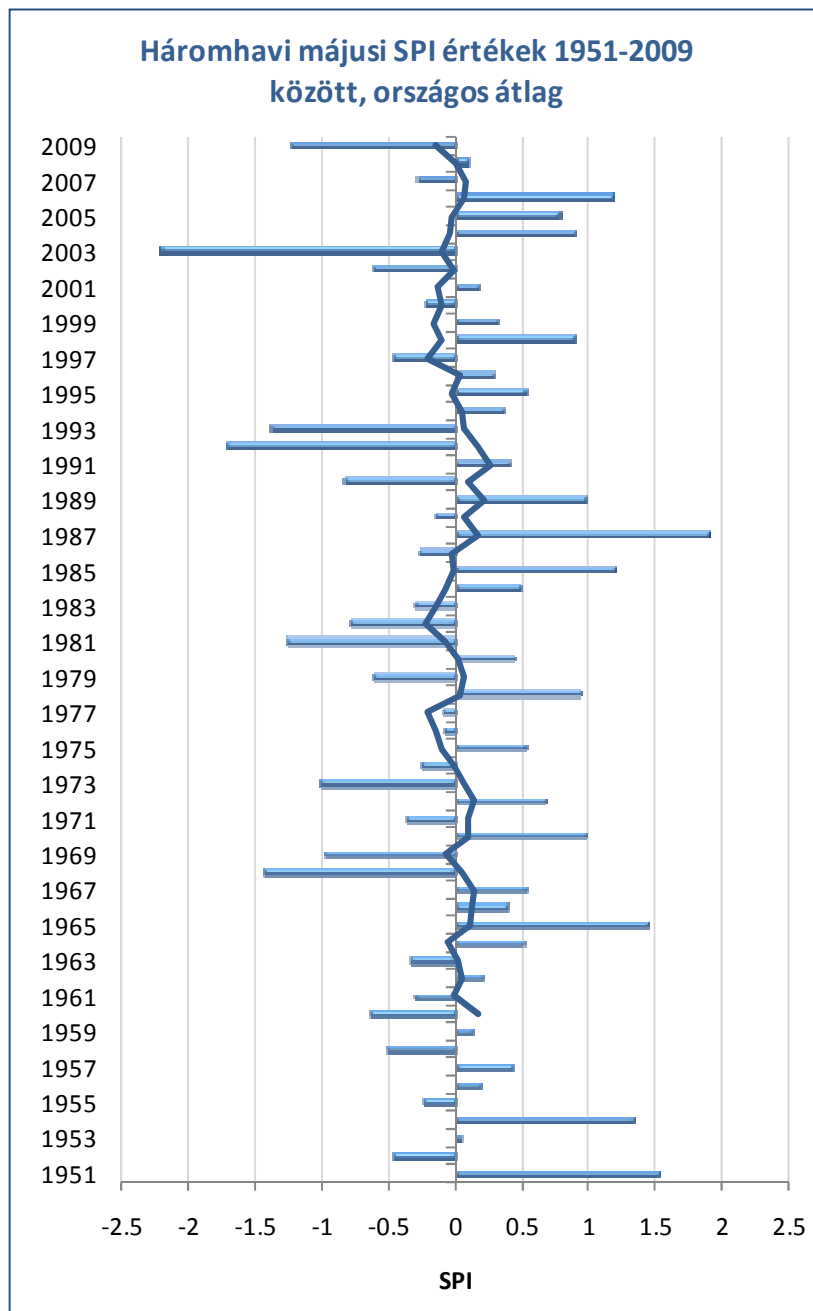
**11. ábra.** Néhány extrém csapadék klímaindex rácsponti átlagának idősora, a tízéves mozgó átlag görbéjével és a becült lineáris trenddel, 1901-2009

Az extrém csapadékindexek közül a nyári átlagos csapadékosság, vagy más néven a nyári csapadék intenzitás lehet alkalmas a 6. ábra nagy csapadékokkal kapcsolatos kijelentésének bizonyítására. Ennek az indexnek a területi eloszlása változatos képet mutat, főként nő, de a délnyugat Dunántúl területén a hatvanas évektől inkább a csökkenő tendencia a jellemző (12. ábra).



**12. ábra.** A nyári átlagos napi csapadékosság (napi intenzitás) változása az 1961-2009 időszakban a rácsponti trendbecslés alapján

Az aszályhajlam növekedését SPI (Standard Precipitation Index) átlagos rácsponti idősorokon teszteljük. Az SPI indexet a Kolorádói Éghajlati Központban, 1993-ban fejlesztették ki. A cél az volt, hogy a felszíni csapadékelátottságra vonatkozóan egy jellemzőszámot adjanak, ami más éghajlati adottságokkal rendelkező területeken is használható. Az SPI index vonatkozhat egy hónapra, vagy ennek tetszőleges többszörösére. Alapvető feltétel viszont, hogy erre az időszakra vonatkozóan hosszú, legalább 30 éves időszorral rendelkezünk. Lehet ez például a márciusi havi csapadékok időszora, vagy a március-április két hónapos időszak csapadékösszegének időszora stb. Az SPI számítása során elkészítjük az empirikus eloszlását, majd erre egy gamma eloszlást illesztünk, és ezt transzformáljuk standard normál eloszlássá. Így az SPI értékhez tartozó standard normál eloszlás értéke megadja a vizsgált időszakra vonatkozó csapadékösszeg előfordulási valószínűségét. A negatív SPI értékek az átlagosnál szárazabb, a pozitív értékek nedvesebb időszakokat jelentenek.



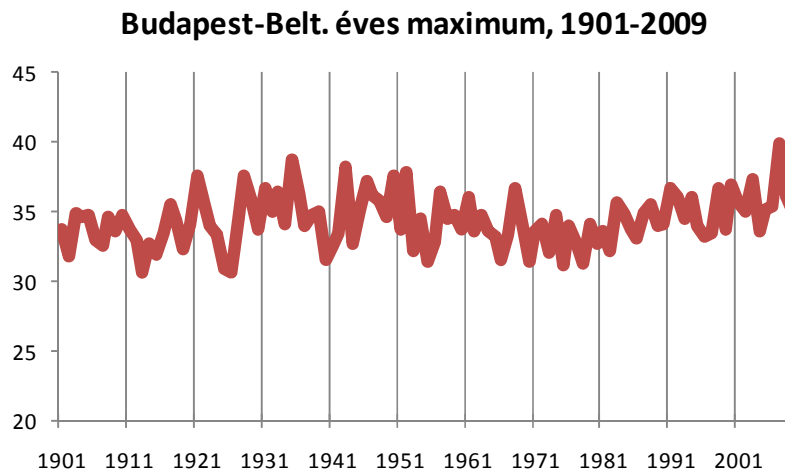
**13. ábra.** A márciusi háromhavi SPI értékek országos rácsponti átlaga a tízéves mozgó átlaggal

A 13. ábrán a májusi háromhavi SPI országos átlaga látható. A diagram értékei az országos rácsponti átlagokat mutatják. A legaszályosabb a 2003-as év tavaszi-nyári időszaka volt, ez megmutatkozik az SPI értékekben is. A bemutatott májusi háromhavi SPI idősor, ami az aszályos tavaszok jellemszáma lehet, nem mutat szignifikáns lineáris változást.

### ***A maximumhőmérsékletek valószínűségi eloszlásának megváltozása***

A klíma megváltozása során a szélsőértékek valószínűségi eloszlása is megváltozik, az eloszlásfüggvény paraméterei eltolódnak. Ezt a Budapest Belterület állomásunkon mért maximumhőmérsékletek szélsőértékeinek alakulásával szemléltetjük. Az említett állomást működése során többször áthelyezték, így az adatelőkészítés során adatellenőrzést és homogenizálást végeztünk.

Az eddigi legforróbb napot 2007. július 20-án tapasztaltuk Budapesten is, hasonlóan az ország más régióihoz. 40,1°C-ig emelkedett a hőmérséklet ezen a napon Budapest-Belterület állomáson. Az évi legmagasabb hőmérsékletek idősorát mutatja a 14. ábra. A melegedő tendencia a hetvenes évek közepétől jelen van a középhőmérsékletek tekintetében, a maximumok is jellemzően magasabbak. Arra a kérdésre, hogy milyen magas értéket ér el átlagosan egyszer 5, 10, 20, 100, ... stb. év alatt az éves maximumhőmérséklet, statisztikai módszerekkel tudunk választ adni. Becslést kell adni a rendelkezésünkre álló minta alapján a GEV (Generalized Extreme Value) szélsőérték eloszlásfüggvény paraméterire, az eloszlás ismeretében ugyanis megadhatók a visszatérési értékek.



**14. ábra.** Budapest- Belterület állomás évi maximumhőmérsékleteinek idősora, 1901-2009

Fontos megjegyezni, hogy a szélsőértékek GEV valószínűségi eloszlása (1) csak független, azonos eloszlású mintára érvényes, a változó klíma azonban az átlagok eltolódásával jár, ami az eloszlásfüggvény paramétereinek ( $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\xi$ ) megváltozását vonja maga után. Hosszú idősor vizsgálata esetén az azonos eloszlás feltételének tehát nem tesz eleget a megfigyelési sorozat.

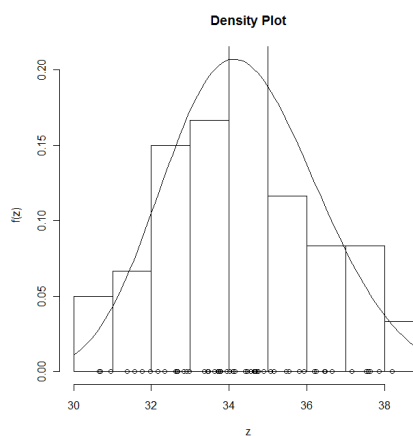
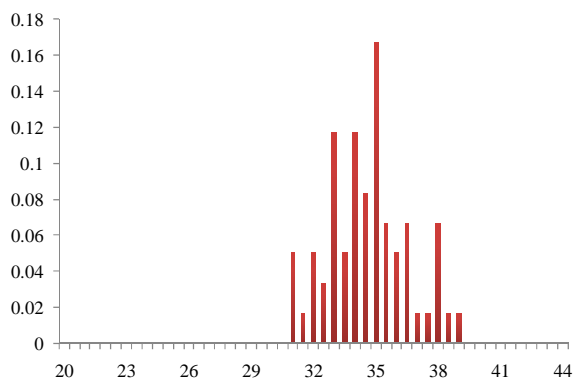
$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \xi \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (1)$$

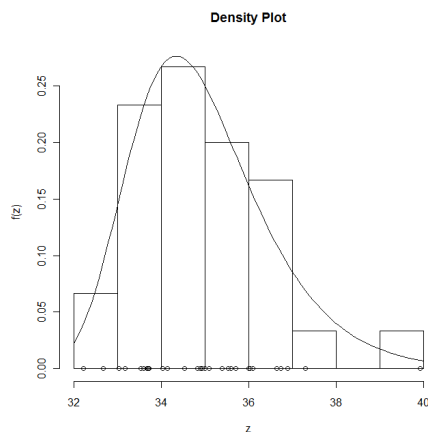
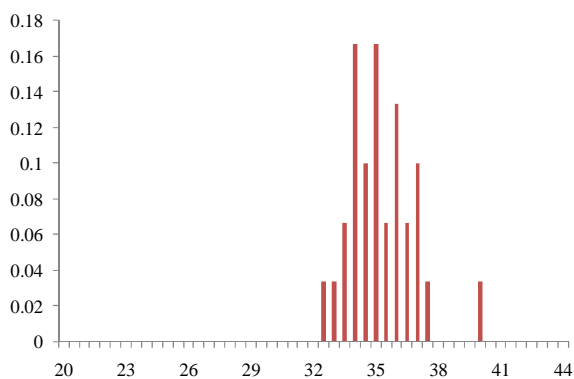
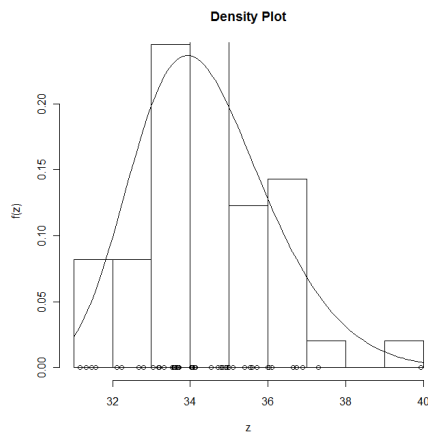
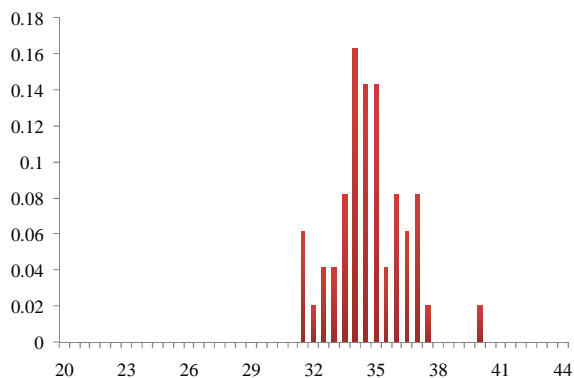


A teljes időszakot átölelő idősort felbontottuk három, részben átfedő intervallumra. A századelőtől 1960-ig tartó megfigyelések az antropogén hatásoktól mentes időszakot jelentik, a hatvanas évektől 2009-ig, illetve a legutóbbi harminc év már a melegedő periódust is magába foglalja. Az elemzett, részben átfedő idősorok 1901-1960, 1961-2009 és 1980-2009 időszakok évi maximumai. Az aszimptotikus eloszlásfüggvény paramétereit maximum-likelihood becsléssel közelítettük (Coles, 2001) a lokációs, skála és alak paraméterekre az 5. táblázatban közölt értékek adódtak. A lokációs paraméter növekedése egyértelműen a magasabb értékek felé helyeződést jelzi, az alakparaméter pozitív irányba tolódása pedig szintén magasabb visszatérési szinteket eredményez.

**5. táblázat.** Az aszimptotikus eloszlásfüggvény paramétereinek becslése

időszak	$\mu$	$\sigma$	$\xi$
1901-1960	33,6617967	1,8286072	-0,2340366
1961-2009	33,6892788	1,5709847	-0,1434565
1980-2009	34,26591523	1,33443852	-0,06043646





**15. ábra.** Az éves maximumok hisztogramjai (bal oldali panel) és az illesztett GEV eloszlást jellemző sűrűségfüggvény grafikonja a hisztogrammal (jobb oldali panel) az 1901-1960, 1961-2009 és 1980-2009 időszakokra

A három elemzett időszakot jellemző hisztogramok és a becsült sűrűségfüggvények láthatók a 15. ábrán. A jelenhez közeli, 1980-2009 közötti évekből származó éves szélsőértékek jobbra tolódtak, magasabb értékeket, magasabb kockázatot jelentenek.

### **Konklúzió**

Összegzésképpen kijelenthetjük, hogy a hazai hőmérsékleti sorok alátámasztják a melegedő tendenciát. A csapadék a század elejétől csökken, rövidebb idősokra a változás megbízhatósága kisebb. Mindazok a változások, amelyek az IPCC AR4 Értékelő Jelentésben az extrémumok változását jelzik nyomon követhetők a múlt század közepétől térségünkben is. A változás az éves maximumhőmérsékletek szélsőértékét jellemző valószínűségi eloszlás függvény paramétereinek eltolódásában is megnyilvánul.

## *Irodalomjegyzék*

- Coles S. G., 2001: An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer Verlag, London.
- Éghajlatváltozás 2007 Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) Negyedik Értékelő Jelentése <http://www.met.hu/eghajlat/klimavaltozas/ipcc/>
- IPCC, 2007: Climate Change 2007. The Scientific Basis, Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), Cambridge University Press, UK, pp946.
- Konkolyné Bihari Z., Lakatos M., Szalai S. (szerk) 2008: Magyarország éghajlatáról, Változás, változékonyság térben és időben
- Lakatos M., Bihari Z., 2011: A közelmúlt megfigyelt hőmérsékleti- és csapadéktendenciái, in Klímaváltozás – 2010, Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére (szerk: Bartholy et al, megjelenés alatt)
- Lakatos M, Szentimrey T. Bihari Z 2011: Application of gridded data series for calculation of extreme temperature and precipitation indices in Hungary, Időjárás (megjelenés alatt)
- Lakatos M., Szalai S., 2010: Aszályindex számítás és térképezés Magyarországra a DMCSEE keretében, Agrofórum, 21. évfolyam 8.szám 49-51 old.
- Szalai S., Bihari Z., Lakatos M., Szentimrey T., 2005: Magyarország éghajlatának néhány jellemzője 1901-től napjainkig, OMSZ
- Szentimrey, T., 1999: Multiple Analysis of Series for Homogenization (MASH), Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data, Budapest, Hungary; WMO, WCDMP-No. 41, pp. 27-46.
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007: Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis), Proceedings from the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology, Budapest, Hungary, 2004, COST Action 719, COST Office, 2007, pp. 17-27
- Szentimrey, T., 2008: Development of MASH homogenization procedure for daily data, Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, Budapest, Hungary, 2006; WCDMP-No. 71, WMO/TD-NO. 1493, 2008, pp. 123-130.
- WMO, 2010 WMO statement on the status of the global climate in 2009. WMO-No. 1055

# Az ENSEMBLES projekt regionális modelleredményeinek alkalmazhatósága Magyarország éghajlatának jellemzésére

Szépszó Gabriella<sup>1</sup> és Zsebeházi Gabriella<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Országos Meteorológiai Szolgálat, Klímamodellező Csoport, 1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1.

<sup>2</sup> Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A  
email: szepszo.g@met.hu, zsgabriella@caesar.elte.hu

**Összefoglaló** – A meteorológia egyik legnagyobb mai kihívása az éghajlat megbízható jellemzése regionális skálán. Napjainkra a globális éghajlati modellek képesek kielégítő pontossággal leírni a Föld éghajlatának alapvető vonásait és viselkedését, azonban a lokális részletek a rendszert átszövő nem-lineáris kölcsönhatások miatt nem könnyen származtathatók. Két évtizeddel ezelőtt kezdődtek meg az első kísérletek arra vonatkozóan, hogy a rövidtávú előrejelzésekhez hasonlóan éghajlati skálán is korlátos tartományú numerikus modellek bevonásával vizsgálják a nagyskálájú folyamatok regionális részleteit. Mára bebizonyosodott, hogy a regionális klímamodellekkel az éghajlati kutatások területén olyan eszközzel rendelkezünk, melynek segítségével képesek vagyunk részletes és kvantitatív információkkal szolgálni az éghajlatváltozásra vonatkozóan. A modelleredmények együttes értékelése lehetővé teszi, hogy számszerűsítsük azon bizonytalanságokat, melyek a szimulációkban az éghajlati rendszer belső változékonyságából, az emberi tevékenység előre nem ismert alakulásából, valamint a mindezek leírására használt numerikus modellek eltéréseiből fakadnak. Mindehhez jó alapot nyújt a 2009-ben lezárult ENSEMBLES Európai Unió projekt, melynek keretében rendkívül széleskörű globális és regionális klímamodellezési tevékenységet hajtottak végre. Az Európára koncentráló regionális modellkísérletekben a 21. század éghajlati viszonyait többnyire 25 km-es térbeli felbontással szimulálták. A projekt alapvető célkitűzése volt az összetett modellezésből adódó sokrétű bizonytalanságok feltérképezése, például a különböző regionális modellek számára több globális modell szolgáltatotta a nagyskálájú kényszereket. A rendelkezésre álló regionális modellkísérletekből kétféle megfontolás alapján választottunk ki néhányat, hogy szélesítsük a Kárpát-medence éghajlatváltozására vonatkozó tudásunkat, és megvizsgáljuk az általuk lefedett bizonytalansági intervallumot. Jelen cikkben röviden bemutatjuk az éghajlati modellezés elméleti hátterét, áttekintést adunk az említett bizonytalanságok mibenlétéről, valamint az ENSEMBLES projektről. Ismertetjük a modellkísérletek kiválasztásának szempontjait, majd összegezzük az ezeken alapuló vizsgálataink eddigi eredményeit.

## **Bevezetés**

Általánosan elfogadott tény, hogy az éghajlati rendszer összetett működésének tanulmányozására a numerikus modellezés eszköztára szolgáltat megfelelő, objektív módszert. 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 kizárólag azok a globális éghajlati modellek képesek, melyek a komplex rendszer egészét együttesen tekintik, ennél fogva ezekkel a numerikus modellekkel van lehetőségünk leírni az éghajlati rendszer választ egy feltételezett jövőbeli kényszerre. 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 kölcsönhatásokkal együtt), továbbá eredményesen használhatók az éghajlatváltozás planetáris (azaz globális, nagyskálájú) jellemzőinek vizsgálatára. Komplexitásuk azonban a jelenlegi számítógépes kapacitás teljes kihasználásával sem teszi lehetővé azt, hogy egyedüli alkalmazásukkal az éghajlatváltozás regionális vonatkozásairól pontos információhoz jussunk (térbeli felbontásuk például rendszerint még ma sem haladja meg a 100 km-t). A részletek feltárására ezért ún.

*regionalizációs* (leskálázási) módszerekkel élünk, amelyek segítségével egy az érdeklődésünkre számot tartó területen finomíthatjuk a nagyskálájú globális információkat. Erre alapvetően három módszer ismeretes:

1. A legkézenfekvőbb lehetőség a *nagy- vagy változó felbontású globális modellek* alkalmazása. A regionalizációhoz alkalmazott nagyfelbontású globális modellek esetében általában már csak az éghajlati rendszer egyik elemének (legtöbbször a központi szerepet betöltő légkör) viselkedését tanulmányozzák, s a többi komponensre (például az óceánra) vonatkozó kényszereket egy durvább felbontású kapcsolt globális modell mezőinek felhasználásával veszik figyelembe. A változó felbontású modellek esetében a globális modell felbontását kizárólag azokon a területeken növelik, amelynek éghajlati viszonyait nagyobb részletességgel szeretnék megismerni. Ezekkel a modellekkel tehát lehetséges marad a komplex rendszer globális kezelése, mindazonáltal számítógépes futtatásuk még így is rendkívül költséges, ezért alkalmazásukra továbbra is csak a legnagyobb kutatóközpontok vállalkozhatnak.
2. A *statisztikai leskálázás* ennél jóval kevesebb számítást igényel; lényege, hogy az éghajlat múltra vonatkozó globális és regionális jellemzői között egy statisztikai kapcsolatot állítanak fel, majd ezt a relációt alkalmazzák a globális modellek által szolgáltatott jövőbeli eredményekre is. A módszer alapfeltevése, miszerint a múltbeli statisztikai kapcsolatok érvényesek maradnak a jövőben is, nem ellenőrizhető, ráadásul egy változó globális éghajlatot leíró rendszerben vitatható, mivel nem képes figyelembe venni azokat a fontos visszacsatolási mechanizmusokat, amelyek az éghajlati rendszert globális és regionális szinten is átszövik.
3. A *regionális éghajlati modellek* alkalmazása során olyan ún. korlátos tartományú modelleket futtatunk, amelyek nem az egész Föld, hanem egy kiválasztott terület folyamatait részleteiben jellemzik a globális modellekhez hasonló, fizikailag megalapozott módon.

A jelen cikkben az utóbbi módszert (azaz a regionális klímamodellezés módszerét) tárgyaljuk részletesen.

### ***Regionális éghajlati modellezés***

A korlátos tartományú modelleket már eredményesen alkalmazzák a légkör viselkedésének rövidtávú (azaz az időjárás) előrejelzésére, méghozzá oly módon, hogy abban a globális időjárás-előrejelző modelleknek is fontos szerep jut: az egész Földet átfogó, nagyskálájú folyamatok ugyanis a korlátos tartományú modellekben általában közvetett módon, tipikusan egy globális modell előrejelzésein keresztül (azaz a tartomány oldalsó határán peremfeltételként) kerülnek figyelembevételre és kényszerként fejtik ki hatásukat a regionális eredményekre. Az elmúlt évtizedekben a témában publikált eredmények (Giorgi and Bates, 1989) azt bizonyították, hogy a korlátos tartományú modellek alkalmazása bizonyos módosításokat követően és a megfelelő peremfeltételek beépítésével hosszabb időszakra is kiterjeszhető.

A rövidtávú modellek átalakítása regionális klímamodellekké elsősorban a modellek fizikai parametrizációs eljárásainak módosítását követeli meg, mivel az éghajlati skálán

más fizikai folyamatok dominánsak, mint a néhány napos időskálán. A klíma-projekciók készítésénél pedig egy további lényeges nagyskálájú tényezővel kell számolni, amelynek rövidtávon nincs érzékelhető hatása, nevezetesen az emberi tevékenység éghajlatmódosító „tulajdonságával”. Ezt csak a globális modellek képesek „közvetlenül” figyelembe venni, a regionális modellek „mindössze” a kényszerre adott globális „választ” (például a hőmérsékletváltozást) finomítják a kiválasztott régióra.

A regionális modellek kisebb területet fednek le, mint globális társaik, ennek következtében ugyanazzal a számítógépes kapacitással finomabb felbontáson futtathatók, lehetővé téve a felszíni és mindazon folyamatok részletesebb leírását, amelyek lényeges szerepet játszanak a regionális éghajlati viszonyok alakításában. Nemcsak az átlagos regionális sajátosságokat képesek pontosabban visszatükrözni, de a szélsőséges események tendenciáinak meghatározására is adekvát eszközt szolgáltatnak, s nem mellesleg kisebb országok kutató-központjai is vállalkozhatnak alkalmazásukra.

Az elmúlt néhány évben hazánk is aktívan bekapcsolódott a regionális modellezés nemzetközi vérkeringésébe. Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztályán valamint az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén négy regionális klímamodell (az ALADIN-Climate, PRECIS, RegCM és REMO modellek) hazai adaptálására került sor, amelyek segítségével lehetőségünk nyílik reális becslést adni a Kárpát-medencében az elkövetkezendő néhány évtizedben várható éghajlatváltozás tendenciáira (Horányi et al., 2011; Szabó et al., 2011; Pongrácz et al., 2011).

A globális és regionális éghajlati szimulációk – köztük a négy hazai modellel végrehajtott kísérletek – számos bizonytalanságot tartalmaznak, melyek pontos ismerete elengedhetetlen ahhoz, hogy ezeket az „előrejelzéseket” megfelelő módon tudjuk értelmezni. Az éghajlati modellek eredményei csak a bizonytalanságok számszerűsítésével együtt közölhetők, éppen ezért az adaptált regionális modellek fejlesztésén és új kísérletek elvégzésén túl az Országos Meteorológiai Szolgálatnál erőfeszítéseket teszünk arra is, hogy felmérjük, a fenti négy modell eredményei hol helyezkednek el ezen a bizonytalansági „palettán”. A dolgozat további részében áttekintést nyújtunk az említett bizonytalanságok mibenlétéről és eredetéről, majd bemutatjuk mindazon kutatásokat, melyeket annak érdekében végzünk, hogy ezeket számszerűsítsük elsősorban a Kárpát-medence térségére.

### ***Az éghajlati szimulációkban lévő bizonytalanságok***

Ahogy utaltunk rá, a jövőre vonatkozó regionális projekciók többféle bizonytalanságot hordoznak magukban. Az alábbiakban áttekintést adunk arról, hogy ezek milyen tényezőkre vezethetők vissza:

1. Az éghajlati rendszer egyik fontos jellemzője, hogy minden külső kényszer nélkül időről időre „kilendül” az átlagostól jelentősen eltérő egyik vagy másik irányba és akár hosszabb ideig is ebben az új állapotban marad. (Szigorú értelemben az éghajlati rendszernek nincs „átlagos” állapota, mert folyamatosan igazodik az őt érő hatásokhoz. Ez az alkalmazkodás azonban sokkal lassabb, mint a kényszerfeltételek változása, emiatt az éghajlati rendszer soha nincsen egyensúlyban, hanem mindig egy újabb egyensúlyi állapot felé tart.) Ilyet tapasztalunk például akkor, amikor egy csapadék szempontjából nem rendkívüli időszakot néhány a szokásosnál jóval szárazabb vagy nedvesebb év sorozata követ, de hosszabb, évszázados-évezredes

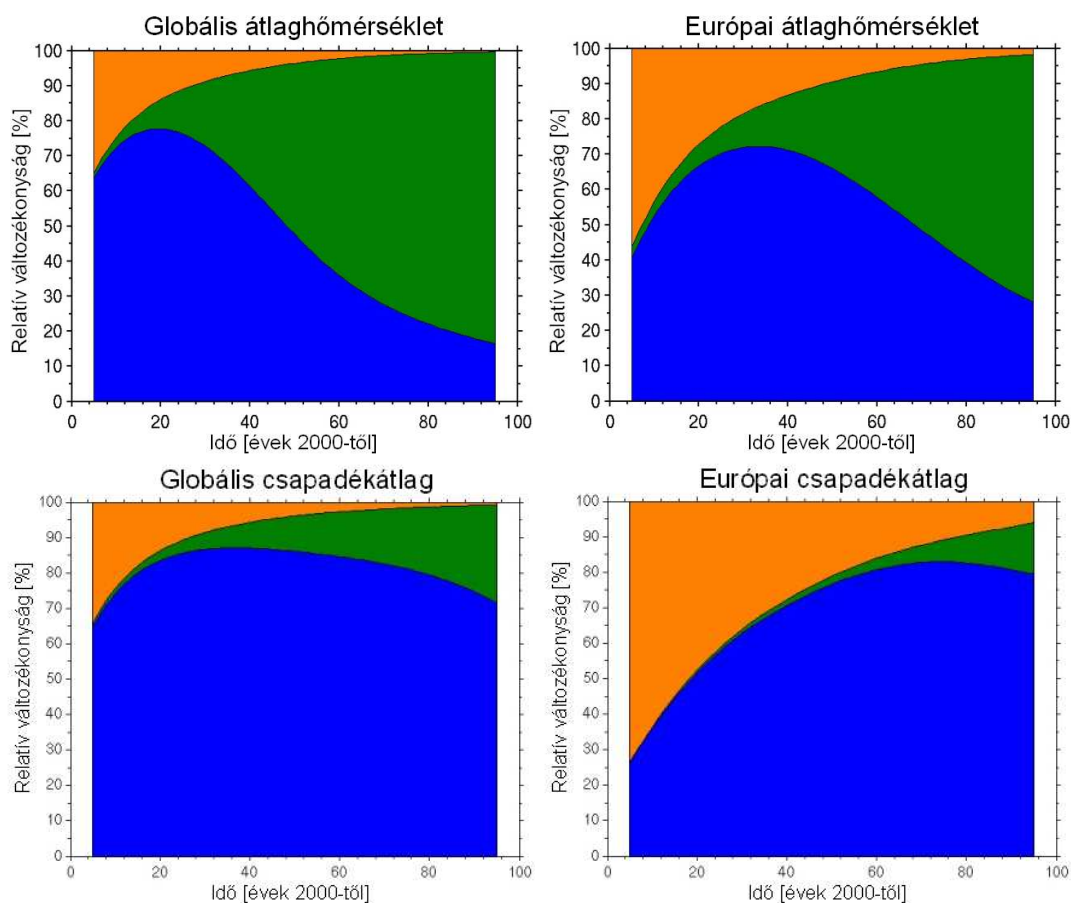
időskálán is találunk erre példát (Götz, 2005). Ez a változékonyság tehát az éghajlati rendszer természetes, belső tulajdonsága, emiatt az éghajlati rendszer *szabad belső változékonyságának* nevezzük.

2. Az éghajlatra hatással bíró külső kényszerek egyik legbizonytalanabb eleme az emberi tevékenység, mégpedig azért, mert ennek a 21. században való alakulásáról nincs egyértelmű jövőképünk, csupán különböző (optimista, pesszimista, átlagos) feltételezéseink vannak. Az egyes „lehetőségeket” a globális éghajlati modellek számára külső kényszerként, ún. *kibocsátási forgatókönyvek* (szcenáriók) segítségével számszerűsítik, s a globális modell az éghajlati rendszer egészének válaszát szimulálja a feltételezett külső kényszerre (például hőmérsékletváltozás formájában). Ezeket a szimulációkat éppen a külső kényszer hipotetikus volta miatt nem előrejelzéseknek, hanem *projekcióknak* nevezzük (és ezért használjuk a jelen cikkben is a „projekció” kifejezést az „éghajlati előrejelzések” helyett).
3. A regionális modellezés esetében a bizonytalanság további lényeges összetevője, hogyan írjuk le a regionális klímamodellek számára azokat a nagyskálájú információkat, melyek egy adott térség éghajlatában szerepet játszanak. Ez globális modelleken keresztül történik, mégpedig úgy, hogy a globális modellek eredményeit határfeltételekként vesszük figyelembe a regionális modellkísérletekben. Ugyan minden egyes globális modell az éghajlati rendszer viselkedését hivatott szimulálni, mégis a fizikai folyamatok leírása különböző módon történik az egyes modellekben. Ez a globális eredményekben nagy eltérésekhez vezethet, amelyek a regionális leskálázás során tovább nőnek.
4. A bizonytalansági lánc záró eleme a regionális éghajlati modellek és a velük készült modell-szimulációk eltéréseinek köszönhető. Ezek a modellek amellet, hogy globális társaikhoz hasonlóan eltérő módon reprezentálják a fizikai folyamatokat, érzékenyek arra is, milyen területen, felszíni jellemzőkkel és felbontással hajtják végre velük a modellkísérleteket. Az igen finom felbontással már szükségszerűen együtt járó nem-hidrosztatikus modellezés az éghajlati modellezés esetében egyelőre még nem reális alternatíva, tekintve annak magas számításigényét. A regionális modellek felbontása ezért ma a 10-25 km-es ráctávolság-intervallumban mozog. Sok esetben azonban a felbontás növelése a tartomány-váltással is jár: például ha a számítástechnikai lehetőségek korlátozottak, akkor a finomabb felbontású szimuláció csak a célterület csökkentésével valósítható meg. Az integrálási tartomány és a térbeli felbontás együttes változtatása viszont jelentősen is megváltoztathatja az eredményeket, ezáltal további bizonytalanságot generálva a projekciókban.

A bemutatott bizonytalansági típusok hozzájárulása a projekciókat jellemző teljes bizonytalansághoz eltérő mértékű és nemcsak változónként, de az időtáv, sőt a földrajzi elhelyezkedés függvényében is különböző (

1. **ábra**). A kibocsátási forgatókönyvek bizonytalansága elsősorban hosszú távon, az évszázad második felében érezteti hatását, az első évtizedekben a modellek eltéréseiből és a szabad változékonyságból eredő bizonytalanság dominál. A 21. század első felében tehát mind a csapadék, mind a hőmérséklet esetében nagyobb az eltérés az azonos kibocsátási forgatókönyvvel, de különböző globális modellekkel végrehajtott szimulációk között, mint

azok között, amelyek csak a forgatókönyv-választásban különböznek (például egy optimista, illetve egy pesszimista forgatókönyv felhasználásával készültek). Ha a vizsgálati területet szűkítjük, akkor a belső változékonyság szerepe – különösen a csapadék esetében – nő, azaz a regionális átlagértékekben a globálisnál nagyobb évek közötti fluktuációk figyelhetők meg, ennek jelentősége azonban az időbeli fejlődés során fokozatosan elvész. A globális és regionális modellek eltéréseiből származó bizonytalanság minden időskálán és változónál markáns, a csapadék esetében azonban egyértelműen ez az összetevő felelős a szimulációkban lévő bizonytalanságok túlnyomó részéért, s itt a forgatókönyv-választás bizonytalansága gyakorlatilag elhanyagolható. Ez azt jelenti, hogy míg a hőmérsékleti projekciók közötti eltérések az emberi tevékenység pontosabb behatárolásával mérsékelhetők, addig a csapadék-szimulációk nagyfokú bizonytalansága elsősorban a modellek fejlesztése által csökkenthető.



**1. ábra.** A globális éghajlati modell-szimulációkat jellemző három bizonytalansági tényező (narancs: belső változékonyság, kék: modellek eltéréseiből származó bizonytalanság, zöld: forgatókönyv-választásból eredő bizonytalanság) hozzájárulása [%-ban] a teljes bizonytalansághoz a 2000–2100 időszak során, a globális és az európai éves átlaghőmérséklet, valamint a globális és az európai éves csapadékösszeg projekciói esetében (Hawkins and Sutton, 2009, 2010).



A numerikus előrejelzésekben lévő bizonytalanságok mind rövidtávon, mind éghajlati skálán az ensemble technika segítségével számszerűsíthetők. Ennek lényege, hogy nem egyetlen modellkísérletet tekintünk, hanem több egyforma valószínűségűnek tekintett szimuláció eredményét együttesen értékeljük ki. Az időjárás-előrejelzés bevalásában nagy szerepe van a kezdeti feltételek pontosságának, s az éghajlati szimulációknál is lényeges az éghajlati rendszer kiindulási állapotának (például az átlagosan uralkodó óceáni és légköri áramlások) pontos ismerete, a klasszikus értelemben vett kezdeti feltételek azonban nem játszanak szerepet az éghajlati időskálájú folyamatok alakításában. Emiatt a klímaprojekciók esetében a bizonytalanságok számszerűsítése a multi-modell és/vagy multi-forgatókönyv ensemble módszerrel történik, azaz a kísérleteket több (globális és regionális) éghajlati modell és/vagy kibocsátási forgatókönyv segítségével hajtják végre.

### ***Az ENSEMBLES projekt eredményeire alapozott vizsgálatok***

A még napjainkban is korlátozottan tekinthető számítógépes kapacitás miatt egy-két modell adaptálásánál, fejlesztésénél és néhány hosszabb kísérlet elvégzésénél többre egy ország kutatóintézete egyedül nem vállalkozhat. Ezért ezekben a kutatásokban (is) kiemelt jelentősége van a nemzetközi együttműködéseknek. Az ENSEMBLES (van der Linden and Mitchell, 2009; <http://ensembles-eu.metoffice.com>) a legfontosabb azon projektek közül, melyek fő célkitűzése az éghajlati projekciók bizonytalanságának alapos elemzése. A 2009 őszen lezárult, ötéves giga-projektben több mint hatvan európai intézet részvételével kiterjedt globális és regionális modellezési tevékenységet hajtottak végre, ami megteremtette a bizonytalanságok számszerűsítésének alapját. Az együttműködés keretében ugyan a teljes 21. századot lefedték modell-szimulációkkal, a projekt 25 km-es felbontású, Európára vonatkozó regionális vizsgálataiban azonban az évszázad első felére koncentráltak. Figyelembe véve, hogy az emberi tevékenység bizonytalan részletei csak ennél később fejtik ki hatásukat, a regionális modellkísérleteket egyetlen átlagosnak tekinthető (A1B, Nakicenovic et al., 2000) kibocsátási forgatókönyvre alapozták. Az ENSEMBLES szimulációs eredmények 2009 óta mindenki számára hozzáférhetők, s az Országos Meteorológiai Szolgálatnál több kutatásban is használjuk őket.

Az ENSEMBLES projekt regionális modelleredményeit alapul véve két vizsgálatba kezdtünk bele az elmúlt évben:

1. Egy szakdolgozat keretében az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazott két regionális klímamodell „testvér-szimulációit” vizsgáljuk, azaz olyan modellkísérleteket, amelyeket más európai intézmények készítettek az általunk is használt ALADIN és REMO modellcsaládok tagjaival. Ezen kutatás egyik célja a validáción keresztül képet kapni arról, hogy a Szolgálat által használt modellváltozatok eddig feltárt hibái mennyire érvényesek ezekben a modellverziókban és kísérletekben. Másfelől a projekciós eredmények együttes elemzésével a magyarországi éghajlatváltozás már ismert bizonytalanságait (Horányi et al., 2011) kívánjuk jobban megérteni. Ezekre a vizsgálatokra a jelen cikkben *mini-ensemble vizsgálatok* néven hivatkozunk.
2. Az Országos Meteorológiai Szolgálat részt vesz az ECCONET projektben (<http://www.tmluven.be/project/econet/home.htm>), melynek célja a 21. századi éghajlatváltozás belvízi hajózásra gyakorolt hatásainak vizsgálata a Duna és a Rajna folyók mentén. A projektben a hatásvizsgálatokat regionális modell-szimulációkra

alapozva fogják végrehajtani, s ezek kiválasztásánál a legfontosabb szempont az volt, hogy minél teljesebb bizonytalansági intervallumot öleljünk fel velük. Ezért két célidőszakra (2021–2050-re és 2071–2100-ra) koncentrálna a jövőbeli csapadékviszonyok szempontjából két-két, „szélsőséget” képviselő regionális modellkísérletet választottunk ki, azaz azokat, amelyek a legnagyobb és a legkisebb várható változásokat jelezték ezeken az időszakokon, a két folyó vízgyűjtő területére.

## **Eredmények**

### A mini-ensemble vizsgálatok eredményei

Mint említettük, az ENSEMBLES projekt eredményeivel tervezett mini-ensemble vizsgálatok célja, hogy a Kárpát-medence éghajlatváltozásának várható tendenciáiról és ezek bizonytalan részleteiről egy átfogó képet kapjunk a saját (Szabó et al., 2011, Horányi et al., 2011) és az ENSEMBLES eredmények ötvözésével. A jövőbeli éghajlatváltozás vizsgálata előtt azonban elengedhetetlen annak feltérképezése, hogy a használni kívánt regionális modellek miként képesek jellemezni egy olyan időszakot, amelyet már kielégítő pontossággal ismerünk. A validációnak nemcsak azért van jelentősége, mert általa képet alkothatunk a modellek gyengeségeiről, s meghatározhatjuk azokat a változókat és területeket, amelyek átlagos viszonyait jól tükrözik, de a következtetések alapján kitzúphetők a szükséges modellfejlesztés irányai is. Utóbbi különösen indokoltá teszi, hogy a mini-ensemble vizsgálatokhoz azon modellcsaládok regionális modelleredményeit választottuk ki, amelyek Magyarországon rendelkezésre állnak, azaz helyben is fejleszthetők.

A mini-ensemble vizsgálatokhoz tehát a Météo France-nál fejlesztett és futtatott ALADIN-Climate 4.5 modellváltozatot (Spiridonov et al., 2005) és a Max Planck Intézet REMO 5.7 klímamodelljét (Jacob, 2001) választottuk ki. A modellekkel az ENSEMBLES projektben 25 km-es térbeli felbontással készítették Európára vonatkozóan szimulációkat, míg a hazai kísérletekben egy kisebb, Közép- és Kelet-Európát magában foglaló területen alkalmaztuk őket ugyanezzel a felbontással, illetve az ALADIN modellel 10 km-es felbontású futtatások is készültek egy Kárpát-medencét lefedő tartományra. (A modell-szimulációk további részleteiről az **1. táblázat** nyújt áttekintést.)

A kiválasztott modelleket tehát először teszteltük, azaz a múltbeli időszakokra kapott eredményeket összevetettük megfigyelési adatsorokkal – a jelen cikkben ezen validációs eredményeket mutatjuk be. A múltra vonatkozóan minden modell esetében két kísérletet hajtunk végre:

1. Elsőként olyan "tökéletesnek" tekintett (ún. re-analízis) határfeltételeket alkalmaznak, melyek előállításához megfigyelési információkat is felhasználtak. Mind az ENSEMBLES projekt, mind az OMSZ modellkísérleteiben ezeket a határfeltételeket az Európai Középtávú Időjárás-Előrejelző Központ ERA-40 re-analízisei (Uppala et al., 2005) szolgáltatták.
2. Az ezt követő szimulációkban a nagyskálájú kényszereket már nem megfigyelés-alapú információk, hanem kapcsolt óceán-légkör vagy tisztán légköri általános cirkulációs modellek biztosítják, ugyanis a jövőre vonatkozóan kizárólag a globális modellek eredményeit lehetséges peremfeltételekként felhasználni. A mini-ensemble vizsgálatokhoz kiválasztott regionális modellek határfeltételeit az **1. táblázat** ismerteti.

A validáció során mind az ERA-40 re-analízissel, mind a globális modell-szimulációkkal meghajtott modelleket vizsgáltuk, mert míg az előbbi esetben a mérés-alapú határfeltétel „tökéletesnek” feltételezett volta miatt a kiértékelés következtetései a regionális modell fejlesztéséhez szolgálnak információval, addig a második esetben a globális és a regionális modell együttes hibájáról kapunk képet, ami lényeges az éghajlatváltozási szimulációk értékelésénél. Referencia megfigyelési adatsorként az ECA rácsponti adatbázist (Haylock et al., 2008) használtuk, a vizsgált időszak pedig az 1961–1990-es normálidőszak volt. Átlagos évi, évszakos és havi hibatérképeket készítettünk a havi átlaghőmérséklet és csapadékösszeg adatokból, illetve kiszámítottuk a havi átlaghőmérséklet és a csapadékösszeg 1961–1990-es időszakhoz viszonyított eltéréseit Magyarországra, s ezeket az eredményeket vetettük össze a hazai eredményekkel.

*1. táblázat. A mini-ensemble vizsgálatokhoz kiválasztott regionális modell-szimulációk alapvető jellemzői: az alkalmazott modell verziószáma, a horizontális térbeli felbontás, a függőleges szintek száma, az integrálási tartomány és a határfeltételek.*

	ENSEMBLES		OMSZ	
	ALADIN-Climate	REMO	ALADIN-Climate	REMO
<b>Verzió</b>	4.5	5.7	4.5	5.0
<b>Felbontás</b>	25 km	25 km	25 és 10 km	25 km
<b>Szintek</b>	31	27	31	20
<b>Tartomány</b>	Európa	Európa	Közép- és Kelet-Európa, Kárpát-medence	Közép- és Kelet-Európa
<b>Határfeltételek</b>	ERA-40 és ARPEGE-Climat	ERA-40 és ECHAM5/MPI-OM	ERA-40 és ARPEGE-Climat	ERA-40 és ECHAM5/MPI-OM

A hibák térbeli vizsgálata megmutatta, hogy a referencia-időszakra vonatkozó éves átlaghőmérsékletet az ALADIN és a REMO globális szimulációkkal készített peremfeltételekkel futtatott verziója pontosabban adja vissza, mint az ERA-40 re-analízissel meghajtott modellváltozatok, s ez összhangban van a hazai kísérletek eredményeivel is. Az ALADIN modellnek a hazai szimulációkban éves átlagban tapasztalt egyöntetű hűvösségét az új eredmények némiképp „árnyalják”, ugyanis a modell az északi területeken már inkább felülbecsli a hőmérsékletet (ugyanakkor a déli területeket továbbra is az alulbecslés jellemzi), bár az ARPEGE adta peremfeltételekkel történő futtatásnál ezeket is pontosabban írja le. A REMO a vizsgált európai terület nagy részét melegebbnek találja a valóságnál, s ez kisebb mértékben, de igaz az ECHAM peremfeltételekkel készített szimulációra is. Ez tehát lényeges eltérés a hazai eredményekhez képest, ahol a re-analízisek használatával előállt eredmények ugyanúgy melegek, az ECHAM határfeltétel alkalmazásával azonban ez a túlbecslés eltűnt. Azaz a REMO 5.7 modellverzió nagyobb „melegítést” eredményezett a hőmérsékletet eleve kissé alábecslő ECHAM5/MPI-OM nagyskálájú mezők finomítása

során, mint a hazai modellváltozat. Ennek oka elsősorban a két REMO-verzió eltéréseiben keresendő, ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy már pusztán a regionális modelltartomány megváltoztatása is jelentős eltérésekhez vezethet (Sieck et al., 2008).

Az évszakos átlagoknál már árnyaltabb különbségek jelennek meg (**2. táblázat**). Az ALADIN modell re-analízissel végzett meghajtás esetén Magyarországra az őszi kivételével minden évszakban a valóságnál valamivel magasabb hőmérsékletet jelez, tavasszal a legkevésbé és nyáron a leginkább. Ez lényegesen eltér a hazai eredményektől, ahol az ALADIN modell minden évszakban hidegnek bizonyult. Az ARPEGE adta szimulációkkal történő futtatás Magyarország területét az átmeneti évszakokban negatív hibákkal, nyáron és télen pedig pozitív hibákkal jellemzi (miként a hazai eredményekben). A modell a legjobb becslést a téli évszakra adja, nyáron és ősszel viszont a legnagyobb hibákat eredményezi. A REMO modell az ERA-40 peremfeltétellel meghajtott kísérlet esetén, Magyarország felett a legpontosabban a téli évszakot jellemzi, nyáron és ősszel viszont az összes modellel összehasonlítva a legnagyobb hibával rendelkezik, ami összhangban van a hazai eredményekkel. Az ECHAM szimuláció felhasználásával történt futtatás az átlaghőmérsékletet a re-analízisekkel történő futtatáshoz hasonlóan minden évszakban felülbecsli, legkisebb mértékben tavasszal. Ez – hasonlóan az éves eredményekhez – jelentősen eltér a hazai tapasztalatoktól, nevezetesen attól, hogy a modell lényegesen jobb eredményekkel szolgál az ECHAM5/MPI-OM, mint a re-analízis peremfeltételek használatával.

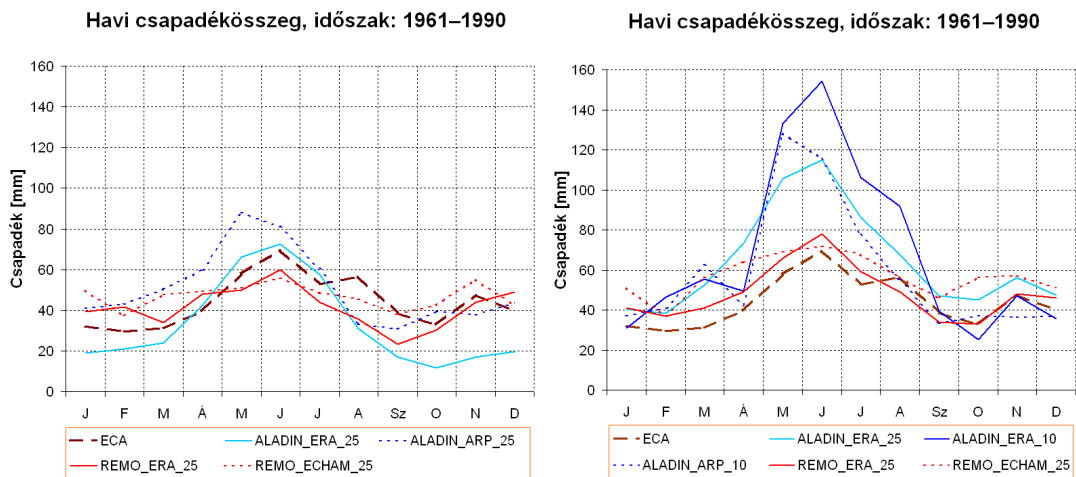
**2. táblázat.** A szimulált éves és évszakos magyarországi átlaghőmérsékletek eltérése [ $^{\circ}\text{C}$ -ban] az ECA referencia-adatbázistól az ENSEMBLES projekt (ENS) és az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) regionális modelleredményei alapján az 1961–1990 időszakra. A hőmérsékleti alulbecslést kék, a felülbecslést narancs színnel emeltük ki.

3.	4.	Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
ENS	ALADIN_ERA_25	0,6	0,5	2,3	-0,9	0,7
	ALADIN_ARP_25	0,0	-1,0	1,5	-1,2	0,9
OMSZ	ALADIN_ERA_25	-1,1	-2,1	-0,3	-1,5	-0,7
	ALADIN_ERA_10	-1,6	-2,2	-0,6	-2,6	-1,0
	ALADIN_ARP_10	-0,9	-2,1	1,1	-2,6	0,1
ENS	REMO_ERA_25	1,5	0,8	2,7	2,2	0,2
	REMO_ECHAM_25	1,0	0,4	1,0	1,2	1,4
OMSZ	REMO_ERA_25	2,0	1,5	3,3	2,7	0,4
	REMO_ECHAM_25	0,2	-0,4	0,3	0,4	0,3

A csapadék egy nehezebben modellezhető meteorológia elem, így nem meglepő, hogy a hibaterképén megjelenő alá- és fölébecslés területileg sokkal változatosabb, mint a hőmérséklet esetében (erre nem mutatunk ábrát). Az éves átlagokat tekintve az ALADIN modell re-analízissel történő futtatása a terület nagy részén alulbecsül, míg a globális szimulációkkal meghajtott modell a valóságnál több csapadékot ad a vizsgált

tartományra. A REMO modellben északon csapadéktöbblet, délen pedig csapadékhiány figyelhető meg, s ezt a kétarcú jeleget már a hazai eredményekben is láttuk.

Az évszakos átlagok esetében elmondható (2. ábra), hogy a re-analízissel történő ALADIN futtatás esetében nyáron nagyrészt, ősszel és télen teljes mértékben az alábecslés jellemző Magyarország felett, míg tavasszal a modell szinte tökéletes becslést ad. A globális szimulációk adta peremfeltételt használó modellkísérlet hazánk évszakos csapadékösszegét tavasszal és télen pozitív hibával jellemzi, míg nyár végén és ősszel csapadékhiány figyelhető meg. A nyárvégi csapadékhiány a hazai modelleredményekben is tetten érhető, leginkább az ARPEGE határfeltételekkel készített szimulációban, a többi hónapot azonban mindkét kísérletben inkább a csapadéktöbblet jellemzi. A REMO modell esetében az ENSEMBLES kísérleteknél a két futtatás hibaterképe hasonló, annyi különbséggel hogy a globális szimulációkkal történt meghajtás esetén a pontosság romlik. Magyarország területén a re-analízissel történt meghajtás tavasszal és télen felülbecsli a csapadékmennyiséget, nyáron és ősszel pedig a valóságnál kevesebb csapadékot ad – ez utóbbi, a hazai modellváltozatban is jelentkező hibát azonosítják a szakirodalomban *nyári szárazság problémaként* (Hagemann et al., 2004). A globális szimulációkkal történt meghajtás egyedül nyáron ad a mértéknél kevesebb csapadékot, s ebben különbözik a hazai kísérlettől, amelyben a csapadékmennyiség minden évszakban több, mint a referencia. A két REMO-kísérlet pár eltérései egyaránt adódhatnak a területválasztás, valamint a regionális modellváltozatok különbségeiből (például a felszín, a felhővíz-tartalom eltérő kezeléséből), s mindezekre a csapadékeredmények nagyobb „érzékenységet” mutatnak, mint amit a hőmérséklet esetében láttunk. Ahogy utaltunk rá, a csapadék modellezése rendkívül összetett módon történik, ezért az okok pontosabb meghatározása további alapos (egyéb változókra kiterjedő diagnosztikai) vizsgálatokat és újabb modellkísérleteket igényel.



**2. ábra.** A magyarországi havi csapadékösszeg [mm-ben] átlagos évi menete az 1961–1990 időszakban az ENSEMBLES projekt (bal panel) és az Országos Meteorológiai Szolgálat regionális modelleredményei (jobb panel) alapján. A referenciát az ECA megfigyelési adatbázis szolgáltatta (barna szaggatott görbe).

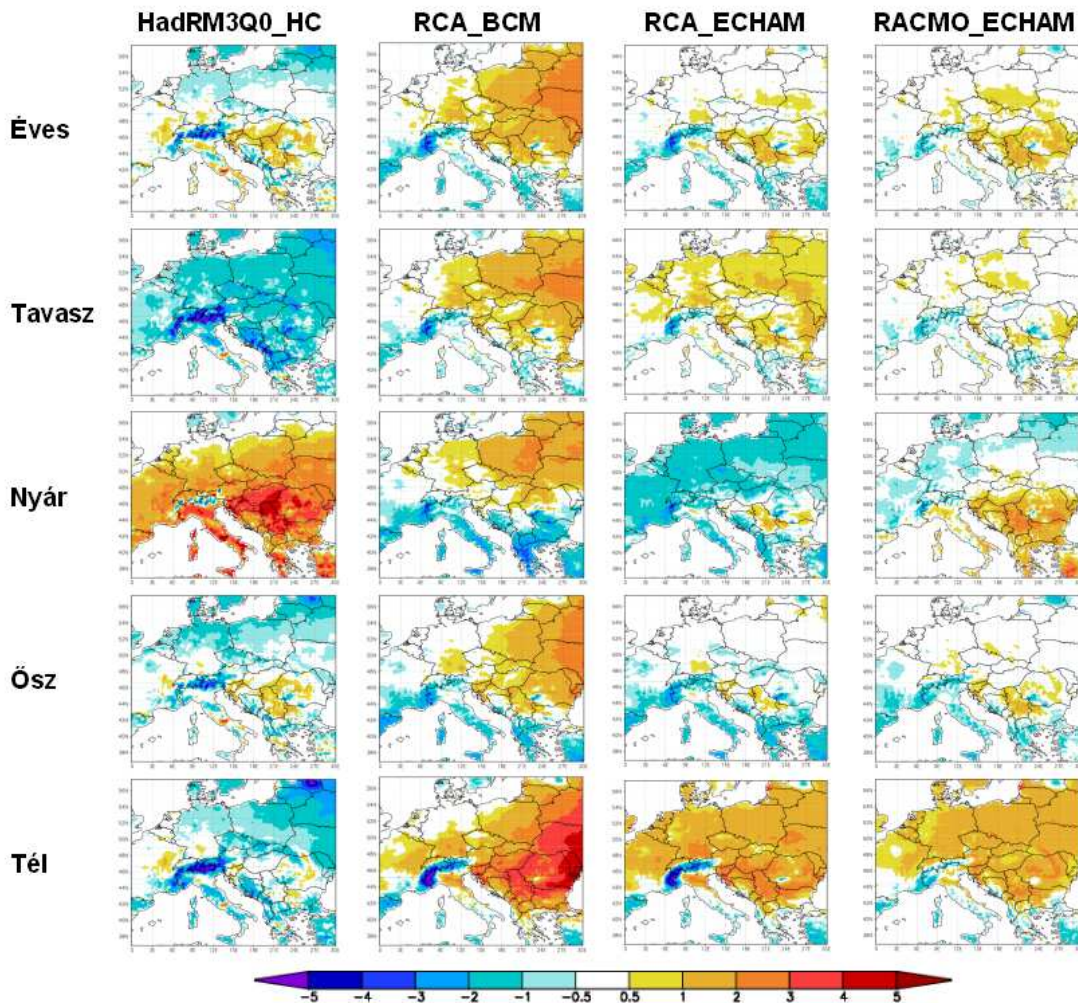
Az ECCONET projektben végrehajtott ensemble-vizsgálatok eredményei

Az ECCONET projektben a hatásvizsgálatokat olyan modellkísérletekre alapozzák, melyek a hidrológiai viszonyok közeli és távoli jövőbeli változása szempontjából egy-egy szélsőséget képviselnek. Ennek szellemében választottuk ki az RCA, RACMO és HadRM3Q0 regionális modellek szimulációit, melyek ezt a feltételt teljesítik (**Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**). A kutatást ebben az esetben is a modelleredmények validációjával kezdtük, s a hibákat az ECA referencia-adatbázishoz viszonyítva számszerűsítettük. A kiértékelés során csak azokat a szimulációkat tekintettük, amelyekben a határfeltételeket globális modellek szolgáltatták, az ECCONET projektben ugyanis nem a regionális modellek fejlesztése a cél, hanem a rendelkezésre álló eredmények használata. Az eredményekről az alábbiakban egy rövid áttekintést adunk.

*3. táblázat. Az ECCONET projektben az ENSEMBLES eredményekből kiválasztott regionális modell-szimulációk alapvető jellemzői: az alkalmazott regionális modell, a horizontális térbeli felbontás, a határfeltételek és a regionális modell referenciája.*

<b>I. Regionális modell</b>	<b>Felbontás</b>	<b>Határfeltételek</b>	<b>Referencia</b>
<b>HadRM3Q0</b>	25 km	HadCM3Q0	Collins et al., 2006
<b>RCA</b>	25 km	BCM	Kjellström et al., 2005
<b>RCA</b>	25 km	ECHAM5/MPI-OM	Kjellström et al., 2005
<b>RACMO</b>	25 km	ECHAM5/MPI-OM	Lenderink et al., 2003

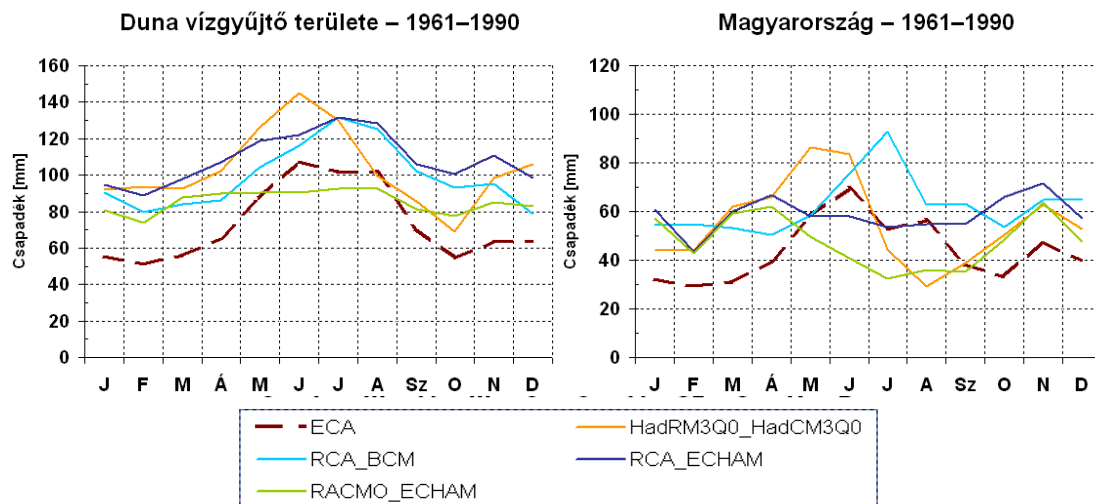
A hőmérsékleti hibák esetében megállapítható (**3. ábra**), hogy a modellek megbízhatóan jellemzik Európa, s azon belül a kiemelt vízgyűjtő-területek múltbeli éghajlatát, néhány kivételtől eltekintve. Télen a modellek többsége felülbecsli az átlaghőmérsékletet, a legnagyobb hibákat a Duna-vízgyűjtő romániai szakaszán ejtve. A Kárpát-medencétől délre fekvő területeken a többi évszakban is a pozitív hibák jellemzők, míg az Adriai-tenger partvonala, valamint az Alpok és az Appenninek, mentén az alábecslés dominál. Az RCA-szimulációk jó példái annak, hogy különböző határfeltételek alkalmazása jelentős eltérésekhez is vezethet a regionális modelleredményekben: a BCM eredmények figyelembevételével készített kísérlet lényegében a megfigyeléseknél szisztematikusan melegebb éghajlatot mutat, míg az ECHAM határfeltételekkel az eredmények évszakonként változó sikerrel adják vissza a közelmúltbeli viszonyokat, s nyáron az alábecslés jellemző. A peremfeltételek fontosságát jól mutatja, hogy egyes évszakokban nagyobb a különbség a két RCA-szimuláció, mint a két ECHAM-meghajtású kísérlet eredményei között.



**3. ábra.** A szimulált éves és évszakos átlaghőmérsékletek eltérése [ $^{\circ}\text{C}$ -ban] az ECA referencia-adatbázistól négy regionális éghajlati modell eredményei alapján az 1961–1990 időszakra.

A csapadék esetében az eredmények megfigyelésektől vett eltérései lényegesen nagyobb mértékűek, mint a hőmérsékletnél. A modellek alapvetően fölébecslik az évszakos mennyiségeket (egyedül nyáron mutatkozik alábecslés a délkeleti területek felett), ezzel éves szinten pozitív hibát eredményezve a tartomány nagy részén. Ennél problémásabb a csapadék-klimatológia, azaz az éves menet szimulációja: a modellek többsége képes a leginkább és a legkevésbé csapadékos hónapokat reprodukálni, vannak azonban olyan kísérletek és régiók, ahol ez nem sikerül. Például a vizsgált Duna-részvízgyűjtőn a RACMO modell egy teljesen egyenletes éves eloszlást jelez az itt jellemző markáns nyári maximum és téli-tavaszi eleji minimum helyett (**4. ábra** bal panel). Magyarország területét ugyanez tapasztalható (**4. ábra** jobb panel): az ECHAM határfeltételek figyelembevételével készült RCA és RACMO szimulációk nem képesek az ismert évi menetet visszatükrözni. A két RCA-kísérlet különbsége ezúttal is szembeötlő, az ECHAM-meghajtású eredményekkel

ellentétben a BCM peremfeltételekkel a regionális modell reális éves eloszlást produkál mindkét vizsgált terület felett.



**4. ábra.** A havi csapadékösszeg [mm-ben] átlagos évi menete az 1961–1990 időszakban az ENSEMBLES projekt négy regionális éghajlati modelljének eredményei alapján két területre: a Duna felső és középső vízgyűjtő-területére (bal panel), valamint Magyarországra (jobb panel). A referenciát az ECA megfigyelési adatbázis szolgáltatja (barna szaggatott görbe).

### Összefoglalás

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál két kutatásban veszünk részt az ENSEMBLES projekt regionális modelleredményeire támaszkodva. Ezek alkalmazásával az alapvető célunk az, hogy meghatározzuk, a hazánkban rendelkezésre álló regionális klímaprojekciók mekkora részt ölelnek fel az éghajlati szimulációk „globális” bizonytalanságából (természetesen az ENSEMBLES projekt modelleredményei a teljes spektrumnak szintén csak egy részét fedik le). Ennek első lépéseként megvizsgáljuk, hogy az OMSZ-nál alkalmazott ALADIN-Climate és REMO modellek eredményeit kiegészítve a „testvérmodelljeik” (azaz más intézetekben használt ALADIN-Climate és REMO modellek) európai szimulációival, milyen képet kapunk a Kárpát-medencében a 21. században várható éghajlati viszonyokról. A vizsgálatokat a modellek 1961–1990 időszakra vonatkozó eredményeinek kiértékelésével kezdtük, ugyanis figyelembe véve, hogy ezek a modellek Magyarországon is rendelkezésre állnak, a validáció segítségünkre lehet a későbbi fejlesztésekben. Az ECCONET projekt keretében történő kutatásban az ENSEMBLES projekt azon regionális modelleredményeivel foglalkozunk, amelyek a jövőbeli hidrológiai viszonyok szempontjából egy-egy szélsőséget képviselnek: a Duna és a Rajna folyók vízgyűjtője felett a legkisebb, illetve a legnagyobb változást mutatják az évszázad közepi 2021–2050 és a századvégi 2071–2100 időszakra vonatkozóan. A modellválasztást az ECCONET projekt célkitűzése indokolta, nevezetesen az éghajlatváltozás belvízi hajózásra gyakorolt hatásainak elemzése az említett két folyó mentén. A „reprezentatív” modell-szimulációk vizsgálatával lehetővé válik az



ENSEMBLES által lefedett bizonytalansági intervallum feltérképezése, az egyik legnehezebben modellezhető meteorológiai változó, a csapadék szempontjából. A kiértékelést ebben az esetben is a validációval kezdtük, amihez ugyancsak az ECA megfigyelési adatbázis 1961–1990 időszakra vonatkozó adatsora szolgáltatta a viszonyítási alapot.

Az ALADIN és a REMO eredmények átfogó elemzése megmutatta, hogy az ENSEMBLES keretében végrehajtott ALADIN-Climate modell-szimulációkat Magyarországra vonatkozóan kisebb (és esetenként eltérő előjelű) csapadékhiba terheli, mint azt a hazai modellváltozat esetében tapasztaltuk. Ugyanarról a modellverzióról lévén szó, ez az eredmény megerősíti azt a korábbi feltételezést, hogy a magyarországi 10 km-es felbontású ALADIN-Climate szimulációk esetében túlságosan leszűkítettük az integrálási tartományt. Az optimális terület meghatározásához érzékenységi vizsgálatok elvégzését tervezzük. A REMO-modell eredményeit vizsgálva megállapíthattuk, hogy megfigyelés-alapú (re-analízis) határfeltételeket alkalmazva az ENSEMBLES projektben használt REMO 5.7 modellváltozat kisebb hőmérsékleti hibákat produkál, mint a hazai (és egyben korábbi) 5.0 verzió. A regionális modell fejlesztése tehát ebben a tekintetben sikeres volt, hasonló javulás azonban nem látható a csapadékeredményeknél (itt felhívjuk a figyelmet arra, hogy ezek a kiértékelések nem ugyanazon referencia-adatsor felhasználásával készültek, mint Szabó et al., 2011 és Horányi et al., 2011 írásaiban). Érdekes továbbá, hogy a modell 5.7 verziójának éghajlatváltozási szimulációjában (amelyben az ECHAM globális modell szolgáltatta a nagyskálájú kényszerek leírását) a hőmérsékleti eredményekre továbbra is hasonló hibával terheltek, mint a re-analízis meghajtású esetben, míg a régebbi változattal készült hazai kísérletben az eredmények csak kis hibát hordoztak Magyarország területére. Mindez tehát azt igazolja, hogy a regionális modellek és a nagyskálájú viszonyok leírását biztosító globális éghajlati modellek közötti kölcsönhatás a regionális modell hibáit felerősítheti, de gyengítheti is, s ennek a közös hatásnak a számszerűsítése a rendszer nem-linearitása miatt elemi úton nem lehetséges. Éppen ezért nem elegendő csupán az egyik fejlesztése, az eredmények javításához és a bizonytalanság csökkentéséhez a regionális és a globális modelleket együtt kell fejleszteni.

Az ECCONET projekt keretében végrehajtott vizsgálat megmutatta, hogy nemcsak a jövőbeli csapadék-projekciókat terheli nagy bizonytalanság, de a modelleredmények már a múltira vonatkozóan is jelentős eltéréseket mutatnak, amikor pedig a szimulációkban még nem kell számolni az emberi tevékenység nem ismert alakulásával. A kiértékelés is bizonyította tehát amit a bevezetőben említettünk, mégpedig azt, hogy a hőmérséklettel szemben a csapadék-szimulációk bizonytalansága elsősorban a modellfejlesztés által csökkenthető.

Nyilvánvaló, hogy validációs vizsgálatok során feltárt modellgyengeségek elfogadható mértékűre csökkentéséhez is több évtizedes kutató-fejlesztői munka szükséges. A jövőbeli tendenciák megismerésére vonatkozó igények viszont az elmúlt években egyre sürgetőbbek lettek, kérdés tehát, hogyan tudjuk a múltbeli időszak vizsgálatának eredményeit a jövőbeli projekciók értékelésénél felhasználni, felhasználnjuk-e őket egyáltalán. Alapvetően két megközelítés ismeretes:

1. A validáció során feltárt hibákat korrigálják a múltbeli mérések figyelembevételével, s ezt a mérések és a múltbeli szimulációs eredmények

statisztikai kapcsolatára épülő korrekciót alkalmazzák a jövőre vonatkozó eredményekre is. Ennek a módszernek az egyik gyengesége, hogy feltételezi, a modell az integrálás során mindvégig ugyanazokkal a hiba-tulajdonságokkal rendelkezik, mint amit a múltbeli időszakban megállapítottak. Azonban Christensen et al. (2009) vizsgálatai bizonyították, hogy a szimulációk minősége függ a leírni kívánt változó értékétől is; például egy melegebb időszak (vagy egy melegedő éghajlat) modellezésénél az eredmények nagyobb hibával terheltek, mint az alacsonyabb szimulált értékeknél. Másrészt ez a módszer nem támogatja, hogy megértsük, a modellek működésének mely része okozza a hibákat, mert az eredmények statisztikai utó-feldolgozása során elvesz az a fizikai konzisztencia, ami ezt lehetővé tenné, s ennek hiányában ezek az eredmények további dinamikus (például hidrológiai) modellekhez sem szolgáltathatnak kiindulási feltételeket.

2. A másik megközelítésben nem az éghajlati modellek közvetlen eredményei (például szimulált hőmérsékletértékek) segítségével jellemzik az éghajlatot, hanem a változás mértékével (azaz a példánk esetében a hőmérsékletváltozással). Ekkor a változást a modell egy múltbeli referencia-időszakra vonatkozó átlagához viszonyítják, azaz kivonják egymásból a jövőre és a múltra szimulált átlagértékeket, s a hibákat e különbségképzéssel kiküszöbölik. A módszer szintén él azzal a feltételezéssel, hogy a modell hiba-tulajdonságai az integrálási időtáv során változatlanok maradnak, viszont a szimulált értékekbe nem kerül a modelltől „idegen” információ, azaz nem sérül a modell által meghatározott dinamikai konzisztencia. Emiatt a modellező szakemberek előnyben részesítik ezt a megközelítést, s az Országos Meteorológiai Szolgálatnál is ezt alkalmazzuk.

A cikkben az Országos Meteorológiai Szolgálatnál az ENSEMBLES modellkísérletekre alapozott kutatások eddig elért eredményeit mutattuk be, ezzel azonban nem értek véget a vizsgálatok. Az ALADIN és REMO modellekkel kapcsolatos elemzéseket folytatjuk a jövőre vonatkozó eredményekkel, továbbá terveink között szerepel a RegCM-eredmények bevonása is a vizsgálatokba – ezzel lehetővé válna teljesebb képet kapnunk a hazánkban alkalmazott regionális modellekből képzett mini-ensemble (Horányi et al., 2011) eredményeinek hátteréről, ami segítségünkre lehet a fejlesztésben. Az ECCONET projekt keretében megkezdett vizsgálatokat szintén kiterjesztjük a 21. századi eredményekkel annak érdekében, hogy el tudjuk helyezni az említett magyarországi mini-ensemble eredményeit a jelenlegi európai regionális modellek segítségével lefedett teljes bizonytalansági térben.

### ***Köszönetnyilvánítás***

A jelen cikkben bemutatott munkákhoz szükséges megfigyelési adatokat és regionális modelleredményeket az ENSEMBLES projekt biztosította. A kutatások egy részét az EU 7. keretprogramja által finanszírozott ECCONET (233886) projekt támogatásával hajtottuk végre.

## *Irodalomjegyzék*

- Christensen, J.H., Boberg, F., Lucas-Picher, Ph., and Christensen, O.B., 2009: Will future summer time temperatures go berserk? *Conference Proceedings on 2nd International Lund RCM Workshop* (Eds: B. Rockel, L. Barring, M. Reckermann), ISSN 1681-6471, International Baltex Secretariat, Geesthacht, Germany, 188–189.
- Collins, M., Booth, B.B.B., Harris, G.R., Murphy, J.M., Sexton, D.M.H., and Webb, M.J., 2006: Towards Quantifying Uncertainty in Transient Climate Change. *Climate Dynamics* **27**, 127–147.
- Giorgi, F. and Bates, G., 1989: The Climatological Skill of a Regional Model over Complex Terrain. *Monthly Weather Review* **117**, 2325–2347.
- Götz G., 2006: Az éghajlat dinamikájának néhány nyitott kérdéséről. *31. Meteorológiai Tudományos Napok, beszámolókötet*, 10–61.
- Hagemann, S., Machenhauer, B., Jones, R., Christensen, O.B., Déqué, M., Jacob, D., and Vidale, P.L., 2004: Evaluation of Water and Energy Budgets in Regional Climate Models Applied Over Europe. *Climate Dynamics* **23**, 547–567.
- Hawkins, E. and Sutton, R., 2009: The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of American Meteorological Society* **90**, 1095–1107.
- Hawkins, E. and Sutton, R., 2010: The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics*, in press, doi: 10.1007/s00382-010-0810-6.
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D., and New, M., 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res. (Atmospheres)* **113**, D20119, doi: 10.1029/2008JD10201.
- Horányi A., Bartholy J., Krüzelyi I., Pieczka I., Pongrácz R., Szabó P., Szépszó G. és Torma Cs., 2011: A hazai regionális klímamodellek eredményeinek együttes kiértékelése. *36. Meteorológiai Tudományos Napok, beszámolókötet*.
- Jacob, D., 2001: A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics* **77**, 1–4, 61–73.
- Kjellström, E., Bärring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., Samuelsson, P., Rummukainen, M., Ullerstig, A., Willén, U., and Wyser, K., 2005: A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). *Reports Meteorology and Climatology* **108**, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Sweden, 54 pp.
- Lenderink, G., van den Hurk, B., van Meijgaard, E., van Ulden, A., and Cuijpers, J., 2003: Simulation of present-day climate in RACMO2: first results and model developments. *KNMI (Royal Netherlands Meteorological Institute) Technical Report* **252**, 24 pp.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S.,

- Victor, N., and Dadi, Z., 2000: IPCC special report on emissions scenarios. Cambridge University Press, Cambridge.
- Pongrácz R., Bartholy J., Pieczka I. és Torma Cs., 2011: Az ELTE regionális klímamodelljei: PRECIS és RegCM. *36. Meteorológiai Tudományos Napok, beszámolókötet.*
- Sieck, K., Lorenz, P. and Jacob, D., 2008: Variability in ensemble simulations due to domain shifts in the regional climate model REMO. *EMS8/ECAC7 Abstracts 5*, EMS2008-A-00530.
- Spiridonov, V., Somot, S. and Déqué, M., 2005: ALADIN-Climate: from the origins to present date. *ALADIN Newsletter 29*, 89–92.
- Szabó P., Horányi A., Krüzselyi I. és Szépszó G., 2011: Az Országos Meteorológiai Szolgálat regionális klímamodellezési tevékenysége: ALADIN-Climate és REMO. *36. Meteorológiai Tudományos Napok, beszámolókötet.*
- Uppala, S. M., Källberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., Van De Berg, L.; Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, L., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., and Woollen, J., 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 131*, 2961–3012.
- van der Linden, P. and Mitchell, J.F.B. (eds.), 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter EX1 3PB, UK.

# A szélsőségek várható alakulása a Kárpát-medence térségében az ENSEMBLES projekt eredményei alapján

Pieczka Ildikó, Pongrácz Rita, Bartholy Judit, Kis Anna és Miklós Erika

ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék  
1117 Budapest Pázmány P. s. 1/a.; email: pieczka@nimbus.elte.hu

**Összefoglaló** – Mivel a klímamodellek csak bizonyos hibával terheltlen képesek megadni az éghajlati paraméterek várható abszolút értékét (melynek a szélsőségek vizsgálatakor, azokra való felkészüléskor, tervezéskor különös jelentősége van), egy korrekciós módszer segítségével megkíséreltük ezen hibák csökkentését, kiküszöbölését. Az így kapott mezősorok felhasználásával különböző éghajlati extrém indexeket határoztunk meg, majd ezen indexek jövőben várható alakulását, tendenciáit elemeztük. Az eredmények alapján a pozitív hőmérsékleti extrémumok XXI. századi szignifikáns gyakoriságnövekedésére, s a negatív extrémumok előfordulásának csökkenésére számíthatunk. A csapadék esetén nagyobb a projekciók bizonytalansága. A felhasznált modellszimulációk szélsőségesebb csapadékviszonyokat, intenzívebb esőzéseket, ugyanakkor hosszabb és gyakoribb száraz időszakokat valószínűsítene az elkövetkező évtizedekre. A vizsgálataink alapján várható változások a társadalom egésze és a gazdaság számos ágazata számára komoly alkalmazkodást, s a tervezési stratégiák átgondolását igénylik.

## **Bevezetés**

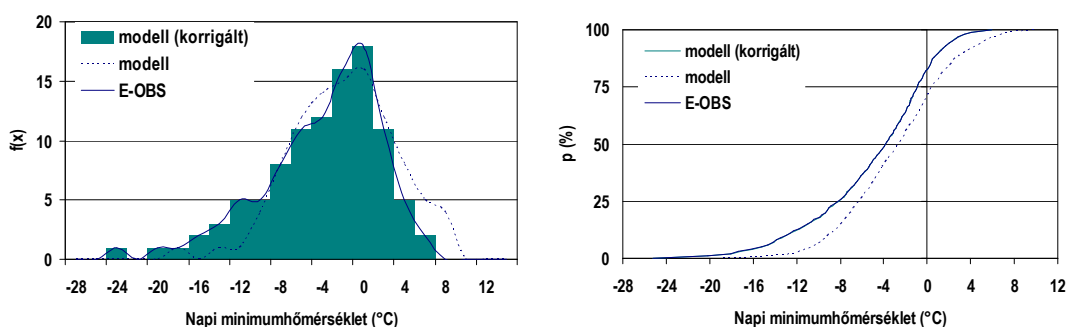
Az 1990-es évek elejére egyértelművé vált, hogy a globális éghajlati modellekkel készített klímabecslések pontossága regionális térskálán nem megfelelő, s e probléma megoldására fejlesztették ki a globális skálájú modellek eredményeiből kiinduló regionális leskálázás módszertanát (*Giorgi, 1990*). Az ún. beágyazott modellekkel való szimuláció során a globális modellek eredményeit bemenő paraméterként felhasználva korlátos tartományú regionális modellek írják le a finomabb skálájú légköri folyamatokat.

Az EU VI. program keretében 2004-2009 között futó, átfogó ENSEMBLES projekt során 25 km-es horizontális felbontást alkalmazó regionális klímamodellek 1951-2100 közötti szimulációit készítették el a teljes európai térségre (*van der Linden & Mitchell, 2009*). A szimulációk mindegyike a közepesnek tekinthető A1B scenáriót (*Nakicenovic & Swart, 2000*) vette figyelembe. Ez a globális emisszió-scenárió azt feltételezi, hogy a Föld teljes népessége néhány évtizeden belül mintegy 9 milliárdra növekszik, majd ezt követően a XXI. század végére fokozatosan 7 milliárdra csökken. Az A1B scenárió gyors gazdasági és technológiai fejlődést prognosztizál, valamint a légköri szén-dioxid-koncentráció valamelyest lassuló ütemű növekedését, mely 2100-ra meghaladhatja a 715 ppm-et.

Cikkünkben a Kárpát-medence térségére elemezzük a szélsőséges hőmérsékleti és csapadékviszonyok éves és évszakos skálán várható változását a finomabb térbeli felbontású regionális modell-outputok felhasználásával. Elsőként a hibakorrekció alapjául szolgáló módszert és az extrémumok számításához alkalmazott indexeket mutatjuk be. A cikk második felében ismertetjük a 2021-2050, illetve 2071-2100 időszakra kapott éves és évszakos hőmérsékleti- és csapadékextrémumokra vonatkozó kutatásunk eddigi eredményeit.

## Felhasznált adatok, módszerek

Vizsgálataink elvégzéséhez az ENSEMBLES projekt (*van der Linden & Mitchell, 2009*) 25 km-es horizontális felbontású regionális klímamodell-eredményeit használtuk fel, melyek a <http://ensembles-eu.metoffice.com/> oldalról érhetők el. Jelen cikkünkben három regionális klímamodell: az ALADIN (*Farda et al., 2009*), a RegCM (*Giorgi & Mearns, 1999*) és a PROMES (*Castro et al., 1993*) eredményei alapján készült elemzéseinket mutatjuk be. A fenti három modell kiválasztásakor azt az elvet tartottuk szem előtt, hogy segítségükkel lefedjük a globális modell megválasztásából adódó bizonytalanságoknak a lehetőségekhez mérten minél teljesebb intervallumát (az ENSEMBLES projektben a francia ARPEGE (*Gibelin & Déqué, 2003*), a hamburgi ECHAM (*Roeckner et al., 2006*), valamint a brit HadCM3 (*Gordon et al., 2000*) globális modelleket használták meghajtó modellként). A modellfutások az ALADIN és a RegCM esetében az 1951-2100 időszakra, a PROMES esetében az 1951-2050 időszakra vonatkoznak, így lehetőségünk van két jövőbeli időszak: egy közelebbi (2021-2050), és egy távolabbi (2071-2100) vizsgálatára. A validációhoz, hibakorrekciónak szükséges megfigyelésként az ENSEMBLES projekt keretében előállított E-OBS (*Haylock et al., 2008*) adatokat használtuk fel, amely rácspontokra interpolált mezősorokat tartalmaz napi felbontásban 1951-2009 között. Vizsgálataink során a változásokat az 1961-1990-es bázisidőszaktól vett (abszolút, illetve relatív) eltérésként definiáltuk. A felhasznált szimulációs adatbázisok a csapadékot, valamint a minimum- és a maximumhőmérsékletet napi felbontásban tartalmazzák.



**1. ábra.** Januári minimumhőmérséklet egy adott rácspontra vonatkozó empirikus sűrűség- és eloszlásfüggvénye - a modell korrigálatlan és korrigált értékei, az E-OBS adatbázisából származó értékekkel összehasonlítva.

Mivel a klímamodellek csak bizonyos hibával terheltlen képesek megadni az éghajlati paraméterek várható abszolút értékét (*Christensen et al., 2008*), ezért a szimulált idősorok statisztikai módszeren alapuló korrigálására volt szükség. A hibakorrekciónak eljárásával csökkentettük a meteorológiai mezősor hibáit. Erre a célra egy olyan módszert alkalmaztunk, mely a meteorológiai változók percentilis értékeinek kiszámításán, és a modellezett eloszlásnak a megfigyelt eloszláshoz való illesztésén alapul (*Formayer & Haas, 2010*). A módszer lényege, hogy két adathalmaz statisztikai szempontból közel egyezőnek tekinthető, amennyiben eloszlásuk megegyezik (*Déqué, 2007*). Az eloszlásfüggvény alakjára nézve a módszer semmilyen előzetes feltételezést nem követel meg. Az eloszlások illesztéséhez használt függvényt több módon is definiálhatjuk – mi a

minimum- és maximumhőmérsékletek esetén additív, a csapadék esetén pedig multiplikatív összefüggést alkalmaztunk. A korrekciós faktorokat minden rácspontra, az év 12 hónapjára külön-külön meghatároztuk. Példaként az *1. ábrán* bemutatjuk egy kiválasztott rácspontra vonatkozóan a januári minimumhőmérséklet korrekciójának eredményességét. Míg a modell eredetileg alulbecsülte az alacsonyabb, és felülbecsülte a magasabb hőmérsékletek előfordulását, addig a korrekció alkalmazása után már jó egyezést mutat a megfigyelt értékekkel, az empirikus eloszlásfüggvények tökéletesen fedik egymást.

Az itt bemutatott kutatásokban a szélsőségek elemzéséhez éghajlati extrém indexeket használtunk fel, melyek definícióját a mértékegységgel együtt az *1. táblázat* foglalja össze.

*1. táblázat. A kiszámított extrém éghajlati indexek neve, definíciója, egysége.*

	Jelölés	Index neve	Definíció	Egység
Hőmérsékleti indexek	TN-10LT	Zord napok száma	$T_{\min} < -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	FD	Fagyos napok száma	$T_{\min} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	TN10GE	10 °C-nál nagyobb minimum-hőmérsékletű napok száma	$T_{\min} \geq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	TN20GE	Túl meleg éjszakák száma	$T_{\min} \geq 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	TX-10LT	-10 °C-nál kisebb maximum-hőmérsékletű napok száma	$T_{\max} < -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	TX0LT	Téli napok száma	$T_{\max} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	TX10LT	10 °C-nál kisebb maximum-hőmérsékletű napok száma	$T_{\max} < 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	TX20GE	20 °C-nál nagyobb maximum-hőmérsékletű napok száma	$T_{\max} \geq 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	SU	Nyári napok száma	$T_{\max} \geq 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	TX30GE	Hőségnapok száma	$T_{\max} \geq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
	TX35GE	Forró napok száma	$T_{\max} \geq 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$	nap
Csapadék indexek	RR0.1	0,1 mm csapadékot meghaladó napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 0,1 \text{ mm}$	nap
	RR1	1 mm csapadékot meghaladó napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 1 \text{ mm}$	nap
	RR5	5 mm csapadékot meghaladó napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 5 \text{ mm}$	nap
	RR10	Nagy csapadékú napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 10 \text{ mm}$	nap
	RR20	Extrém csapadékú napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 20 \text{ mm}$	nap
	RX1	Az év során mért legnagyobb 1-napi csapadék	$\max(R_{\text{nap}})$ egy évben	mm
	RX5	Az év során mért legnagyobb 5-napos csapadék	$\max(R_{\text{nap}}(i, i+1, i+2, i+3, i+4))$	mm
	CDD	Egymást követő száraz napok maximális száma	$\max(k   (R_{\text{nap}} < 1 \text{ mm}))$ , ahol k egybefüggő időtartam	nap
	DD	Száraz napok éves száma	$R_{\text{nap}} < 1 \text{ mm}$	nap
	SDII	Napi csapadékintenzitási index	$R_{\text{sum}}/RR1$	mm/nap

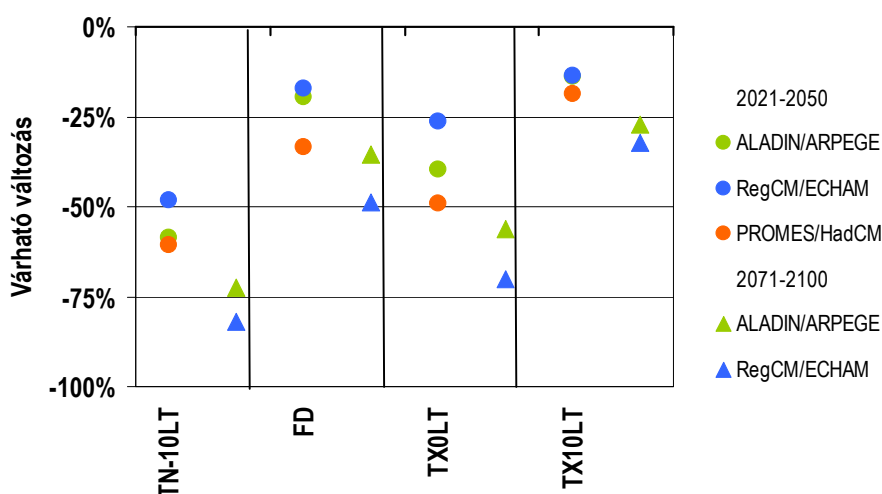
Az alkalmazott éghajlati indexeket csoportosíthatjuk aszerint, hogy mit fejezünk ki velük: hőmérséklet esetén megadott küszöbértékek átlépésével (pl. TN-10LT, FD,

TN20GT, TX0LT, SU, TX30GE, TX35GE), csapadék esetén ezen (pl. RR1, RR5, RR10, RR20) kívül intenzitással (SDII), csapadék-szélsőségekkel (RX1, RX5), valamint adott meteorológiai viszonyok fennállásának időtartamával (CDD, DD) kapcsolatos indexek vizsgálatát végeztük el. A következő fejezetben a hőmérsékleti indexek jövőben várható tendenciáit elemezzük, majd a csapadékkal kapcsolatos éghajlati indexek értékelését mutatjuk be.

### ***A hőmérsékleti szélsőségek várható alakulása***

A szélsőségek vizsgálatához kiszámítottuk az 1. táblázatban felsorolt extrém indexek várható éves és évszakos változását a 2021-2050, valamint 2071-2100 időszakokra (referencia időszak: 1961-1990), melyeket aztán térképeken ábrázoltunk. Az összesítéshez meghatároztuk a magyarországi rácspontra vonatkozó átlagos várható változások mértékét, ezeket diagramok formájában mutatjuk be.

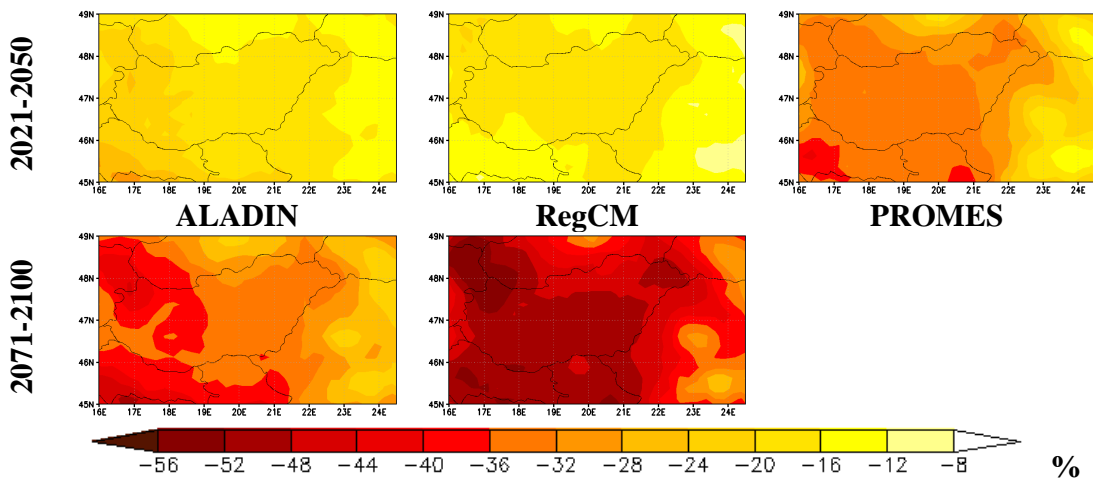
A hideg szélsőségekkel kapcsolatos hőmérsékleti indexek magyarországi átlagos változásait összegzi a 2. ábra. A grafikonról egyértelműen leolvasható, hogy mindhárom vizsgált modell eredményei alapján, minden index és évszak esetén a gyakoriság csökkenésére számíthatunk, az évszázad végére nagyobb mértékben, mint a közelebbi jövőre nézve. A statisztikai t-próba alapján 95%-os szinten szignifikánsnak bizonyuló változásokat színezett szimbólumokkal jelöltük, így jól látszik, hogy a modellszimulációk alapján valószínűsíthető változások mindegyike szignifikáns.



**2. ábra.** A hideg szélsőségekkel összefüggő éghajlati extrém index éves átlagos várható relatív megváltozása 2021-2050-re és 2071-2100-ra a három vizsgált regionális klímamodell alapján (Referencia időszak: 1961-1990)

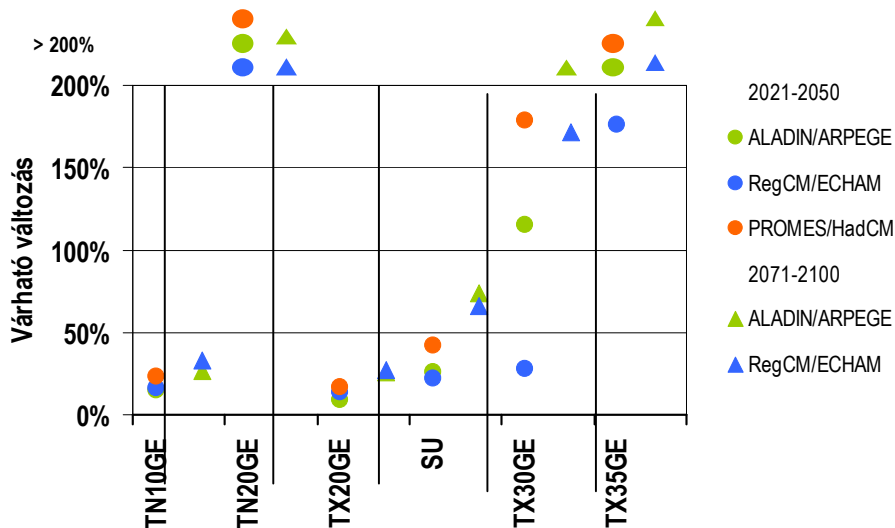
Terjedelmi okokból a bemutatott indexek közül csak egyet, a fagyos napok számának relatív megváltozását emeljük ki a térképes szemléltetéshez (3. ábra). Ez alapján egyértelműen kitűnik, hogy a modellek az évszázad végére erőteljesebb csökkenést prognosztizálnak, mint a korábbi időszakokra. Az egyes modellek eredményei némileg eltérő mértékű csökkenést valószínűsítenek, de a melegedő éghajlati viszonyokból fakadó negatív trend egyértelmű mind a három modell esetén.





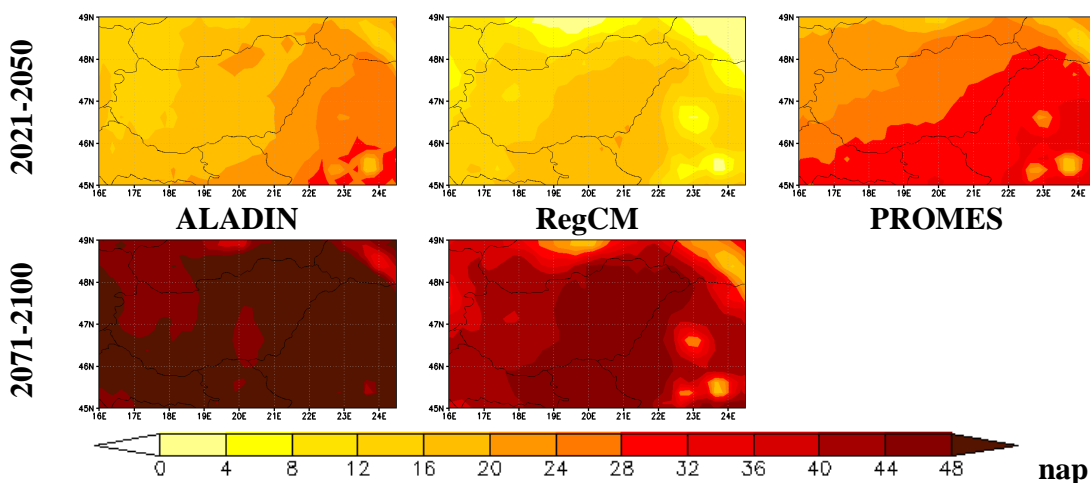
3. ábra. A fagyos napok számának várható relatív változása. (Referencia időszak: 1961-1990)

Az éghajlatváltozással kapcsolatos korábbi vizsgálatokat (Bartholy et al., 2008) a meleg szélsőségek változására kapott eredményeink (4. ábra) is alátámasztják. Minden vizsgált index esetén pozitív, szignifikáns várható változást és növekvő trendet kaptunk a XXI. század egészére a modelleredmények alapján. Azon indexek esetén, melyek a múltban csak ritkán előforduló jelenségeket fejeznek ki (mint például a túl meleg éjszakák, TX20GE, vagy a forró napok, TX35GE, száma), a jövőre vonatkozó várható változás akár a múltbeli érték többszöröse is lehet.



4. ábra. A meleg szélsőségekkel összefüggő hőmérsékleti extrém indexek éves átlagos várható relatív megváltozása 2021-2050-re és 2071-2100-ra a három vizsgált regionális klímamodell alapján. (Referencia időszak: 1961-1990)

A meleg szélsőségek közül szintén csupán egy példát (a nyári napok éves számának várható megváltozását) mutatunk be térképes formában részletezve (5. ábra). A térképekről leolvasható, hogy mindegyik modell ezen hőmérsékleti index növekedését prognosztizálja (mely a fagyos napok számának csökkenéséhez hasonlóan szintén melegedő tendenciára utal). A modellek között jól leolvasható különbségek valószínűleg a különböző meghajtó modellek közötti eltérések eredményeként jelennek meg. Az évszázad végére lényegesen nagyobb változásokat valószínűsítene a modellek, mint a 2021-2050 időszakra. Az ország egyes területei között jelentős eltérések figyelhetők meg, a legnagyobb növekedés a déli, keleti országrészben várható.



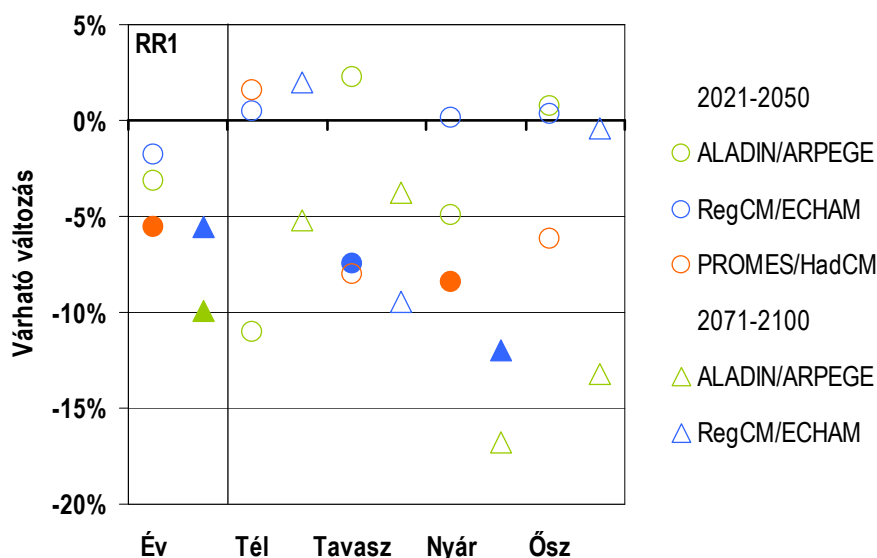
5. ábra. A nyári napok számának várható változása. (Referencia időszak: 1961-1990)

A hideg és meleg szélsőségek esetén egyaránt arra számíthatunk, hogy a mérések alapján a XX. században detektált gyakorisági tendenciák (Bartholy & Pongrácz, 2007) szinte bizonyosan folytatódnak a jövőben, s némely esetben tovább erősödhetnek.

#### A csapadékszélsőségek várható alakulása

A csapadékszélsőségekkel kapcsolatban már nem annyira egyszerűen értelmezhetőek a modelleredmények, mint a hőmérséklet esetén, ugyanis a csapadék térben és időben igen változékony elem. Magyarországon szinte bármelyik hónapban előfordulhat teljes csapadékhiány, de a nyári félévben olykor akár 200-300 mm-es havi csapadékmennyiségek is adódhatnak. Az 1 nap alatti maximális csapadékmennyiség hazánk bármely területén meghaladhatja a 100 mm-t (Ambrózy et al., 2002). Így tehát a hazai csapadék természetes változékonysága jóval nagyobb, mint a hőmérsékleté, valamint parametizációja is összetett, ami a modelleken belüli jelentős változékonyságra is magyarázatot ad. A csapadék várható változásának vizsgálatakor jóval kevesebb esetben kaptunk szignifikánsnak feltételezhető értékeket (a nem szignifikáns értékeket üres szimbólummal jelöltük az ábrákon), mint a hőmérsékleti indexek esetén.

A 6. ábra a kis csapadékkal (< 1 mm/nap) járó időjárási események várható változását mutatja be. Éves viszonylatban mindhárom vizsgált modell csökkenést valószínűsít, melyek közül az 5-10%-os mértékű várható csökkenések 95%-os szinten szignifikánsak. Az egyes évszakok és a vizsgált időszakok között jelentős eltérést figyelhetünk meg. Az eredmények alapján úgy tűnik, a várható változások nem lineárisak, sőt akár ellentétes előjelűek is lehetnek a különböző, vizsgált időszakokban. Szignifikáns várható változást csak három esetben valószínűsíthetünk az egyes évszakokban (2021-2050-re nyárra a PROMES szimuláció alapján, 2021-2050-re tavaszra és 2071-2100-ra nyárra a RegCM szimuláció alapján). Ezek mindegyike a csökkenés irányába mutat, s a várható változások nagy része szintén negatív tendenciát vetít előre. A növekedést jelző értékek egy esetben sem érik el a 3%-ot, s egyáltalán nem szignifikánsak.

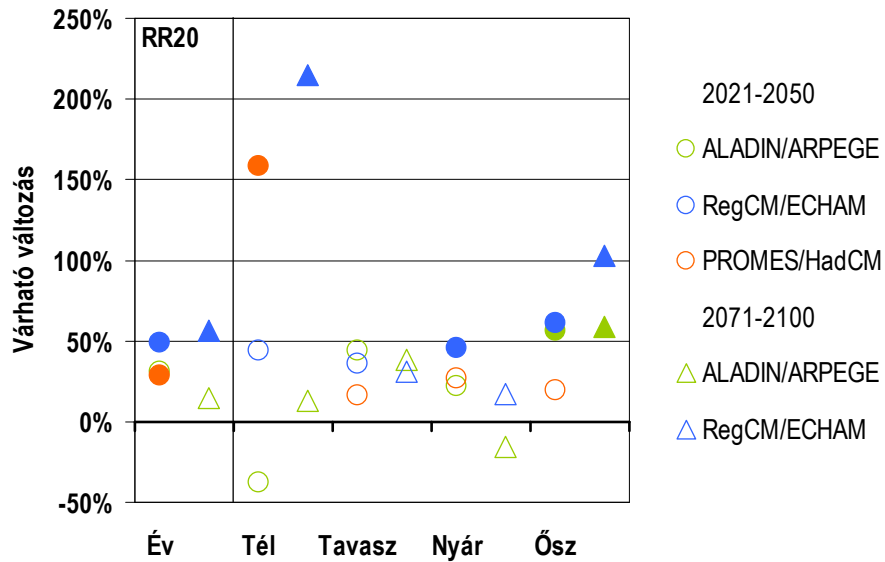


**6. ábra.** Kis csapadékkal (< 1 mm/nap) járó időjárási események várható relatív változása. (Referencia időszak: 1961-1990)

A nagy csapadékkal (> 20 mm/nap) járó időjárási események változása esetén már jóval több esetben tekinthetőek szignifikánsnak az eredmények (7. ábra). Ilyen események a múltban viszonylag ritkán fordultak elő, ennek is köszönhetőek az akár 100-200%-ot is elérő, sőt meghaladó változásértékek. Az egyes modellek becslései között nagy eltérések lehetnek, azonban egyértelműen a pozitív trend dominál, s a szignifikáns változást jelző szimulációk az indexértékek növekedését valószínűsítik mind az egyes évszakokban, mind éves átlagban.

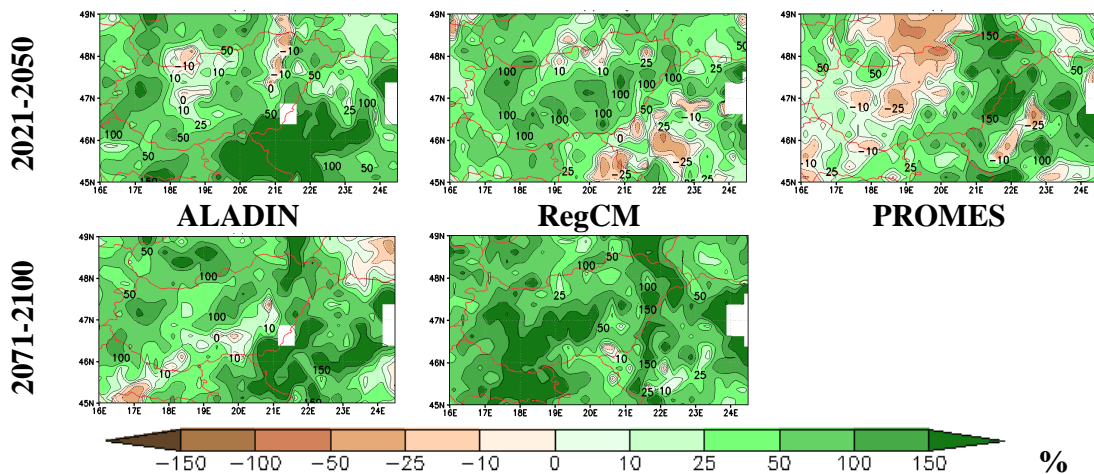
Az őszi évszakban minden vizsgált modell mindkét időszakra növekedést jelez előre a nagy csapadékkal járó események gyakoriságában, ráadásul ezen eredmények közül csak egy olyan van, mely 95%-os szinten nem tekinthető szignifikánsnak. A 8. ábra az egyes modellek által adott várható változások térbeli eloszlását jeleníti meg. A térképekről leolvasható a becsült változásmezők térbeli szerkezetének eltérése – ennek ellenére abban

megegyeznek a kapott mezők, hogy átlagosan ugyan jelentősebb növekedést becsülnek hazánk területére, de mindhárom modellszimuláció esetén előfordul néhány olyan rácspon, illetve terület, ahol a modellek az indexértékek csökkenését jelzik előre a XXI. századra.

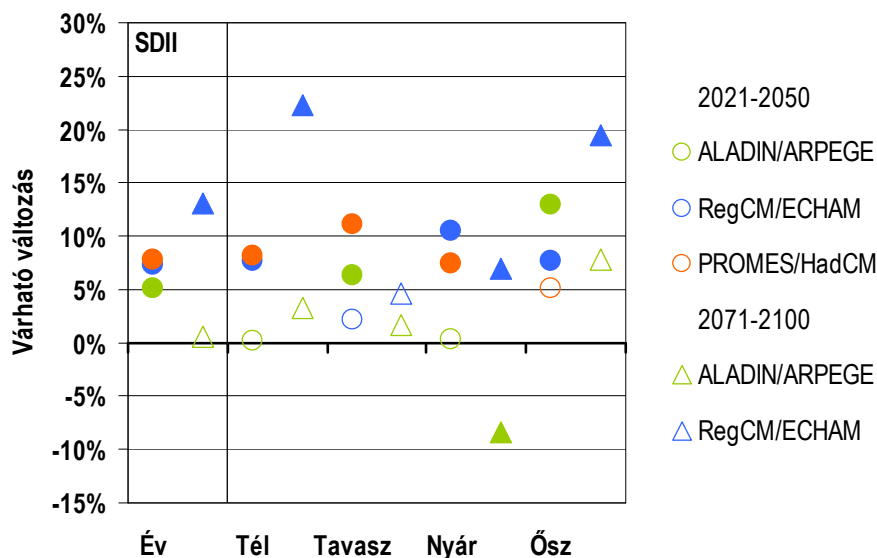


7. ábra. Nagy csapadékkal (> 20 mm/nap) járó időjárási események várható relatív változása. (Referencia időszak: 1961-1990)

A csapadék-eloszlás két szélét tekintve (6. és 7. ábra), valamint megvizsgálva a csapadék-intenzitás várható változását (9. ábra), az alábbi megállapítást tehetjük: a modelledmények a csapadék intenzitásának növekedését valószínűsítik a jövőben, a csapadék a múlthoz képest kevesebb napon fog lehullani, amely a kisebb csapadéku napok számának csökkenésével, a nagyobb csapadéku napok számának növekedésével jár együtt. Ez az intenzitás-növekedés az év minden szakaszában egyformán valószínűsíthető.



8. ábra. Nagy csapadékkal (> 20 mm/nap) járó időjárási események őszi várható relatív megváltozása. (Referencia időszak: 1961-1990)



9. ábra. Napi csapadékintenzitás várható relatív megváltozása. (Referencia időszak: 1961-1990)

### Konklúzió

Cikkünkben az ENSEMBLES-szimulációk közül három modellt (ALADIN, RegCM, PROMES) kiválasztva elemeztük az éghajlati extrém indexekben várható változást Magyarországra. Az 1951-2100 időszakra bemutatott elemzések alapján az alábbi eredmények foglalhatók össze:

- A hőmérséklet eloszlásának eltolódása valószínű: a hideg szélsőségek előfordulásának csökkenése, s a meleg szélsőségek gyakoriságnövekedése várható.
- A csapadékszélsőségek esetén a nagy természetes szórás és a modellek nagyobb változékonysága miatt nagyobbak a bizonytalanságok, kevesebb a szignifikáns várható változás.
- A kis csapadékkal járó időjárási események és a csapadékos napok számának csökkenése valószínűsíthető.
- A csapadék intenzitása és a nagy csapadékkal járó időjárási események száma várhatóan növekedni fog.
- A száraz időszakok hosszának növekedése várható.

### Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat támogatta az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával az „Európai Léptékkal a Tudásért, ELTE-TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003. A felsőoktatás minőségének javítása a kutatás-fejlesztés-innováció-oktatás fejlesztésén keresztül” pályázat, 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), valamint az Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott CCWATERS projekt (SEE/A/022/2.1/X).

### *Irodalomjegyzék*

- Ambrózy, P., Bartholy, J., Bozó, L., Hunkár, M., K.Bihari, Z., Mika, J., Németh, P., R.Paál, A., Szalai, S., Kövér, Zs., Tóth, Z., Wantuch, F., Zoboki, J., 2002: Magyarország éghajlati atlasza. OMSz, Budapest. 107p.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., 2007: Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. *Global and Planetary Change*, 57, pp. 83-95.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy., Szabó, P., 2008: Analysis of expected climate change in the Carpathian Basin using the PRUDENCE results. *Időjárás*, 112(3-4), pp. 249-264..
- Castro, M., Fernandez, C., Gaertner, M. A., 1993: Description of a meso-scale atmospheric numerical model. In: Diaz JI, Lions JL (eds) *Mathematics, climate and environment*, Masson (ISBN: 2-225-84297-3), 273p.
- Christensen, H., Boberg, F., Christensen, O.B., Lucas-Picher, P., 2008. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophysical Research Letters*, 35, L20709, doi:10.1029/2008GL035694.
- Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, pp. 16-26.
- Farda, A., Déqué, M., Somot, S., Horanyi, A., Spiridonov, V., Toth, H., 2009. The ALADIN model as a regional climate model for Central and Eastern Europe. *Studia Geophysica et Geodaetica*, submitted.
- Formayer, H., Haas, P., 2010: Correction of RegCM3 model output data using a rank matching approach applied on various meteorological parameters. In: Deliverable D3.2 RCM output localization methods (BOKU-contribution of the FP 6 CECILIA project). <http://www.cecilia-eu.org/>
- Gibelin, A. L., Déqué, M., 2003: Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Clim. Dyn.*, 20, pp. 327–339.
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *J. Clim.*, 3, pp. 941-963.
- Giorgi, F., Mearns, L. O., 1999: Introduction to special section: regional climate modeling revisited. *J. Geophys. Res.*, 104, pp. 6335–6352.
- 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, pp. 147-168.

- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D., New, M., 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201
- Nakicenovic, N., Swart, R. (eds.), 2000: Emissions Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge, UK. 570p.
- van der Linden, P., Mitchell, J.F.B. (eds.), 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp.
- Roeckner, E., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kornbluch, L., Manzini, E., Schlese, U., Schulzweida, U., 2006: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J. Climate*, 19, pp. 3771-3791.

# Az Országos Meteorológiai Szolgálat regionális klímamodellezési tevékenysége: ALADIN-Climate és REMO

Szabó Péter, Horányi András, Krüzselyi Ilona, Szépszó Gabriella

Országos Meteorológiai Szolgálat, Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztály  
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1., email: [klimadinamika@met.hu](mailto:klimadinamika@met.hu)

**Összefoglaló** – Az éghajlat regionális skálán történő, a hatásvizsgálatok és döntéshozók számára kielégítő pontosságú jövőbeli szimulációja korlátos tartományú regionális klímamodellekkel (RCM-ekkel) lehetséges. Néhány évvel ezelőtt az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) két regionális klímamodellt adaptáltunk, melyekkel képesek vagyunk a Kárpát-medencét lefedő, kvantitatív éghajlati projekciók készítésére.

Az ALADIN-Climate RCM-et az ARPEGE-Climate globális általános cirkulációs modell (GCM) és a nemzetközi együttműködésben kifejlesztett ALADIN időjárási modell alapján a Météo France dolgozta ki, míg a REMO-t a Max Planck Intézetben (Hamburg) fejlesztették ki a Német Szolgálat korábbi időjárási modellje és az ECHAM4 GCM alapján. Az ALADIN-Climate 10 és 25 km-es térbeli felbontáson áll rendelkezésünkre, melyek közül az utóbbit csak a múlt (1961-2000) egy Közép-Európát lefedő tartományra futtattuk, míg a finomabb felbontású szimuláció 1961-2100 között szolgál eredményekkel egy Kárpát-medencét lefedő területre; a REMO nagyobb tartományon, 25 km-es rácshálózaton 1951-2100 között áll rendelkezésünkre.

Mindkét modellt először a múlt éghajlatára teszteltük, melyekhez az ECMWF által készített ERA-40 re-analízist használtuk nagyskálájú kényszerként, és az eredményeket egy megfigyelési adatbázissal hasonlítottuk össze. A jövőbeli projekciók készítéséhez természetesen nem állnak rendelkezésünkre megfigyelések, így GCM-ek eredményei adták a modelljeinkhez szükséges külső kényszereket.

Az alábbi dolgozatban röviden ismertetjük az OMSZ Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztály klímadinamikai tevékenységének történetét, és az ott alkalmazott regionális modellek jellemzőit, majd az éghajlat átlagos viselkedésének szemszögéből egy megfigyelési adatbázishoz viszonyítva bemutatjuk azok múltja történetét, továbbá elemezzük a jövőbeli projekciók és trendek eredményeit mind az átlagos, mind pedig az extrém viszonyokra. A projekciókban rejlő bizonytalanságok jellemzésére a két modell együttes kiértékelése mellett a statisztikai szignifikancia-vizsgálatok eredményeit is bemutatjuk.

## 1. Bevezetés

A klímaváltozással foglalkozó kutatók legnagyobb része egyetért abban, hogy az éghajlati rendszer egésze (azaz a légkör és az őt körülvevő további négy szféra, úgy mint óceán, szárazföld, jégtaaró és élővilág a köztük lévő kölcsönhatásokkal együtt) és különösen annak fejlődése egyedül globális cirkulációs modellekkel (GCM) írható le. Ezek azok az eszközök, amelyek az éghajlatot komplex egészként tekintik és képesek annak dinamikus leírására, azaz a globális éghajlat egy külső kényszerre (pl. az üvegházgáz-koncentráció megváltozására) adott válaszána leírására. A GCM-ek rendkívül számításgényesek, mivel a Föld egészének éghajlatát hivatottak leírni, de ez egyben a korlátjuk is, hisz nem képesek a kisebb skálájú részletek pontos leírására. A globális átlaghőmérséklet növekedését például mindenki elismeri, de vajon mi a helyzet a Föld különböző régióival? Erre a kérdésre regionális éghajlati modellek (RCM-ek) alkalmazásával adhatunk kielégítő választ. Az RCM-ek nagyobb térbeli felbontásukkal, a felszíni viszonyok pontosabb figyelembevételével és a kisebb skálájú folyamatok megbízható parametrizációjával képesek leírni a regionális viszonyokból adódó



változásokat úgy, hogy a globális modellek által leírt nagyskálájú jellemzőket oldalsó peremfeltételekként veszik figyelembe. Ezek a változások, elsősorban a csapadékot tekintve, akár a globálissal ellentétes irányúak is lehetnek. Magyarországon is egyre többen (szakemberek és döntéshozók) elismerik az RCM-ek fontosságát és a bennük rejlő egyedüli lehetőséget az éghajlat regionális szintű jellemzésére, és ily módon egyre többen alkalmazzák a regionális klímamodellek eredményeit az éghajlattal kapcsolatos elemzésekhez (mindezekről bővebben: Szépszó és Zsebeházi, 2011).

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) 2003 közepén fogalmazódott meg az a gondolat, hogy a hagyományos statisztikai éghajlat-vizsgálatok mellett dinamikai alapú kutatások is legyenek, melyhez a szükséges számítógépes háttér és a megfelelő szakmai tapasztalat már rendelkezésre állt. A megkezdett munka következményeként 2005 és 2007 között valósult meg egy klímadinamikai projekt a Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Program (NKFP) keretein belül ([http://www.met.hu/palyazat/nkfp\\_klima2005.php](http://www.met.hu/palyazat/nkfp_klima2005.php)) a következő címmel: „Magyarország éghajlatának dinamikai vizsgálata, és a numerikus modelleken alapuló regionális klíma-előrejelzések módszertanának megalapozása”. A projekt folyamán két-két regionális éghajlati modellt adaptáltunk: a REMO és ALADIN-Climate modelleket az OMSZ Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztályán (a modellek bemutatását lásd a cikk egy későbbi fejezetében), míg a RegCM és PRECIS modelleket az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén (Pongrácz et al., 2011). Az európai eredmények szintézise és a hazai intézetek modellezési tevékenységének megkezdése mellett a projekt lehetőséget biztosított az első saját modellfuttatások eredményeinek publikálására is.

A hazai NKFP programban végzett kutatások megteremtették az alapokat Európai Unió projektjeihez való kapcsolódásra is. A CLAVIER projektben (<http://www.clavier.eu.org>; 2006 szeptemberétől 2009 augusztusáig), a 25 km-es horizontális rácsfelbontású REMO modellel vettünk részt, míg a CECILIA projektben (<http://www.cecilia-eu.org>; 2006 májusától 2009 decemberéig) a 10 km-es ALADIN-Climate modell szimulációit használtuk.

A nemzetközi szinten való megjelenésünk további mérföldköve volt, hogy az OMSZ egy saját kezdeményezésű mini-workshopot szervezett 2008 februárjában Budapesten, ahol elsősorban a CLAVIER és CECILIA projekt résztvevői számolhattak be arról, hol is tart a klímamodellezési tevékenységük. Ennek a rendezvénynek az Időjárás című angol nyelvű, lektorált és impakt faktorról is rendelkező folyóirat egy különszámot is szentelt (Special Issue: Workshop on Regional Climate Modeling; [http://www.met.hu/download.php?file=IDOJARAS\\_vol112\\_No3-4&id=1&type=1](http://www.met.hu/download.php?file=IDOJARAS_vol112_No3-4&id=1&type=1)). A fentiek mellett 2009 júniusában egy nemzetközi Nyári Iskolát szerveztünk Visegrádon, amelyen a neves meghívott előadók mellett számos fiatal kutató vett részt azzal a céllal, hogy elsősorban elméleti klímadinamikai ismereteiket mélyítsék el (Climate Variability and Climate Change: Estimating and Reducing Uncertainties; <http://www.met.hu/seminars/ss2009.php>).

A fent említett NKFP program lezárása után merült fel az a gondolat, hogy az OMSZ és az ELTE közösen hozzon létre egy regionális klímamodellezési mini-ensemble-t, amelynek tagjai a négy hazánkban adaptált klímamodellel (ALADIN-Climate, PRECIS, RegCM és REMO). Ennek keretében a két intézmény az említett modellek közös kiértékelését és ezen keresztül a klímamodellekben rejlő bizonytalanságok számszerűsítését

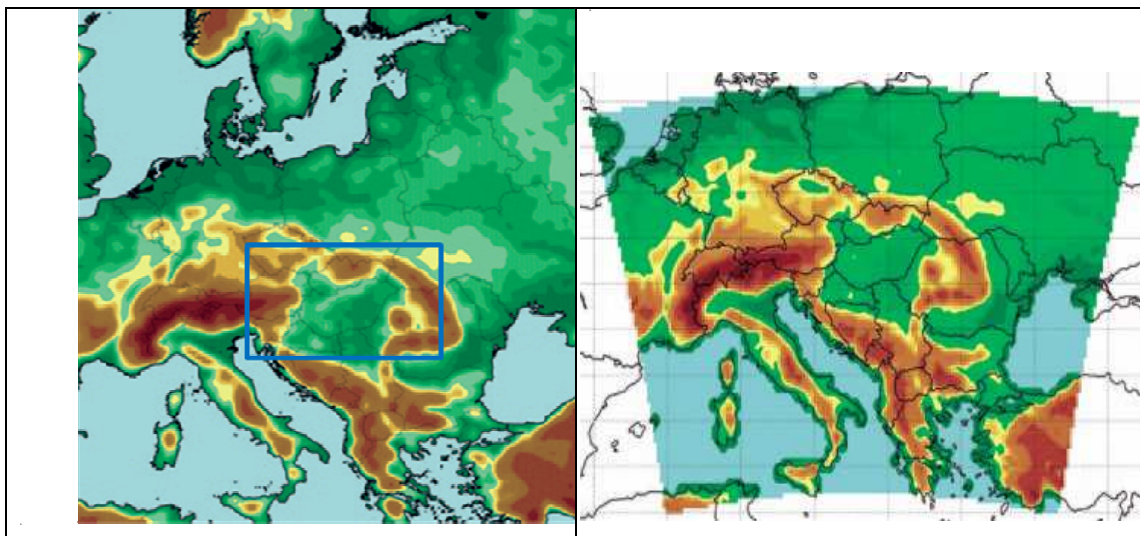
tűzte ki feladatul (az eredményekről bővebben: Horányi et al., 2011), hogy így egységes képet adhassunk a felhasználók számára a Magyarországra várható klímaváltozás tekintetében. Ami a kapcsolódó szakmai tevékenységet illeti, meg kell említeni, hogy az éghajlati hatásvizsgálati elemzések során a megfelelő értelmezés és felhasználás érdekében az OMSZ nemcsak adatokat ad át, hanem szakértői tevékenységet is folytat a klímamodelljeink alkalmazása és alkalmazhatósága vonatkozásában. Ezért törekszünk az éghajlatváltozás hatásait vizsgáló szakemberekkel folyamatos és kétoldalú (konzultatív) kapcsolatok kiépítésére és fenntartására.

A jelen cikkben először az OMSZ-nál használt két regionális klímamodellt mutatjuk be, majd azok múltira vonatkozó tesztelését, végül pedig a projekciós eredményeiket közöljük.

## **2. Az OMSZ regionális klímamodelljei**

Az OMSZ-ban az elmúlt néhány évben két regionális klímamodellt adaptáltunk: (1) az ALADIN-Climate (4.5 verzió, Spiridonov et al., 2005; Farda et al., 2010) RCM-et az ARPEGE-Climate (Royer et al., 2002) légkör-óceán általános cirkulációs modell (AOGCM) alapján a Météo France által nemzetközi együttműködésben fejlesztették ki; (2) a REMO modell (5.0 verzió, Jacob, 2001) a Deutscher Wetterdienst operatív időjárási előrejelző modellje és az ECHAM4 (Roeckner et al., 1996) AOGCM ötvözésével született meg a Max Planck Intézetben. Ennek következtében természetesen a modellek eltérő dinamikával rendelkeznek és különböző fizikai parametrizációs eljárásokat tartalmaznak. Ezek jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze. A modellszimulációk 10 és 25 km-es rácson állnak rendelkezésre az ALADIN-Climate esetében, míg 25 km-es felbontással a REMO esetében. A modellek integrálási területeit és a kapcsolódó modell-domborzatokat az 1. ábrán láthatjuk.

A modelleket először a múltira (1961–1990 időszakra) vonatkozóan teszteltük úgy, hogy azok határfeltételeit egy megfigyeléseken alapuló, de előrejelzéseket is felhasználó ún. re-analízis adatbázis adta (így a modelljeink számára „tökéletes” peremfeltételeket biztosítottunk). A re-analíziseket a 125 km-es horizontális felbontású ERA-40 adatbázis (Uppala et al., 2005) jelentette. Mivel a jövőre természetesen semmilyen megfigyelési jellegű információnk nincs, így a jövőre vonatkozó projekciók esetében globális modelleket használunk a regionális modellek nagyskálájú kényszereiként, melyek az ALADIN-Climate esetében 50 km-en, míg a REMO esetében 200 km-es felbontáson állnak rendelkezésünkre (sorrendben) az ARPEGE-Climate és az ECHAM5/MPI-OM modellszimulációkból. A jövőre, egészen 2100-ig vett futtatásaink során az A1B, átlagosnak tartott üvegházgáz-kibocsátási forgatókönyvet használtuk (Nakicenovic és Swart, 2000). A modellszimulációk néhány jellemzőjét az 2. táblázat foglalja össze.



**1. ábra.** A modellkísérletek integrálási területei: balra az ALADIN-Climate 25 (teljes panel) és 10 km-es (kék téglalap) felbontású, jobbra a REMO 25 km-es felbontású tartománya.

**1. táblázat.** Az alkalmazott regionális klímamodellek legfontosabb jellemzői.

	<b>ALADIN-Climate 4.5</b>	<b>REMO 5.0</b>
Kiindulási modell	Dinamika: ALADIN LAM* Fizika: ARPEGE-Climate AGCM**	Dinamika: Europa Modell LAM* Fizika: ECHAM4 AGCM**
<b>Dinamika</b>		
Horizontális térbeli deriváltak reprezentációja	Spektrális	Rácsponiti
Vertikális koordináta rendszer	Felszínkövető-nyomási hibrid	
Hidrosztatikus közelítés	Hidrosztatikus	
Prognosztikai változók	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hőmérséklet</li> <li>• Horizontális szél</li> <li>• Specifikus légnedvesség</li> <li>• Felszíni nyomás</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hőmérséklet</li> <li>• Horizontális szél</li> <li>• Specifikus légnedvesség</li> <li>• Felhő-víz-tartalom</li> <li>• Felszíni nyomás</li> </ul>
Időbeli sémák	Szemi-implicit + szemi-Lagrange	Explicit leapfrog + szemi-implicit korrekció
<b>Fizikai parametizációk</b>		
Sugárzás	Fouquart és Bonnel, Morcrette	
Talajmodell	ISBA	Warrilow
Talajrétegek száma	4 (hőmérsékletre) és 2 (nedvességre)	5
Csapadék és felhőzet	Smith, Ricard és Royer	Sundquist, Roeckner
Konvekció	Bougeault	Tiedtke, Nordeng

\* LAM: Limited Area Model – korlátos tartományú modell

\*\* AGCM: Atmospheric General Circulation Model – légköri általános cirkulációs modell

**2. táblázat.** A regionális modellekkel végrehajtott kísérletek legfontosabb jellemzői.

	ALADIN-Climate 4.5			REMO 5.0	
<b>Szimuláció azonosítója</b>	AL_ERA_25	AL_ERA_10	AL_ARP_10	REMO_ERA_25	REMO_ECH_25
<b>Időszak</b>	1961–2000	1961–2000	1961–2100	1961–2000	1951–2100
<b>Horizontális térbeli felbontás</b>	25 km	10 km	10 km	25 km	25 km
<b>Függőleges szintek száma</b>	31	31	31	20	20
<b>Modelltartomány</b>	Közép- és Kelet-Európa	Kárpát-medence	Kárpát-medence	Közép- és Kelet-Európa	Közép- és Kelet-Európa
<b>Határfeltételek</b>	ERA-40 re-analízis	ERA-40 re-analízis	ARPEGE-Climate/OPA AOGCM	ERA-40 re-analízis	ECHAM5/MPI-OM AOGCM
<b>Határfeltételek felbontása</b>	125 km	125 km	50 km	125 km	200 km
<b>Projekciók forgatókönyvei</b>	-	-	A1B	-	A1B

### 3. Validációs eredmények

A jövőbeli éghajlatváltozás értelmezéséhez elengedhetetlen a regionális klímamodellek múltira vonatkozó validációja, s így az ahhoz használt optimális referencia (megfigyelési) adatbázis megválasztása (azaz mely rendelkezésre álló megfigyelési adatokat tekintjük a legalkalmasabbnak a modelljeink múltbeli hibáinak feltérképezéséhez). Az OMSZ több európai intézettel egyetemben a CRU TS 1.2 elnevezésű, 16 km-es horizontális felbontású rácsra interpolált adatbázist használja, melyet a Kelet-Angliai Egyetem Éghajlatkutató Intézetében hoztak létre (Mitchell et al., 2004).

A modellek viselkedését elsősorban az évszakos és éves átlaghőmérséklet és csapadékösszeg szempontjából vizsgáltuk. A modellekben alkalmazott különböző parametrizációs technikák és numerikus módszerek következtében a modellek a kvázi-tökéletes ERA-40 re-analízis adatbázis határfeltételeivel meghajtva is egymástól eltérő eredményeket produkáltak, mely a modellek viselkedéséről ad képet, és a modellfejlesztéshez nyújt segítséget. Ezzel szemben a modelleket a GCM-ekkel meghajtva azok viselkedésén túl a gyengeségek és erősségek a meghajtó globális határfeltételeket is jellemzik, hiszen ezek nem megfigyeléseken alapuló peremfeltételek, hanem szimulációk eredményei. Az utóbbi esetben az eredmények csak hosszabb időszak átlagában értékelhetőek, az egyes évek nem azonosíthatóak külön-külön, hiszen a peremfeltételek nem írják le a valós időjárási eseményeket ellentétben az ERA-40-es kísérletekkel, ahol az adatsor korrelál a megfigyelésekkel.

A hőmérsékletre vonatkozó 1961–1990 közti eredmények CRU adatbázistól vett Magyarország területére számított eltéréseit a 3. táblázatban láthatjuk. A REMO tökéletes

peremfeltétellel futtatva minden évszakban erősen felülbecsli a hőmérsékletet, ezzel szemben a GCM meghajtású szimulációja a legjobb eredményt produkálja. Az ALADIN-Climate modell a nyarat kivéve mindig hidegebb, mint a megfigyelés, ez az eltérés főleg az átmeneti évszakokban erős. A REMO\_ERA\_25 és AL\_ARP\_10 szimulációkat kivéve a nyári átlaghőmérsékletek a legjobban becsült értékek, míg az említett szimulációk esetében a téli átlaghőmérsékletek közelítik leginkább a valóságot.

**3. táblázat.** A hőmérsékletre vonatkozó szimulációs eredmények CRU-adatbázistól vett eltérése az 1961–1990 időszakban Magyarország területére (°C). Az 1 foknál nagyobb alá-/fölébecslést kék/piros színnel emeltük ki.

Szimuláció azonosítója	Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
AL_ERA_25	-1,1	-2,0	-0,3	-1,6	-0,7
AL_ERA_10	-1,5	-2,1	-0,6	-2,7	-0,9
AL_ARP_10	-0,8	-2,0	1,1	-2,7	0,1
REMO_ERA_25	2,0	1,4	3,4	2,5	0,4
REMO_ECH_25	-0,01	-0,4	-0,05	-0,1	0,3

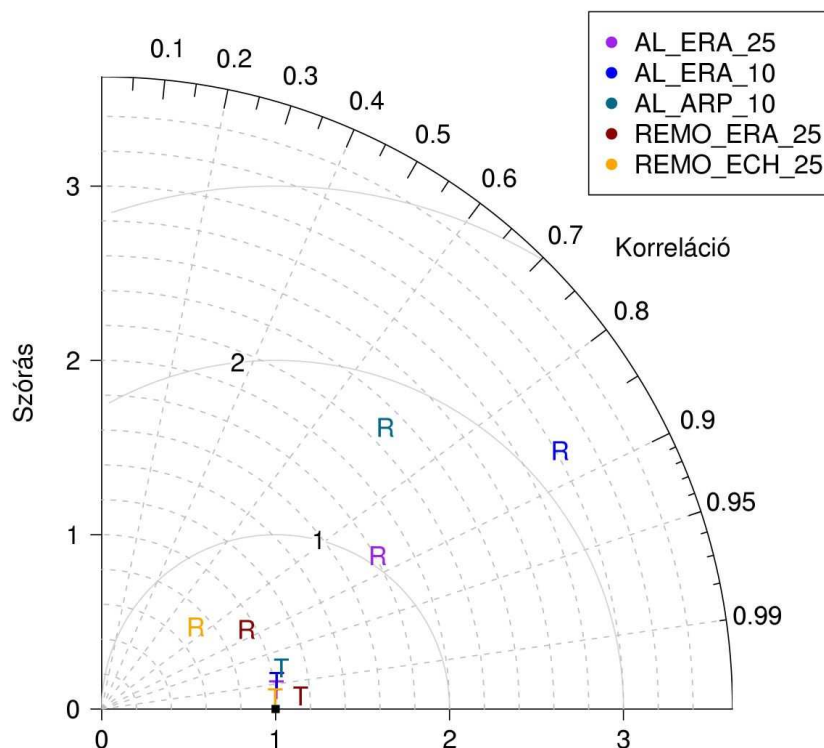
A csapadékra vonatkozó eredményekből (4. táblázat) egyértelműen látszik, hogy a szimulációk országos szinten inkább nedvesek, mint szárazak. Ez főleg tavasszal és nyáron jelentkezik, de a REMO kísérletek nyáron némi alulbecslést mutatnak. A modellek leginkább a téli értékekben állnak közel a megfigyeléshez, míg ősszel jobbra gyenge alulbecslést szimulálnak. Az ALADIN-Climate szimulációk a tavaszi és nyári felülbecslésnek köszönhetően rosszabbul teljesítenek, mint a REMO. A modellek alapvetően a kisebb csapadékeseményekből jóval többet adnak, mint a valóság, míg a nagy esők számát alulbecslik a szimulációk, azaz a modellek „szitálnak” (erről ábrát nem mutatunk).

**4. táblázat.** A csapadékra vonatkozó szimulációs eredmények CRU-adatbázistól vett eltérése az 1961–1990 időszakban Magyarország területére (mm/hónap). A 10 mm/hónapnál nagyobb alá-/fölébecslést sárga/zöld színnel emeltük ki.

Szimuláció azonosítója	Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
AL_ERA_25	15,3	31,1	22,1	3,6	4,5
AL_ERA_10	18,7	33,4	49,9	-8,5	0,1
AL_ARP_10	9,3	31,7	15,1	-10,2	0,8
REMO_ERA_25	-0,8	6,1	-5,4	-7,5	3,5
REMO_ECH_25	7,7	16,8	-1,9	7,5	8,1

A hőmérséklet és csapadék együttes hibáinak komplex összehasonlítására alkalmas eszköz a Taylor-diagram (Taylor, 2001), hiszen ez a megfigyeléshez viszonyított szórás és normalizált négyzetes hiba mellett a modellszimulációk referenciához vett korrelációját is

megmutatja. A 2. ábrán jól látszik, hogy a hőmérsékleti szimulációk jóval megbízhatóbbak (magas korrelációval és a megfigyelésekhez közeli szórásértékekkel), mint a csapadékra vonatkozóak, illetve elsősorban a csapadék esetében a GCM meghajtású változatok rosszabbul teljesítenek, mint az ERA-40-esek, és a legkisebb korrelációs értékeket is az AL\_ARP\_10 és REMO\_ECH\_25 kísérletek adják. A REMO szimulációi általában jobbák, mint az ALADIN eredmények.



**2. ábra.** Taylor-diagram a különböző modellszimulációkra Magyarország területére a csapadék és a hőmérséklet havi eloszlása esetén. A „T” betűk a hőmérsékletet, az „R” betűk a csapadékot jelölik. A fekete pont jelöli a CRU megfigyelést.

A validációs eredményekről bővebb információkat Csima és Horányi (2008), valamint Szépszó és Horányi (2008) cikkek tartalmaznak. A modellek kiértékeléséből jól látható, hogy azok viselkedése összetett – akár az ERA-40, akár a GCM meghajtású szimulációkat véve vannak olyan aspektusok, amelyekben jól, míg másokban rosszabbul teljesítenek, illetve a kétfajta futtatás több esetben ellentmondó eredményekhez vezet, ily módon a modellfejlesztés pontos irányának meghatározása egyáltalán nem egyszerű feladat. Jogosan merül fel a kérdés, hogy mit tegyünk azokkal a modellekkel, amelyek pontatlanok a múltra nézve, illetve egyáltalán mikor számít rossznak egy modell, és mikor gondoljuk, hogy a modell pontossága már megfelelő. A jövőbeli projekciós eredmények interpretálásakor a delta-módszert alkalmazva a múltbeli eredményekhez viszonyítva adjuk meg az eredményeket (ekkor azzal a vitatható feltételezéssel élünk, hogy a múltban és a jövőben egyaránt hasonló hiba-eloszlás a jellemző).

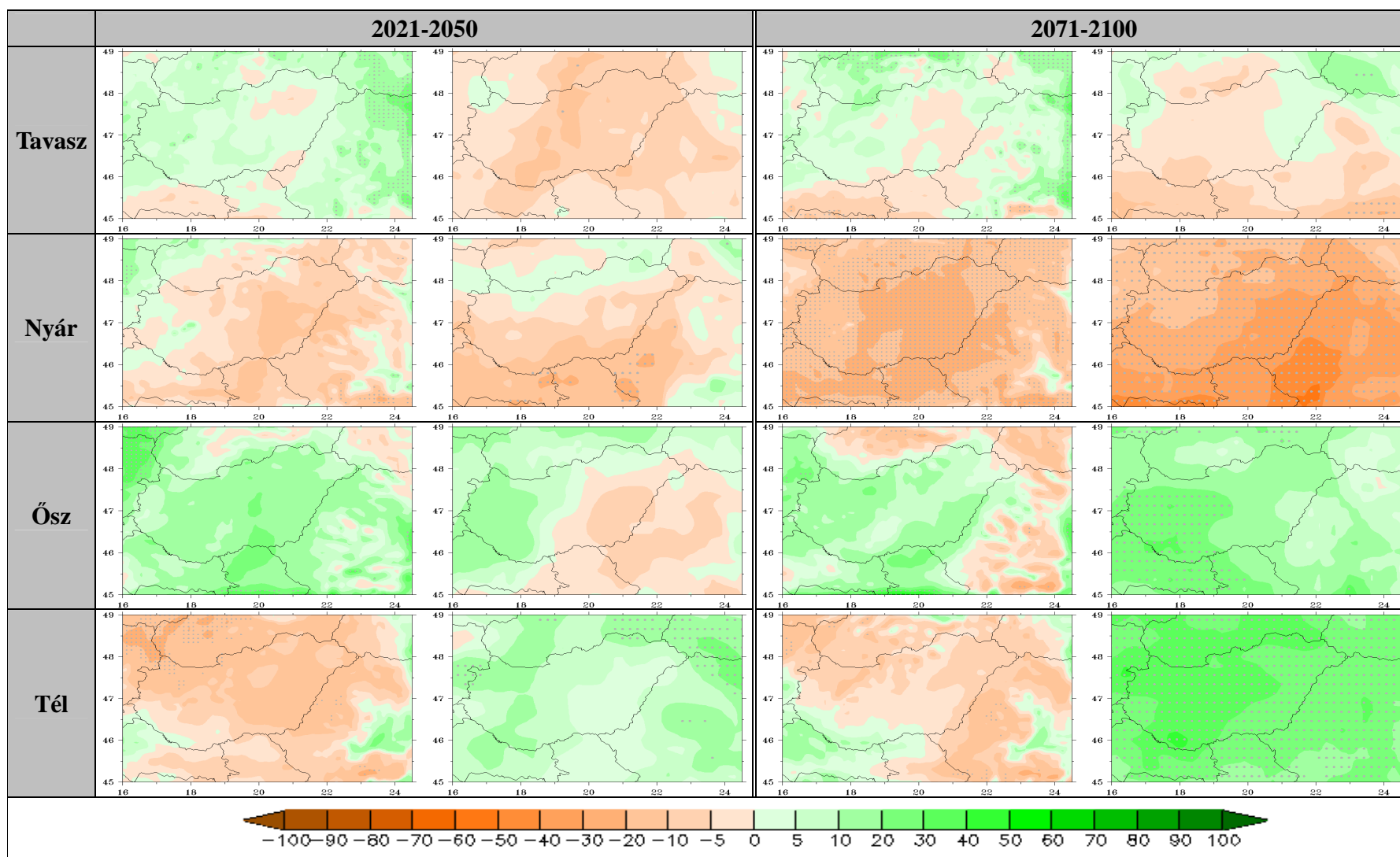
#### 4. Projekciós eredmények

A korábbi európai modelleredményekhez (Christensen és Christensen, 2007; van der Linden és Mitchell, 2009) hasonlóan a magyarországi szimulációk is egyetértenek abban, hogy a hőmérséklet emelkedése folytatódik a XXI. század végéig, ám ez a melegedés várhatóan nem lesz lineáris: a század közepi 1,4 – 1,9 °C-os évi átlagos magyarországi melegedés a század végére 3,5 °C-nak adódik. Az éves és évszakos melegedés mértékét a 5. táblázatban foglaljuk össze a XXI. század két 30 éves időszakára. A modelleket nem nevesítjük (nincs jelentősége, hogy melyik modell adott nagyobb vagy kisebb változási értéket), hanem egy intervallummal jelöljük ki a változás bizonytalanságának mértékét. Ezen eredmények természetesen nem jelentik azt, hogy nem lesznek a jövőben olyan évek, amikor az 1961–1990-es időszaknál hűvösebb évszakokat vagy éveket fogunk átélni. A legnagyobb melegedést a modellek nyárra „prognosztizálják”, míg a legkisebbet alapvetően tavaszra. A modellek közötti bizonytalanság a kezdeti időszakban télen, míg a század végi időszakban ősszel a legkisebb, míg a legnagyobb szórást a korábbi időszakban nyáron illetve a későbbiben télen tapasztalhatjuk. Jellemző az országon belüli ÉNy-DK-felé növekvő mértékű melegedés; emellett az eredmények mindenütt statisztikailag szignifikánsnak bizonyultak (ezekről ábrát nem mutatunk).

**5. táblázat.** A 2021–2050-re és 2071–2100-ra várható magyarországi hőmérséklet-változás (°C) 1961–1990-hez képest az ALADIN-Climate és REMO modelleredmények alapján

Időszak	Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
2021–2050	1,4 – 1,9	1,1 – 1,6	1,4 – 2,6	1,6 – 2,0	1,3
2071–2100	3,5	2,3 – 3,1	4,1 – 4,9	3,6 – 3,8	2,5 – 3,9

A csapadék tekintetében sokkal árnyaltabb a kép (3. ábra), hiszen amellett, hogy Magyarország éghajlatát tekintve alapvetően három éghajlati terület határán húzódik, a szimulált éves változások is zömmel az ország területére helyezik a csapadék-növekedés és csökkenés határát (és a fő kérdés így módon az, hogy hol fog pontosan húzódni a csapadék változatlanosságát kijelölő zóna). A 2021–2050-re és 2071–2100-ra Magyarországra várható csapadék-változást az 1961–1990-hez képest az 6. táblázat foglalja össze. Míg éves összeget tekintve csak kis mértékű változások várhatók az országban, addig évszakos szinten a csapadék kisebb átrendeződése várható (nem biztos, hogy sokéves átlagban a nyár lesz a legcsapadékosabb évszakunk, és ez főleg a század végére igaz). Az országra alapvetően a nyári csökkenés és őszi növekedés a jellemző mindkét időszakra, de mindez statisztikailag inkább csak a XXI. század végére szignifikáns. Míg korábbi modelleredmények (Christensen és Christensen, 2007; Bartholy et al., 2008; van der Linden és Mitchell, 2009) az évszázad végére a növekedést téldre jelezték, addig saját modelljeink erre az évszakra egymással ellentétes véleményen vannak, azaz a bizonytalanság meglehetősen nagy (a század közepére a csökkenést jelző modell ad nagyobb értéket, míg a végére a növekedés nagyobb. Bár a délnyugati területeken mindkét modellben a növekedés a jellemző, illetve ez a növekedés a század végére szignifikáns. A tavaszi változások kicsik és bizonytalanok (noha az ÉNY-i növekedésben egyetértenek a modellek).



**3. ábra.** A modelleredmények alapján várható évszakos csapadékösszeg relatív megváltozása (%) az 1961–1990 modellbeli referencia-időszakhoz képest a 2021–2050 és 2071–2100 időszakban. A statisztikailag szignifikáns területeket szürke pontok jelzik.

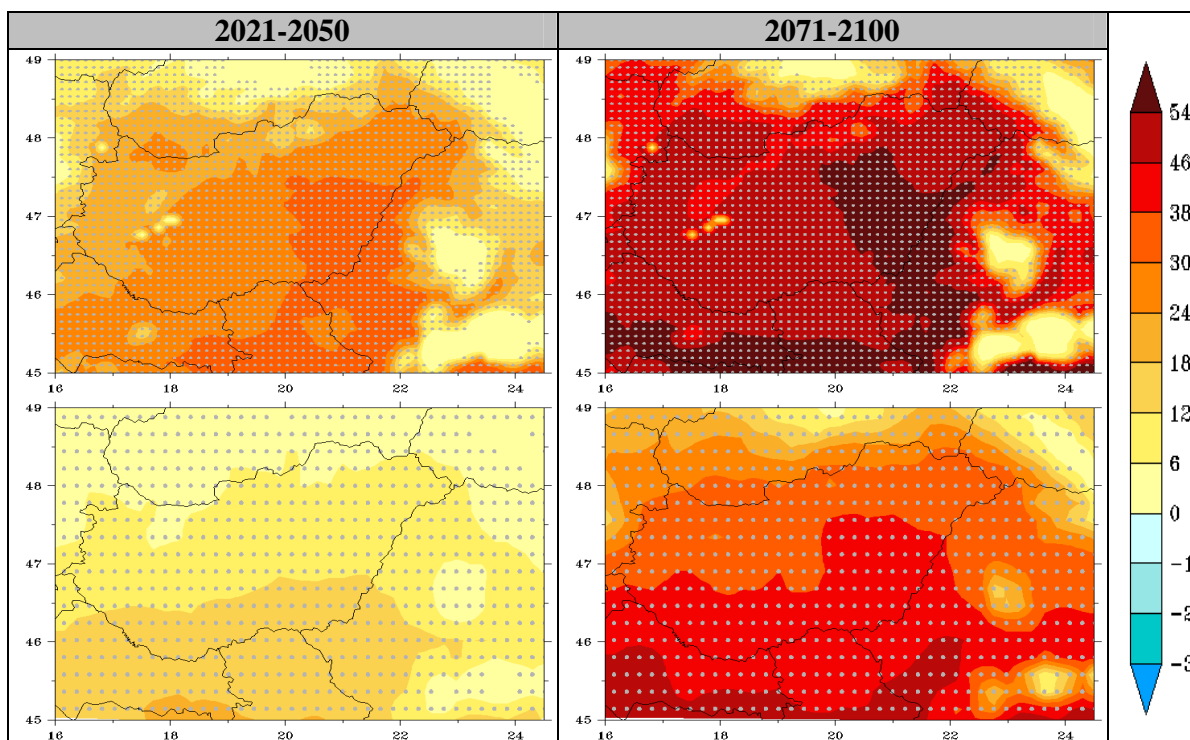


**6. táblázat.** A 2021–2050-re és 2071–2100-ra várható magyarországi csapadék-változás (%) 1961–1990-hez képest az ALADIN-Climate és REMO modelleredmények alapján.

Időszak	Éves	Tavaszi	Nyár	Ősz	Tél
2021–2050	-1 – 0	-7 – +3	-5	+3 – +14	-10 – +7
2071–2100	-5 – +3	-2 – +2	-26 – -20	+10 – +19	-3 – +31

A szélsőségek változásának elemzése tovább árnyalhatja az átlagos viselkedés alapján kialakított képet. Először a hőmérsékleti szélsőségekre vonatkozó eredményeket vizsgáljuk, majd röviden a szélsőségesen nagy és kicsapadékokról teszünk említést.

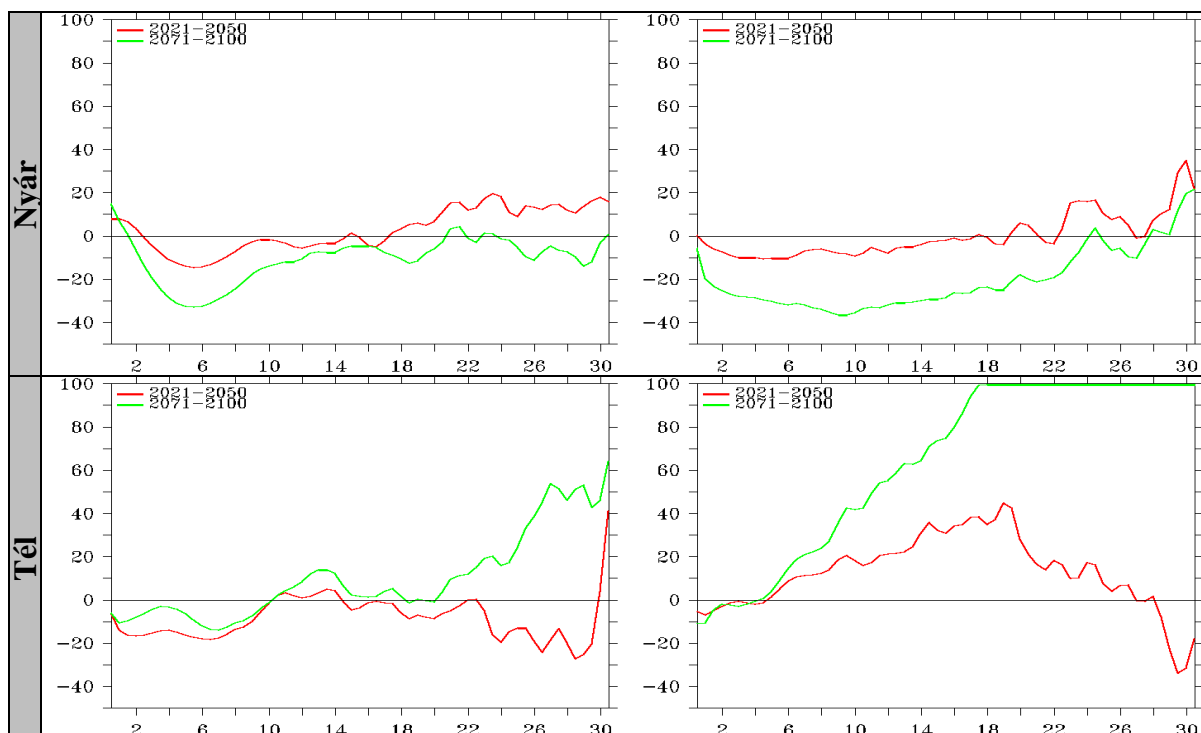
A fagyos napok ( $T_{\min} < 0\text{ °C}$ ) éves száma a jelenlegi nagyjából 95 napról a közeli jövőre 15–20 nappal, míg a távoli jövőre 35–45 nappal csökken (erről ábrát nem mutatunk). Az évszázad végére a leghidegebb,  $-15\text{ °C}$  alatti hőmérsékleti tartomány el is tűnik az ország területéről a modellek szerint. A meleg szélsőségek várhatóan a hidegeknél nagyobb mértékben növekednek majd: a hőségnapok ( $T_{\max} > 30\text{ °C}$ ) átlagos éves számának változását a 4. ábrán láthatjuk. A jelenlegi évi 15 körüli nap a XXI. század második negyedére várhatóan 10–20 nappal, míg annak végére 35–45 nappal növekszik. Jellemző az ÉNy-DK irányú erőteljesebb növekedés és az ország területén mindenütt szignifikáns mértékű változás.



**4. ábra.** A hőségnapok ( $T_{\max} > 30\text{ °C}$ ) átlagos éves számának változása (nap) az ALADIN-Climate és REMO modellek alapján az 1961–1990 modellbeli referencia-időszakhoz képest 2021–2050-re és 2071–2100-ra. A szürke pontok a statisztikailag szignifikáns területek.

A csapadék extrémumok az átlagos viszonyokhoz hasonlóan kevésbé jeleznek statisztikailag szignifikáns és egységes képet, ám a változás jellemző irányjaiban a modellek alapvetően egyetértenek. A „száraz” események minden évszakban és időszakban növekednek (kivéve 2021–2050-es időszak tavaszai, erről ábrát nem mutatunk), de a változások csak az ország déli felén és a második időszakban szignifikánsak.

A modelleredmények alapján a nyári és téli 1 és 30 mm közötti napi csapadékmennyiségek változását (%-ban kifejezve) az 5. ábra mutatja be (tulajdonképpen a csapadék évszagos éghajlati eloszlásfüggvényének változását láthatjuk itt). Azért ezt a két évszakot választottuk, mert ezekre korábbi tanulmányok (Pongrácz et al., 2009) ellentétes irányú változásokat jeleztek. Ezzel szemben a két modell eredményei alapján nyáron szinte az összes esemény csökkenésével számolhatunk (a közelebbi időszak nagycsapadékait kivéve). Alapvetően a távolabbi jövőre erőteljesebb változások várhatóak, és a modellek közötti egyetértés is nagyobb, míg a téli nagycsapadékokban ellentétes kép mutatkozik a két jövőbeli időszak között. A 2071–2100-es időszakban télen a kis csapadékú események gyakorisága csökken, míg a nagycsapadékok (a 10mm-es határtól kezdődően) száma növekszik (ez főleg az ősze igaz). Mindebből az következik, hogy a csapadék intenzitása alapvetően minden évszakban növekszik majd (nyáron bizonytalan), ám csak a második időszakra lesz szignifikáns, és főleg ősszel (és télen) jelentősebb mértékű. Ez utóbbi eredmény teljesen új és némileg meglepő, hisz alapvetően a csapadékintenzitás növekedését a közvélemény a nyári zivatarok hevességének erősödésével azonosítja, ugyanakkor most láthatjuk, hogy ez inkább az őszi és téli időszakra lesz jellemző.



**5. ábra.** Az ALADIN-Climate és REMO alapján a nyári és téli napi csapadékmennyiségek változása (%) a modellbeli 1961-1990 referencia időszakhoz képest 2021–2050 és 2071–2100-ra. A vízszintes tengely a napi csapadékmennyiséget jelöli Magyarországra.

## 5. Összefoglalás

Az OMSZ két modelljének múltbeli validációján és jövőbeli projekcióján túl a Szolgálat regionális klímamodellezéshez kapcsolódó tevékenységét írtuk le röviden a jelen cikkben. Az alábbiakban összefoglaljuk, hogy milyen következtetéseket vonhatunk le klímamodelljeink eredményei alapján.

Az ALADIN-Climate szimulációk mindig hűvösebbek, mint a megfigyelés, míg a REMO megfigyelés-alapú határfeltétellel meghajtva túl meleg, globális klímamodellel szimulált peremfeltételeket használva pedig a legjobb eredményt adja. Az extrém hidegekből kevesebbet, extrém melegekből többet jeleznek a modellek, mint a valóság (erről ábrát nem mutattunk be), mely egyfajta eltolt éghajlati sűrűségfüggvényre enged következtetni. A modellek általában túl nedvesek, de nem minden esetben: ősszel szárazabbak, mint a megfigyelés. A kisebb csapadékeseményekből többet, míg a nagy esőkből kevesebbet adnak a szimulációk, azaz a modellek „szitálnak”.

A szimulációs hibák kiküszöbölésének egyik módja, hogy feltételezzük, hogy a jövőbeli hiba azonos marad a múltbelihez képest, s így a delta-módszert alkalmazva a jövőbeli modelleredményeket a múltbeli modellszimulációkhoz viszonyítva mutattuk be. A modelljeink által projektált melegedés a XXI. század második negyedére és utolsó harmadára nyáron tűnik a legerősebbnek, míg télen a legkisebbnek. A változás időben nem lineáris, hiszen a második időszakra erőteljesebb melegedést várunk. Jellemző az országon belüli ÉNy-DK-felé növekvő mértékű melegedés. A hőmérséklettel kapcsolatos eredmények mindenütt statisztikailag szignifikánsnak bizonyultak. A hideg szélsőségek gyakorisága várhatóan csökken (erről ábrát nem mutattunk be), míg a meleg száma ennél nagyobb mértékben nő majd.

A csapadék éghajlati skálán történő szimulációja az operatív időjárás előrejelzéshez hasonlóan nehezebb és kevésbé egyértelmű, mint a hőmérséklet esetében: az éves csapadékösszegben csak kis változás valószínű, míg ősszel-télen (de egyértelműen csak ősszel) inkább növekedés, nyáron csökkenés, tavasszal bizonytalanság a jellemző. A közelebbi jövőre bizonytalanabbak a változások, míg a távoli jövőre már többször statisztikailag szignifikánsak az eredmények (főleg nyáron). A csapadékiintenzitás növekedése csak a második időszakra tűnik szignifikánsnak, és főleg ősszel és télen (eddig ezt nyárra várták a szakemberek), míg a száraz napok bizonytalanul változnak majd, de nyáron szignifikáns növekedést várunk (erről ábrát nem mutattunk be).

Terveink között szerepel, hogy jobb (újabb) modellváltozatokkal új futtatásokat hajtsunk végre: a REMO esetében finomabb, 10 km-es felbontású, míg az ALADIN-Climate esetében optimális (nagyobb) tartományon szeretnénk elvégezni a szimulációkat. A fentiek mellett és a szimulációs eredményeinken alapuló hatásvizsgálati kutatásokban való aktív részvételen túl szeretnénk az eredményeinket kibővíteni az ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com/>) projekt szimulációival is, annak érdekében, hogy megvizsgáljuk, hogy saját modelljeink hogyan írják le a projekciós bizonytalansági intervallum jellemzőit, illetve melyek azok a különbségek, amelyek többlet információt szolgáltatnak az ENSEMBLES vizsgálatokhoz képest.

## ***Köszönetnyilvánítás***

A szerzők köszönetüket fejezik ki Csima Gabriellának, Lőrincz Andreának és Tóth Helgának az ALADIN-Climate modellel kapcsolatos vizsgálatokban való részvételükért. Köszönet illeti továbbá a Météo France és a hamburgi Max Planck Intézet kollégáit azért, hogy az ALADIN-Climate és a REMO regionális modelleket rendelkezésünkre bocsátották, valamint az adaptációban és egyéb vizsgálatokban nyújtott segítségükért.

## ***Irodalomjegyzék***

- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy., Szabó, P., 2008: Analysis of expected climate change in the Carpathian Basin using the PRUDENCE results. *Időjárás* 112 (3-4), 249-264.
- Csima, G., Horányi, A., 2008: Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service, *Időjárás* 112 (3-4), 155-177.
- Christensen, J.H., Christensen, O.B., 2007: A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change* 81, 7-30.
- Farda, A., Déqué, M., Somot, S., Horányi, A., Spiridonov, V., Tóth, H., 2010: Model ALADIN as regional climate model for Central and Eastern Europe. *Studia Geophysica et Geodaetica* 54, 2, 313-332.
- Jacob, D., 2001: A note on the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin, *Met. Atmos. Phys.* 77, 61-73.
- van der Linden, P., Mitchell, J.F.B. (eds.), 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter EX1 3PB, UK.
- Mitchell, T. D., Carter, T. R., Jones, P. D., Hulme, M., New, M., 2004: A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). Working Paper 55. Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, UK.
- Nakicenovic, N., Swart, R.J., 2000: Emissions Scenarios 2000 – Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Szabó, P., Gelybó, Gy., 2009: Comparison of observed trends and simulated changes in extreme climate indices in the Carpathian Basin by the end of this century. *International Journal of Global Warming* 1, 336-355.
- Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, M., Giorgetta, M., Schlese, U., and Schulzweida, U., 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate. Report No. 18, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany.
- Royer, J.F., Cariolle, D., Chauvin, F., Déqué, M., Douville, H., Planton, S., Rascol, A., Ricard, J.L., Salas y Melia, D., Sevault, F., Simon, P., Somot, S., Tyteca, S., Terray, L., Valcke, S., 2002: Simulation of climate changes during the 21st century including stratospheric ozone. *Géosciences* 334 (3), 147-154.

- Spiridonov, V., Déqué, M., Somot, S., 2005: ALADIN-Climate: from the origins to present date. ALADIN Newsletter 29.
- Szépszó, G., Horányi, A., 2008: Transient simulation of the REMO regional climate model and its evaluation over Hungary. *Időjárás* 112 (3-4), 203-231.
- Taylor, K.E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in single diagram. *J. Geophys. Res.* 106, D7, 7183-7192.
- Uppala, S.M., Kallberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., Bechtold, V.D., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., 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, B.J., Isaksen, L., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J.F., Morcrette, J.J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., Woollen, J., 2005: The ERA-40 re-analysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 131, 2961-3012.

# Az ELTE regionális klímamodelljei: PRECIS és RegCM

Pongrácz Rita, Bartholy Judit, Pieczka Ildikó és Torma Csaba

ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék  
1117 Budapest Pázmány P. s. 1/a.; email: prita@nimbus.elte.hu

**Összefoglaló** – Az elmúlt évek során az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén két regionális klímamodell, az amerikai fejlesztésű RegCM és a brit Hadley Központban kifejlesztett PRECIS modell adaptálására került sor. A cikkben ezeket a modelleket mutatjuk be, s elemezzük az elkészült szimulációk eredményeit. (1) A hazai vizsgálatokhoz adaptált RegCM regionális klímamodell Kárpát-medencére vonatkozó szimulációi során 18 vertikális szintet és 10 km-es horizontális rácsfelbontást alkalmaztunk. A futtatásokat az 1961–1990 referencia időszakon kívül a XXI. század két, 30 éves időszelére végeztük el, 2021–2050-re és 2071–2100-ra, melyekhez a hamburgi ECHAM5 globális éghajlati modell biztosította a kezdeti- és peremfeltételeket. A jövőre vonatkozóan a közepesnek tekinthető A1B scenáriót vettük figyelembe, mely a légköri szén-dioxid-koncentráció valamelyest lassuló ütemű növekedését feltételezi, a 2100-ra becsült értéke 717 ppm. (2) A PRECIS regionális éghajlati modell vertikálisan 19 szinttel számol, horizontális rácsfelbontása 25 km. Szimulációinkhoz a kezdeti- és peremfeltételeket a HadCM3 globális éghajlati modell szolgáltatta. Az első futtatások az 1961–1990 közötti referencia időszakra és a 2071–2100 közötti célidőszakra készültek. A jövőre vonatkozóan a pesszimistább A2 és az optimistább B2 scenáriót vizsgáltuk, melyek 2100-ra 856 ppm, illetve 621 ppm globális széndioxid-koncentrációt feltételeznek. Az időszelletekre vonatkozó szimulációkon túl az 1951–2100 időszak egészére is végzünk tranzienst futtatást, melyhez a RegCM-hez hasonlóan az A1B scenáriót alkalmazzuk.

A regionális klímamodellek a XXI. század során hazánk térségében egyértelműen további melegedést prognosztizálnak, mely az átlaghőmérsékletek emelkedésén kívül a szélsőségesebb hőmérsékleti értékek gyakoriság-növekedésében is jelentkezik. A csapadékviszonyokra vonatkozóan összességében a Kárpát-medence kismértékű szárazodása valószínűsíthető, ugyanakkor a csapadékhullás várhatóan intenzívebbé válik, vagyis a csapadékos napokon lehulló csapadék mennyisége várhatóan növekszik.

## Bevezetés

Mára már nem vitatható, hogy a fokozódó emberi tevékenységek következményeként globális felmelegedésnek lehetünk tanúi (*IPCC, 2007*). A jelenlegi globális éghajlati modellekkel (GCM-ekkel) az egész Földre vonatkozóan adhatunk éghajlati becsléseket, ám lehetetlen regionális térszkálán 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 rácspontra 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. leskalázási) 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 történő szimulációt. Mivel a globális modellek nem képesek sem az orografikus, sem a felszíntípusbeli különbségek (pl. a hegységek magassági tagolódása, vagy a tengerek, szigetek, szárazföldek eltérő felszínformái) követésére, ezért a GCM eredményekből levonható következtetések erősen korlátozott érvényességűek. A globális modellek eredményeit bemenő paraméterként (kiindulásként és oldalsó

peremfeltételekként) felhasználó korlátos tartományú beágyazott modellek viszont már képesek a nagyskálájú változásokat leképezni finomabb térbeli skálára. A regionális modellek felbontása akár 10-25 km is lehet, mely már kisebb régiók pontos éghajlati leírását is lehetővé teszi. Ezek a regionális éghajlati modellek megbízható fizikai tartalommal, nagy területi felbontással rendelkeznek, de a nagyobb számításigény miatt a Földnek csak egy kisebb, korlátos tartományán vannak értelmezve. 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 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 (Horányi et al., 2011).

Cikkünkben röviden összegezzük az ELTE Meteorológiai Tanszékén adaptált két klímamodell legfontosabb tulajdonságait. Majd a XXI. század végére várható hőmérsékleti és csapadékváltozások illusztrálására mutatunk be egy-egy példát a Kárpát-medence térségére.

### ***A RegCM klímamodell***

Az ELTE Meteorológiai Tanszéken futtatott modellek közül az egyik a RegCM modell, mely kutatási célokra jelenleg a trieszti Elméleti Fizikai Kutatóintézet (ICTP) keresztül hozzáférhető. Világszerte használják regionális klímakutatásokra és évszakos előrejelzésekre is (pl.: Gao et al., 2007, Im et al., 2007). A modellt eredetileg az amerikai Légköri Kutatások Nemzeti Központjában (National Center for Atmospheric Research, NCAR) fejlesztettek ki. Az NCAR RegCM modell első generációjának kidolgozásához az NCAR-Pennsylvaniai Állami Egyetem (Pennsylvania State University, PSU) 4-es verziószámú mezoskálájú modellje (MM4) szolgált alapul az 1980-as évek végén (Dickinson et al., 1989, Giorgi, 1989). A modell dinamikáért felelős része az MM4 modelltől származott, ami egy  $\sigma$ -koordinátarendszerbeli összenyomható, véges differenciál közelítést alkalmazó hidrosztatikus modell.

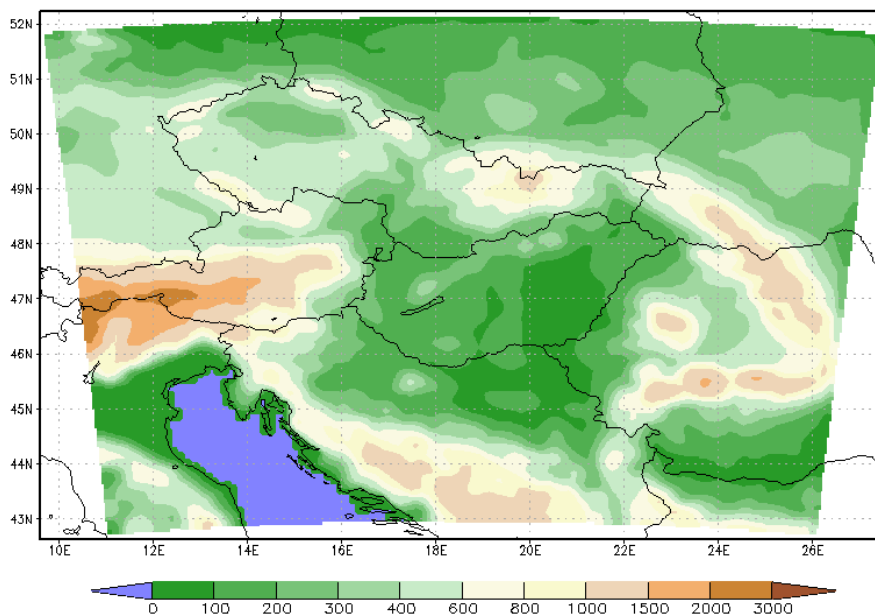
A folyamatos fejlesztéseknek (Giorgi et al., 1993a, 1993b) köszönhetően a modell újabb és újabb verziószámú változatai jelentek meg. Az általunk felhasznált 3-as verziószámú RegCM (RegCM3) modellben a dinamikai leírás már az MM5 hidrosztatikai Mezoskálájú Modelléhez (Grell et al., 1994) hasonló. A modell magában foglalja az ún. Bioszféra-Atmoszféra-Transzfer-Sémát, BATS (Dickinson et al., 1993), mely a felszíni folyamatokat írja le, míg a határréteg fizikáját a *Holtslag* et al. (1990) által leírtak szerint kezeli a modell. További fizikai parametrizációs eljárásokat is tartalmaz a modell: például az NCAR CCM3 modelljének sugárzás-átviteli csomagját

(Kiehl et al., 1996), a nagyskálájú felhőzet és csapadék sémát (Pal et al., 2000), valamint a konvektív csapadékot előidéző folyamatokat leíró Grell (1993) sémát.

A modell függőleges irányú koordináta-rendszere felszínkövető, mely azt jelenti, hogy az alacsonyabb rácsszintek követik a felszín változásait, míg az alacsonyabb nyomású felületeket reprezentáló magasabb rácsszintek mintegy az izobár felületekkel párhuzamos felületeken futnak. A középső szintek folyamatosan simulnak ki, ahogyan közeledünk a modellben képviselt legalacsonyabb nyomási szintek felé. A RegCM modellben a dimenzió nélküli  $\sigma$ -koordináták használatosak a modell szintjeinek definiálására:

$$\sigma = \frac{(p - p_t)}{(p_s - p_t)},$$

ahol  $p$  a légnyomást,  $p_t$  a modellben leírt légkör tetején lévő nyomást, míg  $p_s$  a felszíni nyomást jelöli. Az egyes modellszintekre vonatkozó  $\sigma$  érték tehát a légnyomás-értékekből számítható 0 és 1 érték között monoton változik. Az egyenletből egyértelműen következik, hogy  $\sigma$  a koordináta-rendszer tetején 0, míg a felszínen 1 értéket vesz fel. A modellszintek által meghatározott rétegek többnyire nem egységes vastagságúak: a felszínközeli határrétegben definiált szintek sűrűbben helyezkednek el, mint a határréteg felett. A vertikális szintek száma a kitűzött cél függvényében változtatható. A RegCM esetében 14, 18 vagy 23 nyomási szintet választhatunk a modellszimulációkhoz. A horizontális rácsfelbontást szintén a felhasználó adja meg, mely jellemzően 10 és 50 km közötti.



**1. ábra.** A RegCM modell integrálási tartományának földrajzi elhelyezkedése és domborzata.

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 18 vertikális szintet tartalmazó verziójának 10 km-es horizontális felbontású adaptálására a Kárpát-medence térségére (Torma et al., 2008, 2011). A Budapesthez közeli központú teljes



integrálási tartomány (1. ábra) mindösszesen 120×100 rácspontot tartalmaz. A vizsgálatok többségét azonban egy kisebb belső területre végeztük el, mely már a peremhatások által zavart határzónát nem tartalmazza. Ezt a vizsgálati területet a következő koordináták határolják: 43,8°-51,0° É.sz., 11,4°-25,8° K.h.

A RegCM modell felhasználásával az A1B scenáriót (Nakicenovic & Swart, 2000) vizsgáltuk az 1961-1990, 2021-2050 és 2071-2100 közötti időszakok alapján, melyekhez a hamburgi ECHAM5 globális modell (Roeckner et al., 2003) szolgáltatja a kezdeti- és a peremfeltételeket.

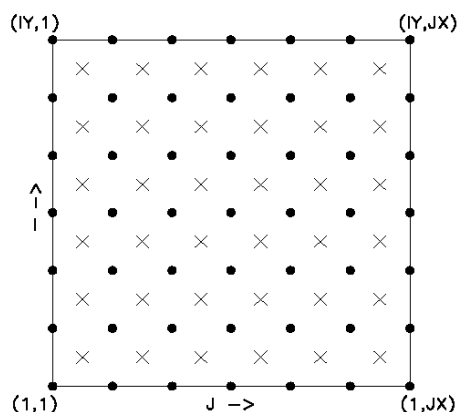
### **A PRECIS klímamodell**

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 korlátos tartományú, finom felbontású, légköri és felszíni részeket tartalmazó modell, mely a Föld bármely térségére alkalmazható. A modellel lefedhető térség horizontális kiterjedésének felső korlátja 5000×5000 km<sup>2</sup> (Jones et al., 2004).

A PRECIS modell légköri része a teljes primitív egyenletek kiszámításán alapul a hidrosztatikus közelítés figyelembevételével. Ez azt jelenti, hogy feltételezzük a légkör hidrosztatikai egyensúlyát, a vertikális irányú mozgásokat pedig elkülönítve, az állapotegyenlet segítségével írjuk le. A globális modelltől következően a modell dinamikája a Coriolis-erőt is teljes mértékben figyelembe veszi. Horizontálisan szabályos szélességi-hosszúsági rácsot, míg vertikálisan hibrid koordinátákat alkalmaz. Az alkalmazott 19 vertikális szint közül a legalacsonyabb kb. 50 méteres magasságban, a legmagasabb a 0,5 hPa-os nyomási szinten (a sztratoszféra magasságában) helyezkedik el (Cullen, 1993). Az alsó 4 szint felszínkövető, a legfelső 3 tisztán nyomási, míg a közbülső szintek ezek kombinációjaként adhatók meg. Így teljes mértékben biztosítva van a két különböző koordináta-rendszer közötti átmenet (Simmons & Burridge, 1981). A PRECIS a modellegyenleteket szférikus poláris koordináta-rendszerben oldja meg (Wilson et al., 2007). A szélességi-hosszúsági rács a torzítási hibák csökkentése miatt úgy van elforgatva, hogy az Egyenlítő az integrálási tartomány belsejében helyezkedjen el. A horizontális felbontás 0,44°×0,44° és 0,22°×0,22° közül választható, mely hozzávetőlegesen 50 km-es, illetve 25 km-es felbontásnak felel meg a tartomány közepén (Jones et al., 2004). A finom térbeli felbontás miatt 5 perces időlépcsőre van szükség a numerikus stabilitás megőrzéséhez. A modell prognosztikai változói a felszíni légnyomás, a zonális és meridionális szélkomponens, a potenciális hőmérséklet, valamint a légkör teljes nedvességtartalma.

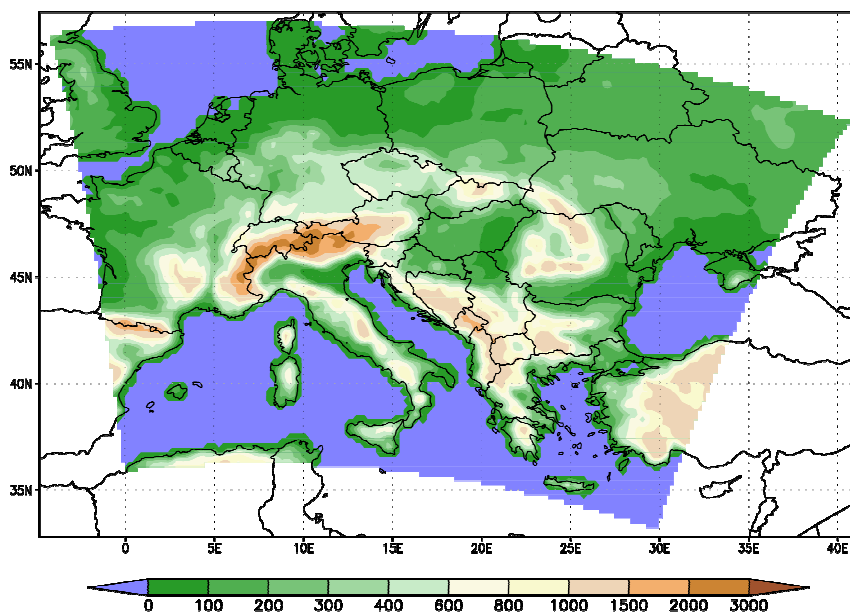
A horizontális diszkretizációhoz a PRECIS modell Arakawa B rácsot (Arakawa & Lamb, 1977) használ a split-explicit véges különbséges séma pontosságának javítására. Itt a momentumátviteli változók (a horizontális szélkomponensek) mindkét irányban a rácsávolság felével el vannak tolva a termodinamikai változókhoz képest (2. ábra). A geosztrófikus közelítést az 5 perces időlépcsőn belül háromszor végzi el a modell, s ezek átlagolásával kapjuk az advekciónak számításához szükséges sebességeket. Az advekciónak idő szerinti integrálása a Heun sémával történik (Mesinger, 1981). Ez a véges különbséges séma negyedrendben pontos, kivéve nagy szélességek esetén, amikor stabilitási szempontok miatt másodrendűre csökken. A dinamikai egyenletek numerikus formájában forrás- és nyelő tagok hiányában a tömeg, momentum, szögsebesség momentum és a teljes víztartalom konzervatív mennyiségek. A fizikai

parametizációkat és a numerikus diffúziót a prognosztikai változók háromdimenziós forrás- és nyelő-függvényeivel reprezentálja a modell. Annak érdekében, hogy a szubgrid-skálájú folyamatokat is figyelembe vehessük, valamint a zaj- és energiafelhalmozódást kontrolláljuk, mindenhol alkalmazzuk a horizontális diffúziót a szélességre, a potenciális hőmérsékletre és a víztartalomra. A diffúziós együtthatók a HadCM3 globális modelltől eltérően függenek a horizontális felbontástól és az időlépcsőtől.



**2. ábra.** A rácspontok és a rácsközéppontok sematikus ábrázolása az Arakawa-B rácshálózatban. A rácsnégyzetek közepén elhelyezkedő  $\times$ -ek jelölik a rácsközéppontokat (ahol a termodinamikai változókat értelmezzük), míg a kitöltött fekete körök a rácssarokpontokat (ahol a horizontális sebességeket határozzuk meg).

Az általunk alkalmazott integrálási tartomány kiterjedése  $123 \times 96$  rácspont, melyhez 25 km-es horizontális rácsfelbontást választottunk (3. ábra). A modell céltartománya így természetesen magába foglalja a Kárpát-medencét (Bartholy et al., 2006).



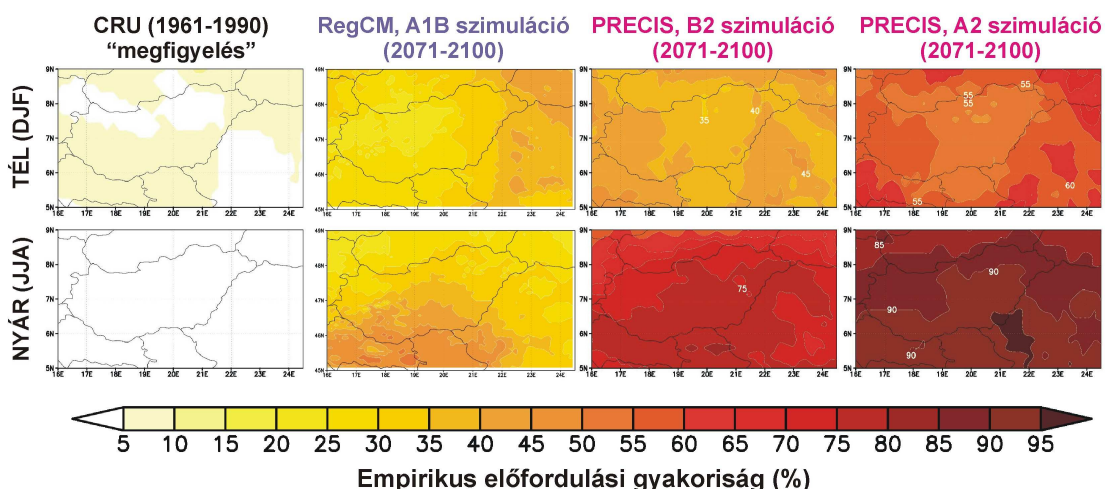
**3. ábra.** A PRECIS modell integrálási tartományának földrajzi elhelyezkedése és domborzata.

A 2071-2100-as időszakra két futtatást végeztünk el (Bartholy et al., 2009a, Pieczka et al., 2009): az A2, illetve a B2 forgatókönyv (Nakicenovic & Swart, 2000) figyelembevételével. Ezekon kívül jelenleg folyamatban van az A1B szcenárió vizsgálata is egy 1951-2100 közötti tranziens szimuláció alapján. A vizsgált szcenáriók közül az A2 szcenárióhoz társul a legmagasabb századvégi CO<sub>2</sub>-koncentráció – 856 ppm –, ezt követi az A1B – 717 ppm –, s végül a legalacsonyabb koncentráció szint – 621 ppm – a B2 esetén várható (Nakicenovic & 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 4. ábra tartalmazza a +4 °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 szcenárió 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.



4. ábra. A 4 °C-nál nagyobb havi hőmérsékleti anomáliák előfordulási gyakorisága télen és nyáron

A múltban a téli hónapokban a +4 °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-scenáriót figyelembe vevő RegCM szimuláció szerint várható: télen 20-35%, nyáron 25-45% az 1961-1990 időszak átlagát +4 °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 °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 értékekben 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.

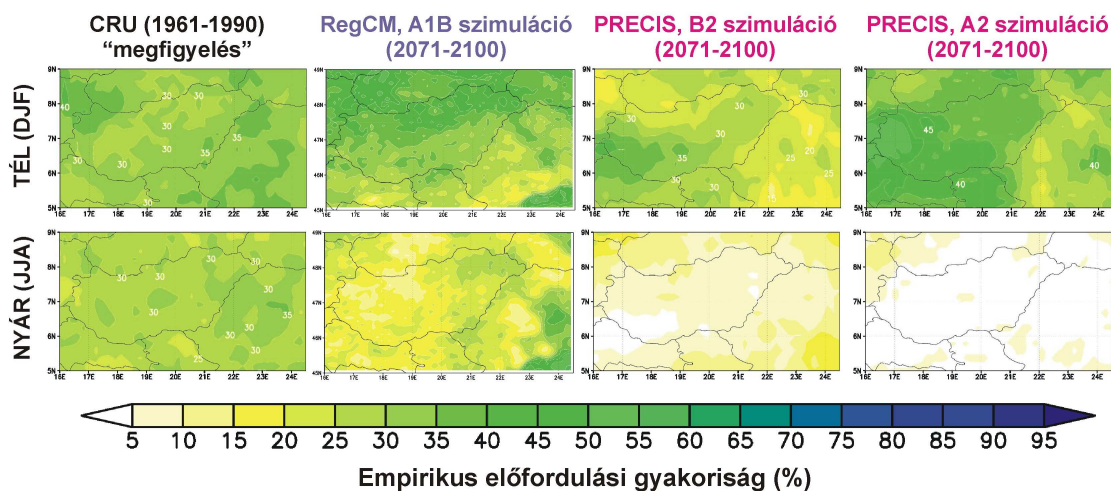
A havi csapadék gyakorisági eloszlásaiban várható változásokat illusztrálандó a +20%-ot meghaladó pozitív és -20%-ot meghaladó negatív csapadék-anomáliák előfordulási valószínűségét elemezhetjük a téli és a nyári hónapokra az 5., illetve a 6. *ábra* segítségével. A megfigyelések alapján az 1961-90 időszakban (5. és 6. *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).

Az 5. *ábra* második oszlopa az A1B scenárióra 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).

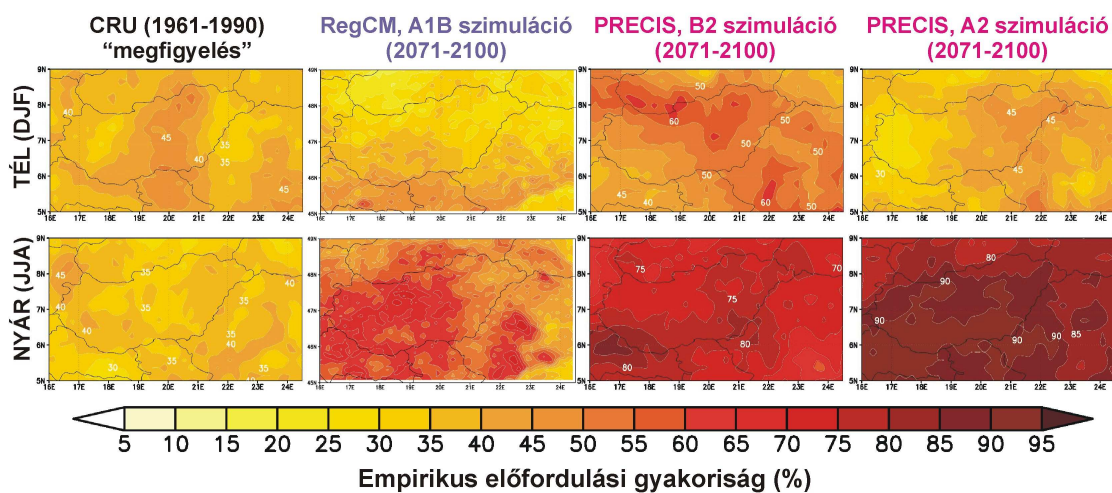
A 6. *ábra* második oszlopában a -20%-ot meghaladó negatív csapadék-anomáliák 2071-2100-ra várható előfordulási gyakoriságait tekintve megállapíthatjuk, hogy az A1B scenárió esetén télen inkább csökkenés valószínűsíthető az ország területén, a nyári hónapokban viszont jelentős nagyobb arányban számíthatunk 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 (5. *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 (6. *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.



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



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

A regionális klímaváltozással kapcsolatban a szélsőséges időjárási viszonyok (pl.: fagyok, hőség, aszály, hirtelen lezúduló esők, stb.) előfordulási gyakoriságában és intenzitásában várható változásokat részletesen is vizsgáltuk különféle éghajlati indexek felhasználásával. Az elemzések TDK, illetve szakdolgozati témaként több hallgató bevonásával (pl.: *Hollósi*, 2010; *Bartha*, 2010) folyamatosan zajlanak.

### Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat támogatta az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával az „Európai Léptékkkel a Tudásért, ELTE-TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003. A felsőoktatás minőségének javítása a kutatás-fejlesztés-innováció-oktatás fejlesztésén keresztül” pályázat, 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), valamint az Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott CCWATERS projekt (SEE/A/022/2.1/X).

### ***Irodalomjegyzék***

- Arakawa, A., Lamb, V.R., 1977: Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. In: *Methods in Computational Physics*, 17 (ed.: J. Chang). Academic Press, New York, pp. 173-265.
- 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, pp. 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, pp. 238-252.
- Cullen, M.J.P., 1993: The unified forecast/climate model. *Meteorol. Mag.*, 122, pp. 81-94.
- Dickinson, R.E., Errico, R.M., Giorgi, F., Bates, G.T., 1989: A regional climate model for the western United States. *Climatic Change*, 15, 383-422.
- Dickinson, R., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P., 1993: Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1 as coupled to the NCAR community climate model. NCAR technical note NCAR/TN-387 + STR, 72p.
- Gao, X., Zhang, D., Chen, Z.X., Pal, J.S., Giorgi, F., 2007: Simulation of land use effects on climate in China by RegCM3. *Science in China, Series D - Earth Sciences*, 50, pp. 620-628.
- Giorgi, F., 1989: Two-dimensional simulations of possible mesoscale effects of nuclear war fires. *J. Geophys. Res.*, 94, pp. 1127-1144.
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, 3, pp. 941-963.
- Giorgi F., Marinucci M.R., Bates G.T., 1993a: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.*, 121, pp. 2794-2813.
- Giorgi, F., Marinucci, M.R., Bates, G.T., DeCanio, G., 1993b: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective

- processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 121, pp. 2814-2832.
- 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, pp. 147-168.
- Grell, G., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 121, pp. 764-787.
- Grell, G., Dudhia, J., Stauffer, D.R., 1994: A Description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR technical note NCAR/TN-398 + STR, 121p.
- Hollósi, B., 2010: A Kárpát-medence csapadékviszonyainak és aszályhajlamának jövőben várható tendenciái a PRECIS eredmények alapján. BSc szakdolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest. 53p. Témavezető: Bartholy J., Pongrácz R.
- Holtlag, A., de Bruijn, E., Pan, H-L., 1990: A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, 118, pp. 1561-1575.
- Horányi, A., Bartholy, J., Krüzselyi, I., Pieczka, I., Pongrácz, R., Szabó, P., Szépszó, G., Torma, Cs., 2010: A hazai regionális klímamodellek eredményeinek együttes kiértékelése. In: *36. Meteorológiai Tudományos Napok – Változó éghajlat és következményei a Kárpát-medencében*. (Szerk.: Lakatos M.) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest.
- Im, E.-S., Kwon, W.-T., Ahn, J.-B., Giorgi, F., 2007: Multi-decadal scenario simulation over Korea using a RegCM3 one-way double-nested system. Part 1: Recent climate simulation (1971-2000). *Climate Dynamics*, 28, pp. 759-780.
- 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. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York, NY. 996p. (available online: <http://www.ipcc.ch>)
- 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, UK Met Office Hadley Centre, Exeter. 40p.
- Kiehl, J., Hack, J., Bonan, G.B., Boville, B., Briegleb, B., Williamson, D., Rasch, P., 1996: Description of NCAR community climate model (CCM3). NCAR technical note NCAR/TN-420 + STR, 152p.
- Mesinger, F., 1981: Horizontal Advection Schemes of a Staggered Grid - An Enstrophy and Energy-Conserving Model. *Mon. Wea. Rev.*, 109, pp. 467-478.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (eds.), 2000: Emissions Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge, UK. 570p.
- Pal, J.S., Small, E., Eltahir, E., 2000: Simulation of regionalscale water and energy budgets: representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *J. Geophys. Res.*, 105(29), pp. 567-594.
- 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, pp. 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, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Germany. 140p.*
- Simmons, A.J., Burridge, D.M., 1981: An energy and angular-momentum conserving vertical finite difference scheme and hybrid vertical coordinates. Mon. Wea. Rev., 109, pp. 758-766.*
- 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.*
- Torma, Cs., Coppola, E., Giorgi, F., Bartholy, J., Pongrácz, R., 2011: Validation of a high resolution version of the regional climate model RegCM3 over the Carpathian Basin. Journal of Hydrometeorology, 12, pp. 84-100. doi: 10.1175/2010JHM1234.1.*
- 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. UK Met Office Hadley Centre, Exeter. 131p.*



## A hazai regionális klímamodellek eredményeinek együttes kiértékelése

Horányi András<sup>1</sup>, Bartholy Judit<sup>2</sup>, Krüzselyi Ilona<sup>1</sup>, Pieczka Ildikó<sup>2</sup>, Pongrácz Rita<sup>2</sup>, Szabó Péter<sup>1</sup>, Szépszó Gabriella<sup>1</sup>, Torma Csaba<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Országos Meteorológiai Szolgálat

1024 Budapest, Kitaiabel Pál utca 1., email: klimadinamika@met.hu

<sup>2</sup> ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék

1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A, email: bari@ludens.elte.hu

**Összefoglaló** – Magyarországon jelenleg négy regionális klímamodellt használunk annak érdekében, hogy a földi éghajlati rendszer változását leíró globális modellek eredményeit a Kárpát-medence térségére pontosítsuk: az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) az ALADIN-Climate és a REMO, míg az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Meteorológiai Tanszékén a PRECIS és a RegCM modelleket. Az éghajlati modellekben meglévő bizonytalanságok jellemzésére a multi-modell módszer a legelterjedtebb, ami több modell eredményeit együttesen kiértékelve számszerűsíti a projekciókban rejlő bizonytalanságokat vagy éppen bizonyosságokat. Ez alapján döntöttünk egy ilyen elemzés elkészítése mellett a rendelkezésre álló magyarországi modellek eredményei alapján. A végrehajtás során a négy modell eredményeiből egy mini-ensemble-t képeztünk, és olyan diagnosztikákat (például a négy modell eredményeit együttesen bemutató diagramokat, valószínűségi térképeket, változási intervallumokat tartalmazó táblázatokat és ábrákat, stb.) származtattunk, amelyek képet adnak arról, hogy az egyes modellek eredményei mennyiben hasonlítanak, vagy éppen különböznek egymástól. Az így kapott információk elengedhetetlenek az éghajlatváltozásra való felkészülés során, hisz lehetőséget biztosítanak arra, hogy az egyes klímaváltozási forgatókönyvek bekövetkezési valószínűségének függvényében tegyünk alkalmazkodási lépéseket.

### **Bevezetés, előzmények**

2003-ban merült fel annak a gondolata, hogy Magyarországon is kezdjünk el az éghajlat dinamikai alapú vizsgálatával foglalkozni, azaz olyan klímamodelleket adaptáljunk, majd alkalmazzunk, amelyek képesek arra, hogy Magyarország éghajlatának jövőbeli alakulására mértékadó információt szolgáltatassanak. A kezdeti lépéseket az ún. klímadinamikai projekt (2005-2007) beindítása követte, amely egy, a Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Program keretében megvalósított együttműködés ([http://www.met.hu/palyazat/nkfp\\_klima2005.php](http://www.met.hu/palyazat/nkfp_klima2005.php)), melynek célja többek közt négy regionális klímamodell (ALADIN-Climate, PRECIS, RegCM és REMO) magyarországi adaptálása volt. A projektet („Magyarország éghajlatának dinamikai vizsgálata, és a numerikus modelleken alapuló klíma-előrejelzések módszertanának megalapozása”) az Országos Meteorológiai Szolgálat vezette, s a további konzorciumi tagok az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszéke, a Pécsi Tudományegyetem és az Env-in-Cent Környezetvédelmi Tanácsadó Iroda voltak. A projekt sikeres megvalósítása után az Országos Meteorológiai Szolgálat és az ELTE Meteorológiai Tanszéke abban állapodott meg, hogy folytatja a közös munkát a már rendelkezésre álló hazai modellek együttes kiértékelése érdekében. Ez a gyakorlatban az összes magyarországi regionális klímamodellezési információ összegzését és azok egységes módon megvalósuló interpretációját jelenti. Ezzel egyrésztől elkerülhetővé válik az, hogy a hazai klímamodellek eredményeinek felhasználói pusztán egy-egy véletlenszerűen kiválasztott modell eredményei alapján hozzanak (nem kellően megalapozott) döntéseket, másrésztől pedig lehetőség nyílik a projekciókban rejlő

bizonytalan részletek számszerűsítésére. A bizonytalanságok bemutatása és mennyiségi elemzése tehát kiemelten fontos, mert ezek érdemi többlet-információt szolgáltatnak a felhasználók számára.

A gyakorlatban a bizonytalanságok bemutatására négy regionális klímamodellből álló éghajlati projekciós rendszer szolgáltat alapot, melynek tagjai az ALADIN-Climate, a PRECIS, a RegCM és a REMO modellek. Semmiféle alapunk nincs arra, hogy feltételezzük, hogy bármelyik modell jobb (vagy rosszabb) a másikkal a jövőre vonatkozó projekciók tekintetében, ezért mindegyik modell eredményét az éghajlat egyformán lehetséges realizációjának tekintjük, s így azokat azonos súllyal vesszük figyelembe az együttes kiértékelésnél. Az ensemble (együttes) kiértékelés során nem szabad megfedkezünk a 2004-2009-es időszakban megvalósított ENSEMBLES projektről (<http://ensembles-eu.metoffice.com>; van der Linden and Mitchell, 2009) sem, amely már kísérletet tett a fentiekhez hasonló (de több modellt felhasználó) elemzésre. Ez alapján joggal merül fel a kérdés, hogy a tervezett magyarországi mini-ensemble mennyiben tud plusz információt adni a nagyszabású európai ENSEMBLES projekthez képest. Alapvetően három okot is felsorolhatunk, melyek igazolják a hazai együttes kiértékelés létjogosultságát:

- Egyes magyarországi modellek felbontása nagyobb (10 km), mint az ENSEMBLES projektben használtaké (25 km), így várhatóan pontosabb információkat tudunk szolgáltatni.
- A Magyarországon rendelkezésre álló és könnyen elérhető adatbázis kulcsjelentőségű a hazai felhasználók adatokkal való ellátása érdekében.
- Az ENSEMBLES projekt is megállapította, hogy a magyarországi változások egyik legbizonytalanabb eleme a csapadékmennyiség éves és évszakos változásának várható alakulása. Azt reméljük, hogy saját eredményeink ezt a bizonytalanságot képesek csökkenteni.

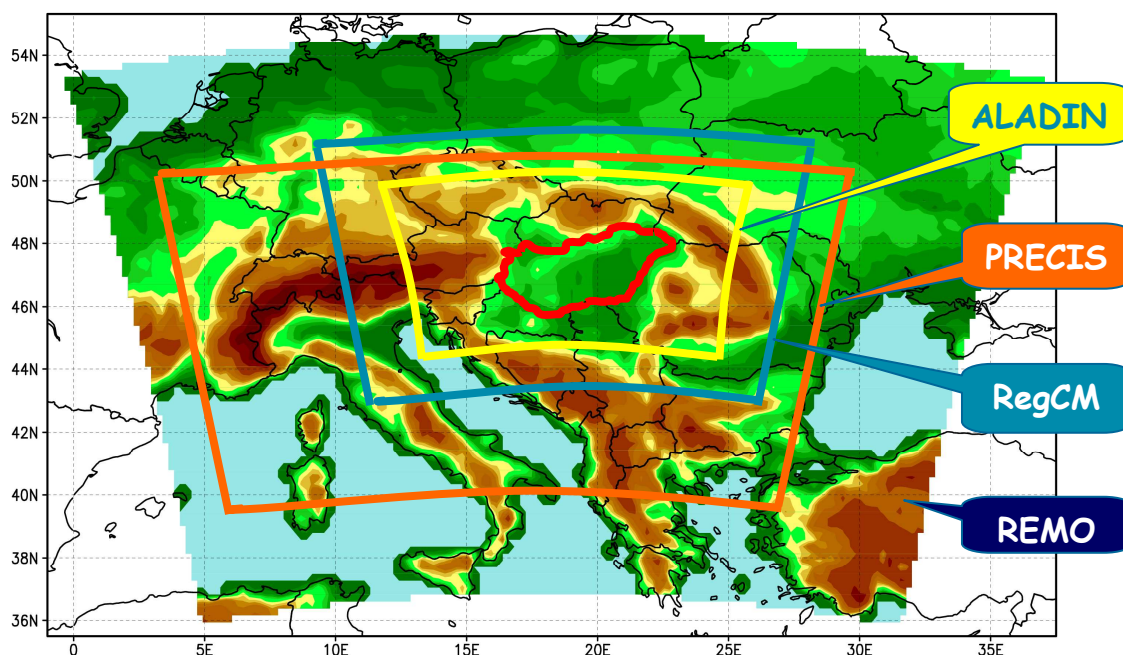
### ***Az alkalmazott regionális klímamodellek***

A magyarországi mini-ensemble rendszer elemei a fentebb már említett ALADIN-Climate, PRECIS, RegCM és REMO regionális klímamodellek. Ezek közül az OMSZ alkalmazza az ALADIN-Climate és REMO modelleket, míg az ELTE a PRECIS és RegCM modelleket. A modellek legfontosabb jellemzőit az 1. táblázat, azok integrálási tartományait pedig az 1. ábra szemlélteti.

***1. táblázat. Az alkalmazott hazai regionális klímamodellek legfontosabb részletei és szimulációi***

<b>Regionális klímamodellek</b>	<b>ALADIN-Climate</b>	<b>PRECIS</b>	<b>RegCM</b>	<b>REMO</b>
<b>Horizontális felbontás</b>	10 km	25 km	10km	25 km
<b>Vertikális szintek száma</b>	31	19	18	20

<b>Validáció és határfeltételeik</b>	1961–2000 ERA-40	1961–1990 ERA-40	1961–2000 ERA-40	1961–2000 ERA-40
<b>Kontroll kísérletek és határfeltételeik</b>	1961–1990 ARPEGE	1961–1990 HadCM3	1961–1990 ECHAM5/MPI-OM → RegCM	1951–2000 ECHAM5/MPI-OM
<b>Projekciók</b>	2001–2100 A1B	2071-2100 A2, B2	2021–2050 A1B 2071–2100 A1B	2001–2100 A1B



*1. ábra. A hazai együttes kiértékeléshez alkalmazott modellek integrálási tartományai*

Az I. táblázatból leolvasható, hogy modelljeink alapvetően két időszakra szolgáltatnak projekciókat: 2021-2050-re, illetve 2071-2100-ra. Az első időszakra három modell áll rendelkezésünkre: az ALADIN-Climate, a RegCM és a REMO. Mindhárom modell az átlagosnak tekinthető A1B kibocsátási forgatókönyvet (Nakicenovic et al., 2000) használja. Ezen három modell eredményei alapján a globális és regionális modellek bizonytalanságait tudjuk számszerűsíteni (hisz különböző globális oldalsó határfeltételeket és természetesen különböző regionális klímamodelleket tekintünk). Az évszázad végére már négy modell eredményei állnak rendelkezésünkre, azonban a negyedikként megjelenő PRECIS modell nem az A1B forgatókönyvet tekinti. Ezért 2071-2100-ra a PRECIS modellt a B2 forgatókönyvvel vesszük figyelembe a közös kiértékelésnél (a B2 forgatókönyv valamelyest optimistább az A1B-nél). A négy modellen alapuló kiértékelés az évszázad végére tehát már a globális és regionális modellek bizonytalanságai mellett a forgatókönyvekből adódó bizonytalanságot is némileg figyelembe veszi.

### *Az alkalmazott klímamodellek múltira vonatkozó tesztelése*

Minden éghajlati modell esetében az első lépés annak tesztelése, azaz annak ellenőrzése, hogy a modell mennyiben tudja visszaadni a közelmúlt éghajlatának jellemzőit. A tesztelés során alapvetően kétféle futtatást hajtunk végre:

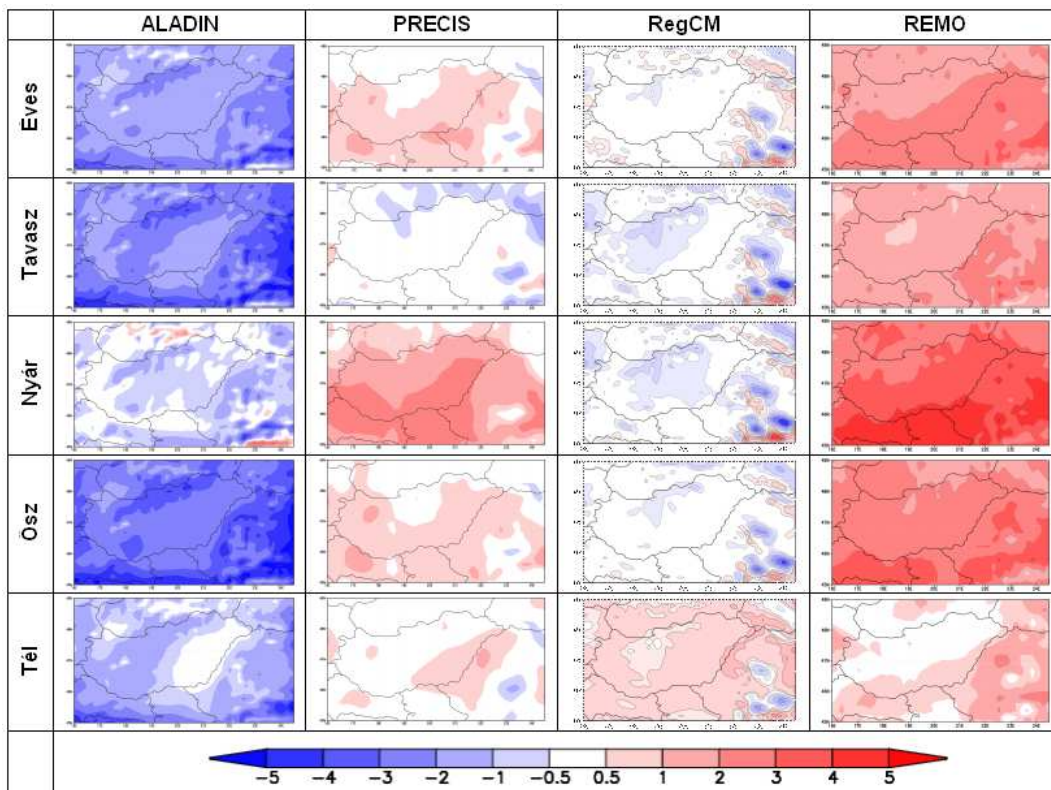
- „Kvázi-tökéletes” oldalsó határfeltételek figyelembevétele, amelyek a múlt éghajlatának lehető legpontosabb leírását tartalmazzák. Ilyen adatbázisok az ún. re-analízis adatok, amelyek közül az Európai Középtávú Előrejelző Központ (ECMWF) ERA-40 adatbázisát (Uppala et al., 2005) alkalmaztuk a teszteléshez. Ez a validáció képet ad arról, hogy a modell hogyan képes a múlt éghajlatának regionális leírására abban az esetben, ha tudjuk, hogy az oldalsó határfeltételekből érdemi hiba – azok kvázi-tökéletes volta miatt – nem kerül a szimulációkba, azaz kizárólagosan a regionális klímamodell viselkedésére tudunk fókuszálni. Természetesen ebben az esetben az egyes éveket is pontosan kell jellemezniük (ami nem mondható el a globális modellekkel meghajtott kísérletek esetében). Ezen validációs eredmények alapján határozzuk meg azokat a fejlesztési lépéseket, amelyek szükségesek a tesztelésnél feltárt hiányosságok orvoslására.
- A tesztelés másik módja, ha már a múltira vonatkozóan is globális modellek eredményeit használjuk fel a regionális éghajlat rekonstrukciójára. Ennek a megközelítésnek az ad létjogosultságot, hogy a jövőre nézve természetesen csak globális modelleket tekinthetünk, azaz nemcsak a regionális modellünk hiányosságait kell ismerünk, hanem azt is, hogy a globális modell hatása az oldalsó határfeltételeken keresztül esetlegesen milyen további pontatlanságokat visz a regionális modell-szimulációkba. Ezen szimulációk esetén (és a jövőre vonatkozó projekcióknál) nincs arra lehetőség, hogy az egyes éveket elkülönülten, önmagában vizsgáljuk, mert a modellek alapvetően hosszabb, tipikusan 30 évre vonatkozó éghajlati jellemzők „visszaadására” hivatottak.

A fenti tesztelési módszertan egyik nehézsége, hogy gyakran (mint egyes modelljeink esetében is) a kétféle szimuláció eredménye nagyban eltér egymástól, azaz a modellek „teljesítőképessége” más és más a két értékelés szerint, s ily módon igen nehéz a hibák forrását pontosan meghatározni. Az alábbiakban a tökéletes határfeltételekkel végzett kísérletek eredményeit foglaljuk össze röviden (hiszen az alkalmazott regionális modell minőségéről akarunk képet kapni) méghozzá „együttes” alapon, azaz arra koncentrálva, hogy a négy modell mennyiben alkalmazható a közös, jövőre vonatkozó kiértékelés során.

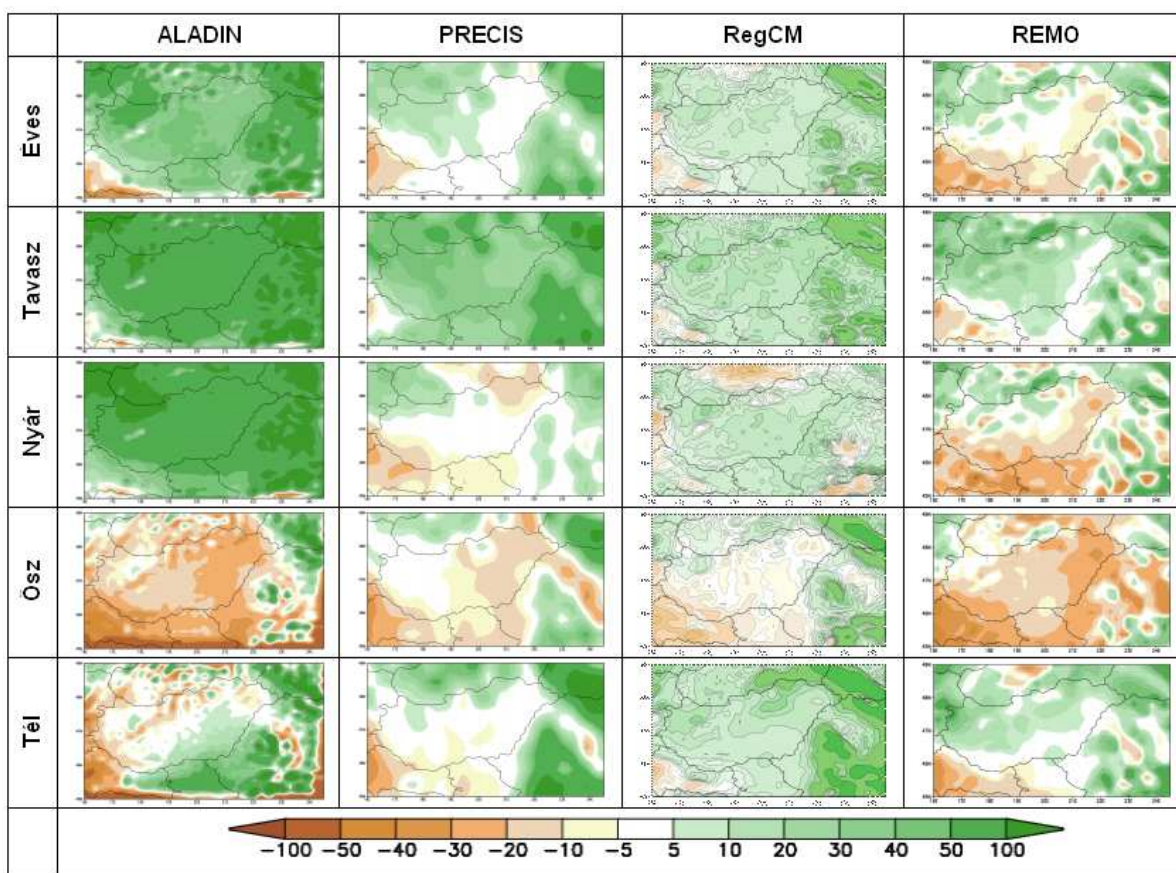
A tesztelés során az 1961-1990-es időszakra koncentráltunk és a valós éghajlat jellemzésére az ún. CRU (Climatic Research Unit, Mitchell and Jones, 2005) megfigyelési adatbázist használtuk. A hőmérsékleti szimulációk hibáinak vizsgálata során (2. ábra és 2.. táblázat) az látható, hogy a modellek között van olyan, amely túl hideg (az ALADIN-Climate modell), illetve van olyan is, ami túl meleg (a REMO modell). A magyarországi viszonyokat tekintve a modellek összességében a tavasz kivételével melegebb éghajlatot szimulálnak, mint a valóság. A csapadék esetében (3. ábra és 2.. táblázat; a táblázatban a hibák előjeles összegét, illetve a hibák által „lefedett” intervallumot tüntettük fel) inkább a felülbecslés dominál, ami mind a térképeken, mind a táblázatban egyértelműen látszik. Ettől a magyarországi ősz annyiban tér el, hogy akkor inkább összességében alulbecslés tapasztalható. A validációs eredmények tehát többnyire azt tükrözik, hogy a modelljeink melegebbek és csapadékosabbak, mint a valóság.

Ha megvizsgáljuk a globális klímamodellek által biztosított peremfeltételekkel végrehajtott szimulációkat (a 2. táblázatban mutatjuk be ezen validációk összegzett hibáit), akkor vannak például olyan összesített jellemzők, amelyek alapvetően változatlanok maradnak ebben a szimulációban is (például az éves hőmérséklet és csapadékösszeg hibák). Találunk azonban olyanokat is, amelyek esetében a kétféle futtatás végeredménye jelentősen különbözik (például az őszi és tavaszi hőmérséklet, illetve az őszi és nyári csapadék viselkedése). Az is előfordul mind az együttes hibáknál, mind az egyes modellek hibáinál, hogy nem a kvázi-tökéletes peremfeltételekkel végrehajtott modellkísérletek szolgáltatnak megbízhatóbb eredményeket. A fentiek pusztán arra utalnak, hogy a modellek múltra vonatkozó verifikációjának értelmezése és az ebből levonható következtetések helyes összegzése korántsem egyszerű feladat.

Jogosan merül fel ennek kapcsán, hogy a validációs információk hogyan vehetők figyelembe a jövőre vonatkozó becslések kiértékelésénél. A gyakorlatban annyiban tudjuk ezeket az információkat felhasználni, hogy a jövőre vonatkozóan változás értékeit adunk meg, azaz az adott modell jövőbeli és múltbeli értékének eltérését határozzuk meg. Ezzel az ún. delta-módszerrel lehetővé válik az, hogy a modellek esetleges szisztematikus hibáit a különbségképzéssel kiküszöböljük (ha azok nem változnak a jövő éghajlatára nézve a múlthoz képest). Máskülönben a modellek múltbeli viselkedése nem határozza meg egyértelműen azok jövőbeli viselkedését, azaz semmi biztosíték nincs arra, hogy egy múltban tökéletes modell tökéletes projekciót ad a jövőre nézve is, illetve fordítva, egy múltban rossz modell automatikusan rossz szimulációkat ad a jövőre nézve is.



**2. ábra.** A hazai regionális klímamodellek éves és évszakos átlaghőmérsékleti hibái (°C) a CRU adatbázishoz képest, 1961-1990



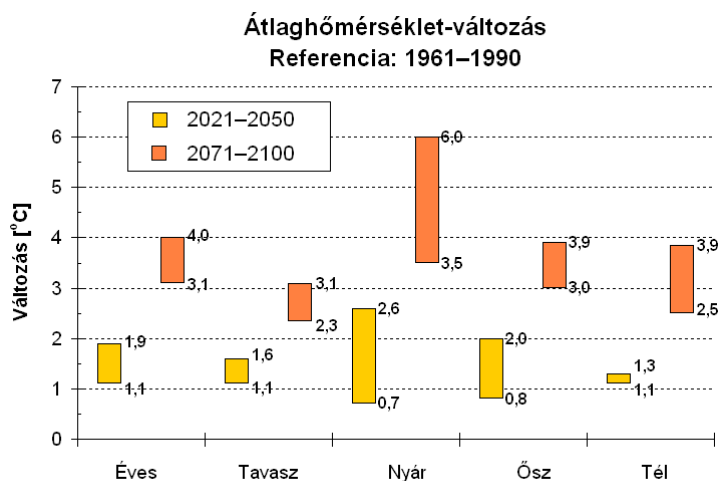
**3. ábra.** A hazai regionális klímamodellek éves és évszakos csapadékösszeg hibái (%) a CRU adatbázishoz képest, 1961-1990

**2. táblázat.** A hazai regionális klímamodellek összesített validációja Magyarország térségére a CRU adatbázishoz képest. A hőmérsékleti szisztematikus hibákat átlagolással, míg a csapadék esetében összegzéssel, illetve intervallumszerűen adjuk meg. A kvázi-tökéletes (ERA-40) és globális modell (GCM) határfeltételekkel előállított kísérletek eredményeit külön oszlopban tüntetjük fel.

	Átlagos hőmérsékleti hiba (°C)		Csapadékhibák összege (%)		Csapadékhibák által lefedett intervallum (%)	
	ERA-40	GCM	ERA-40	GCM	ERA-40	GCM
<b>ÉVES</b>	+0,3	-0,08	+61	+61	(-1) – (+38)	(+4) – (+22)
<b>TAVASZ</b>	-0,3	-1,13	+150	+182	(+13) – (+72)	(+35) – (+69)
<b>NYÁR</b>	+1,05	+0,54	+85	-4	(-7) – (+75)	(-21) – (+23)
<b>ŐSZ</b>	+0,05	-0,98	-42	+34	(-17) – (-3)	(-21) – (+41)
<b>TÉL</b>	+0,30	+0,95	+34	+69	(-1) – (+26)	(-9) – (+56)

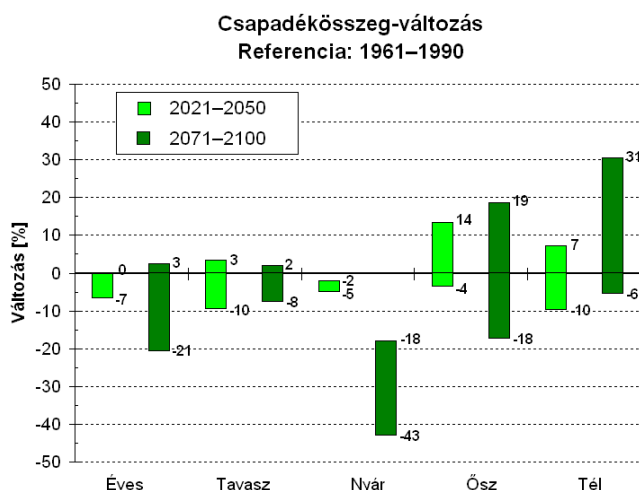
### Az alkalmazott klímamodellek jövőre vonatkozó együttes kiértékelése

A magyarországi átlagos változásokat összesítve jelenítjük meg, ahol mind a hőmérséklet (4. ábra), mind a csapadék (5. ábra) esetében a modellek által szimulált változások felső és alsó határát mutatjuk be, azaz a modellek által meghatározott teljes bizonytalansági intervallumot.



**4. ábra.** Az éves és évszagos átlaghőmérséklet-változási intervallumok (°C) a négy modell eredményei alapján az 1961-1990 referencia időszakhoz képest. A sárga oszlopok a 2021-2050, míg a narancssárgák a 2071-2100 időszakot jelölik.

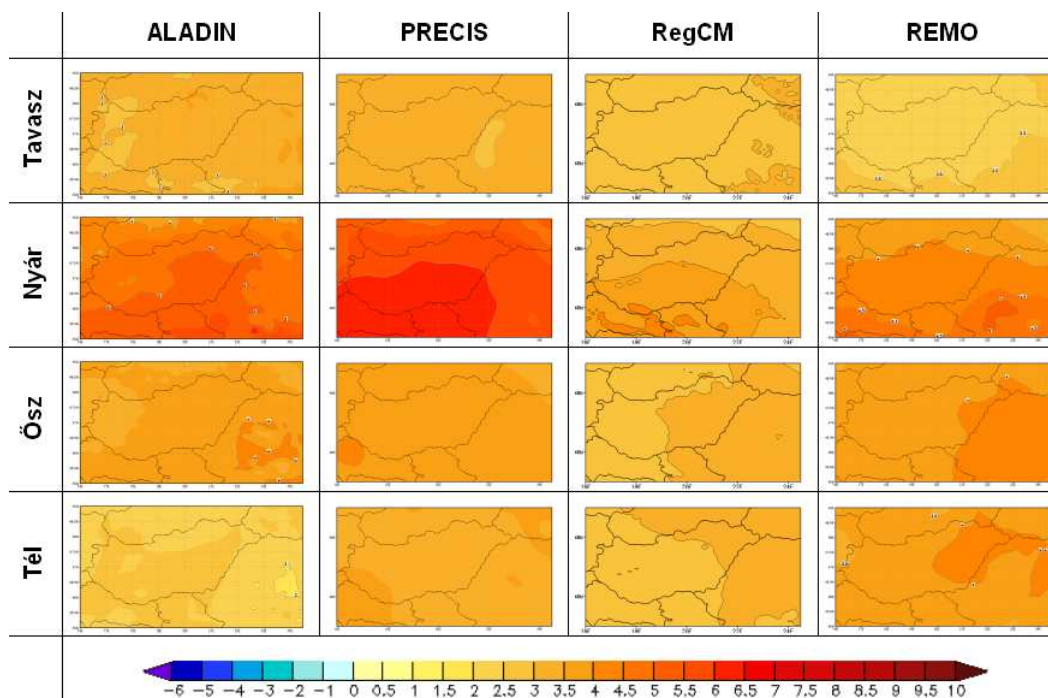
A hőmérséklet esetében egyértelmű a növekedő trend, amely nagyobb változásokat (és egyben bizonytalanságokat is) jelent a század végére. A hőmérséklet-emelkedés várhatóan nyáron lesz a legnagyobb, de ennek pontos értéke éppen ebben az évszakban a legbizonytalanabb. Megjegyezzük, hogy a hőmérséklet megváltozása minden időszakban és minden magyarországi rácspont esetében statisztikailag szignifikáns.



**5. ábra.** Az éves és évszagos csapadékösszeg-változási intervallumok (%) a négy modell eredményei alapján az 1961-1990 referencia időszakhoz képest. A világoszöld oszlopok a 2021-2050, míg a sötétzöldek a 2071-2100 időszakot jelölik.

A csapadék esetében éves szinten inkább a csökkenés valószínűsíthető, akárcsak tavasszal. A bizonytalanság mértéke azonban olyan, hogy mind az éves, mind a tavaszi csapadékösszeg tekintetében akár a gyenge növekedés is elképzelhető (azaz van olyan modell, amely a csapadék növekedését szimulálja). Nyáron minden modell egyértelműen csökkenést „prognosztizál”: kisebb mértékben a közelebbi (2-5%), míg jelentősebb mértékben a távolabbi jövőre (18-43%). Ősszel és télen a csapadékváltozás iránya és mértéke még nehezebben interpretálható. Ősszel mindkét időszakban a növekedésnek nagyobb az esélye, de úgy, hogy az évszázad végére akár nagyobb mértékű csökkenés is előfordulhat. Télen a két időszak között eltérő tendencia figyelhető meg: 2021-2050-re inkább a csökkenés, míg 2071-2100-ra inkább növekedés valószínűsíthető. Mindazonáltal mind ősszel, mind télen jelentős a bizonytalanság, s jelen tudásunk szerint azt tételezzük fel, hogy téli csapadék megváltozása nem lesz egyirányú napjainktól a XXI. század végéig: eleinte csökkenésre számíthatunk, ami a század végére növekedésbe megy át. Állításaink bizonytalanságát még tovább fokozza az a tény, hogy a csapadék esetében a változások statisztikai értelemben többnyire nem szignifikánsak, s az évszázad végére a bizonytalansági intervallum (a modell-eredmények szórása) is növekszik.

A fentiek mellett érdemes megnézni az egyes modellek által Magyarországra szimulált térképes hőmérséklet-változási tendenciákat a távolabbi jövőre nézve (6. ábra) annak érdekében, hogy a változások területi eloszlásáról is képet kaphassunk. A nyári legnagyobb mértékű növekedés ezeken a térképsorokon is egyértelműen kitűnik, s láthatjuk azt is, hogy az országon belül szinte minden évszakban a déli és a délkeleti országrészben várható a nagyobb mértékű melegedés.

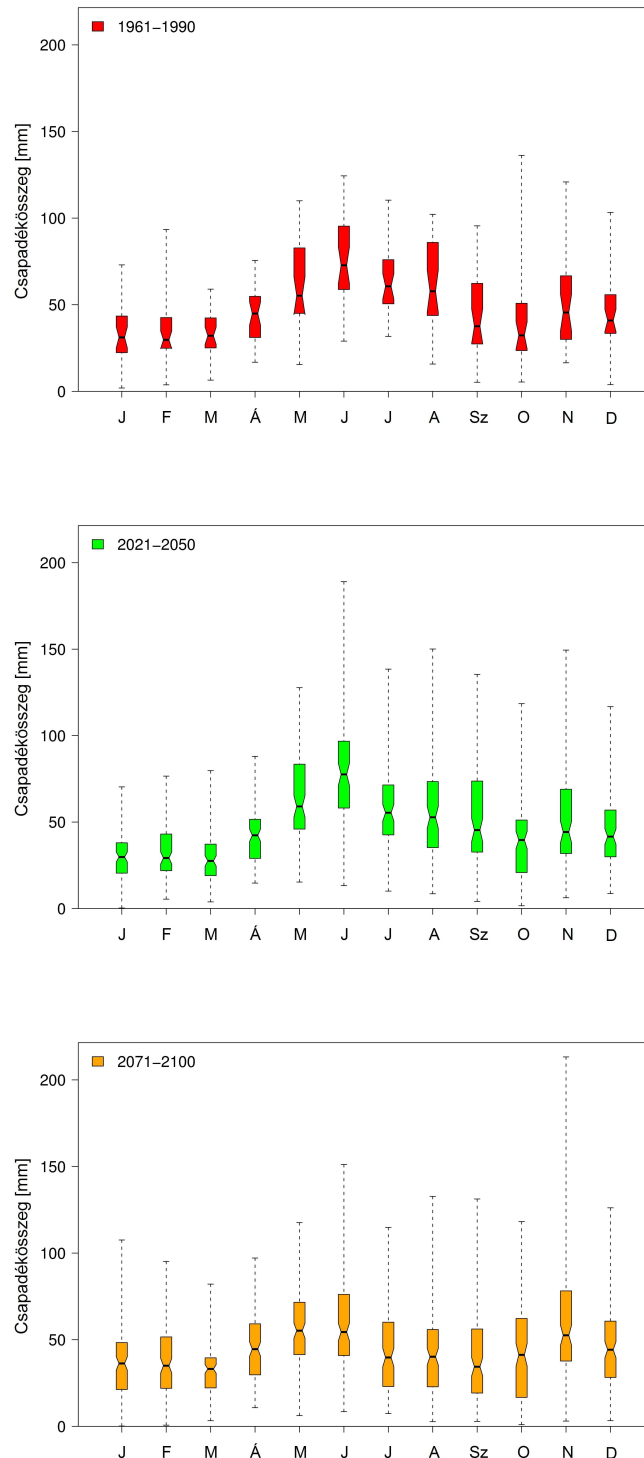


**6. ábra.** A hőmérséklet évszakos megváltozása Magyarország térségére a 2071–2100 időszakra az 1961-1990 referencia időszakhoz képest a négy alkalmazott regionális klímamodell eredményei alapján

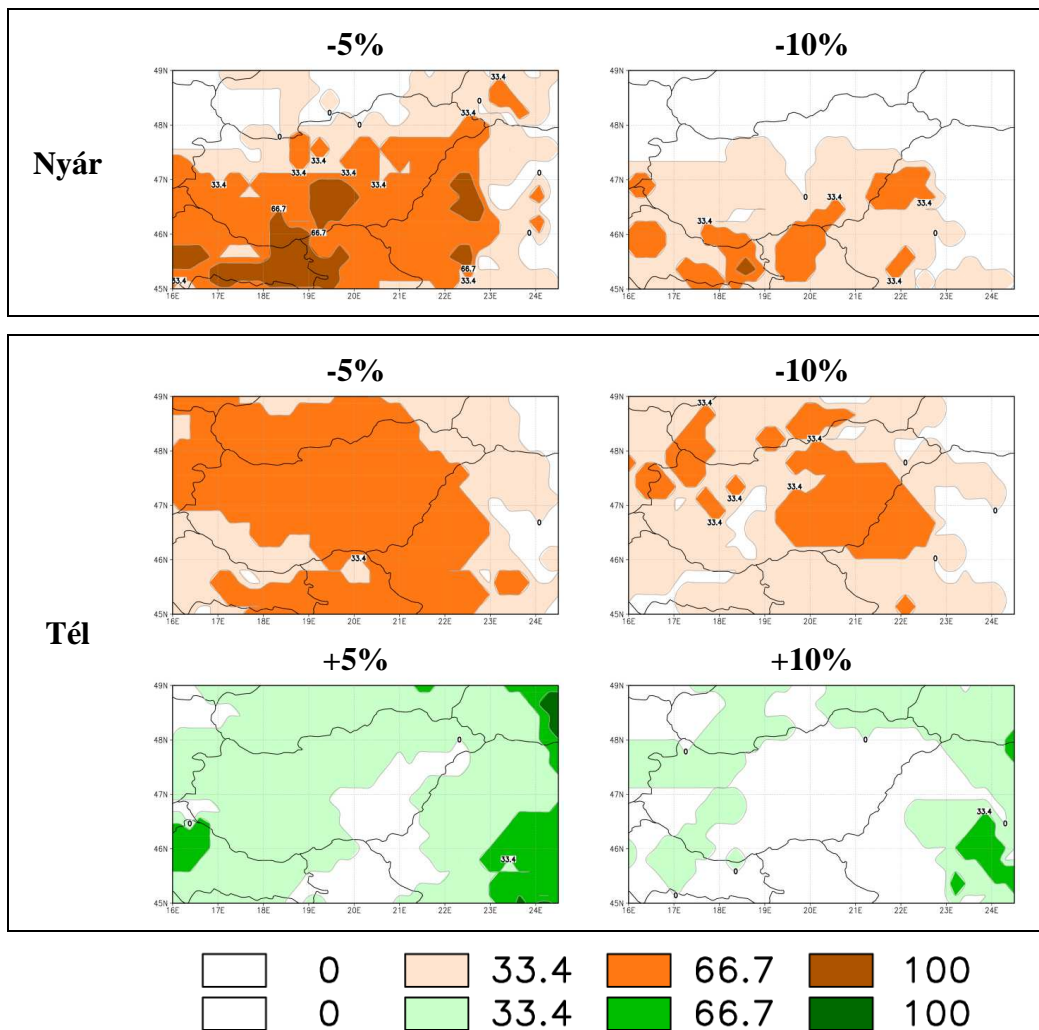


A csapadék várható megváltozását érdemes nagyobb részletességgel elemezni. Ehhez az ún. box-plot diagramokat használjuk (7. ábra), amelyek révén a jelenlegi (megfigyelési) és a két jövőbeli időszakra várható havi csapadékösszegeket elemezzük Magyarország térségére. A várható havi csapadékösszeg-értékeket úgy állítottuk elő, hogy az 1961-1990 időszakra megfigyelt adatokhoz hozzáadtuk a modellek által szimulált változásokat a 2021-2050, illetve a 2071-2100 időszakra. A jelenlegi éghajlat (7. ábra felső panel) esetében tudjuk azt, hogy a legcsapadékosabb hónapunk a június és a csapadéknak novemberben van egy másodlagos maximuma. A legnagyobb változékonyság októberben tapasztalható (azaz ez az a hónap, ami a legszeszélyesebb a lehulló csapadék mennyiségét tekintve). Egy másik érdekesség, hogy előfordulhat olyan január is, amikor nullához közeli a lehullott csapadék országos átlaga. Az évszázad közepére (7. ábra középső panel) ez a kép annyiban változatlan, hogy továbbra is a június marad a legcsapadékosabb hónapunk, ugyanakkor ennek a hónapnak a változékonysága igencsak megnő (s ez lesz a „legszeszélyesebb” hónap), azaz noha általában sok a csapadék ebben a hónapban, de nem zárható ki az sem, hogy lesznek olyan évek, amikor igen kevés csapadék hullik. A január mellett most már októberben is előfordulhat az, hogy nem hullik csapadék, mindazonáltal a csapadék éves menetében nem tapasztalható érdemi változás. Az évszázad végére (7. ábra alsó panel) már azt tapasztaljuk, hogy a november a júniushoz hasonlóan csapadékos lesz, habár a bizonytalanság mértéke is ekkor lesz a legnagyobb. Feltűnő, hogy az egyes hónapok változékonysága (a modellek szórása) mennyire megnő a korábbi időszakokhoz képest, és így az évszázad végére az se lenne meglepő, ha az október és február közötti időszakban lenne olyan hónap, amikor nem hullik csapadék. A fentiek mellett szembeötlő, hogy a csapadék éven belüli átlagos eloszlása sokkal egyenletesebb lesz a jelenlegi állapothoz képest.

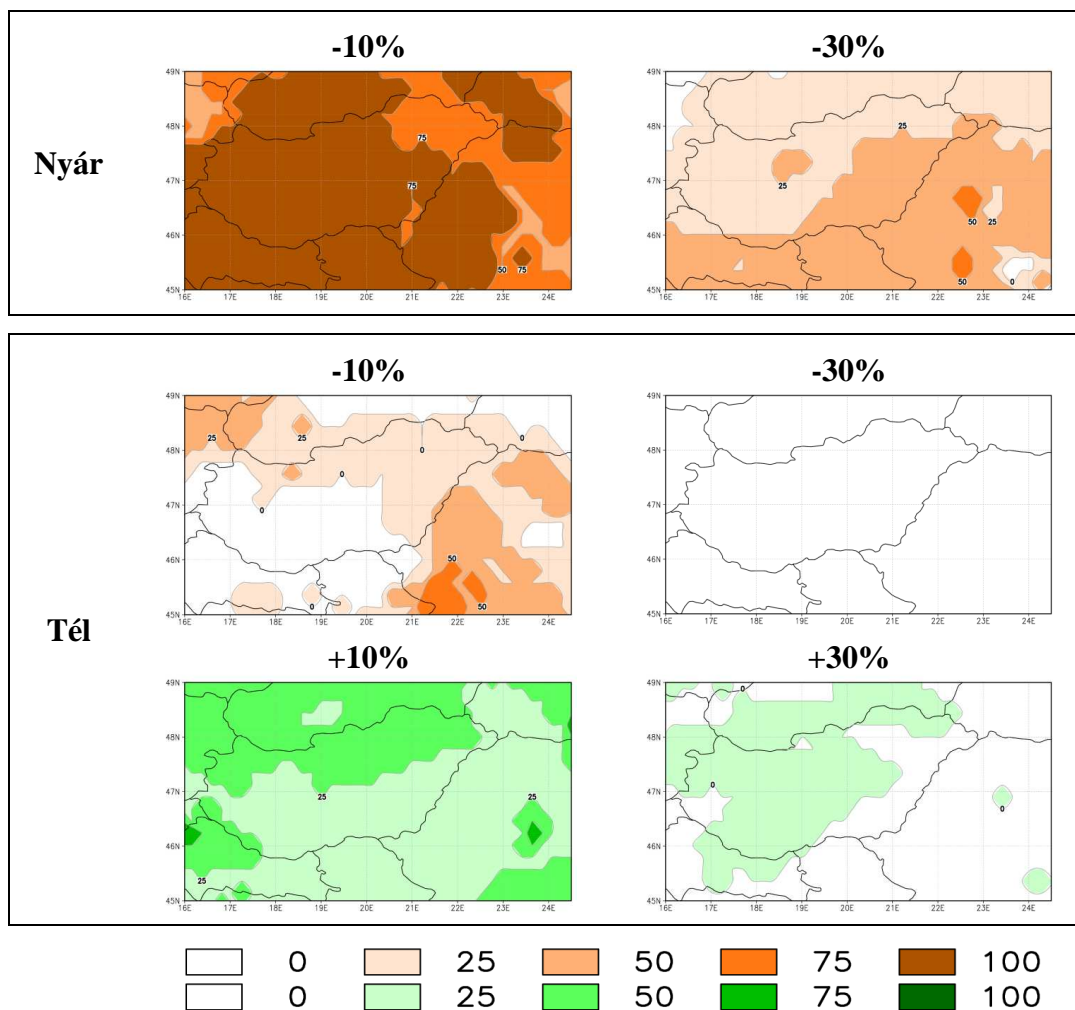
Az együttes kiértékelés legizgalmasabb eleme a valószínűségi információk előállításának és interpretálásának. A valószínűségi térképek elkészítése során megvizsgáltuk, hogy adott értéknél nagyobb változásnak (csökkenésnek vagy növekedésnek) mekkora a valószínűsége a három, illetve a négy modell eredményei alapján a közeli és a távoli jövőre. A magyarországi mini-ensemble kis elemszámánál fogva csak egyszerű valószínűségi megállapításokra alkalmas, mivel a valószínűségeket az elemszámtól függően csak négy illetve öt értéket vehetnek fel. Az eredmények bemutatásához ezúttal is a csapadékokra és azon belül is a nyári és téli csapadékmennyiségre koncentrálnak 2021-2050-re (8. ábra) és 2071-2100-ra (9. ábra), tekintettel arra, hogy a nyári csapadékváltozás mértéke, valamint a téli csapadéktendenciák előjele igen bizonytalan, azaz érdemes ezt a kérdést erről az oldalról is megvizsgálni. A korábbi időszakokra a nyár folyamán egyértelmű, de viszonylag kis mértékű csapadékcsökkenés látható, amely elsősorban a déli országrészt érinti. Télen a modellek többsége csökkenést jelez, de a háromból egy modell növekedést valószínűsít. Az évszázad végére a nyári csökkenés nagyobb mértéke nagyobb valószínűségű, mint a korábbi időszakban, mely összhangban van korábbi állításainkkal. A téli évszakban a csökkenés valószínűsége már jóval kisebb, mint korábban, ugyanis a modellek többsége (elsősorban az északi országrészben) csapadéknövekedést jelez. Ez utóbbi igen érdekes, mivel – ismerte az egyes modellek eredményeit is – ez nem annak köszönhető, hogy egy negyedik modellel és egy újabb forgatókönyvvel bővült a mini-ensemble, hanem annak, hogy az egyik modell eredményeiben eltérő tendenciákat jelez a két jövőbeli időszakban. Ez is arra utal, hogy a csapadék-szimulációk és azok bizonytalansága jóval összetettebb, és kevésbé kiszámítható, mint például a hőmérséklet esetében.



**7. ábra.** A havi csapadékösszegek jelenlegi, illetve várható jövőbeli alakulásai és azok évek közötti szórásai Magyarországra. Felső panel: CRU megfigyelési adatok 1961-1990-re (piros); középső panel: a várható értékek 2021-2050-re (zöld); alsó panel: a várható értékek 2071-2100-ra (narancssárga). A jövőbeli értékek kiszámításánál a modellek változásait hozzáadtuk az 1961-1990-re vonatkozó átlagos CRU megfigyelési értékekhez.

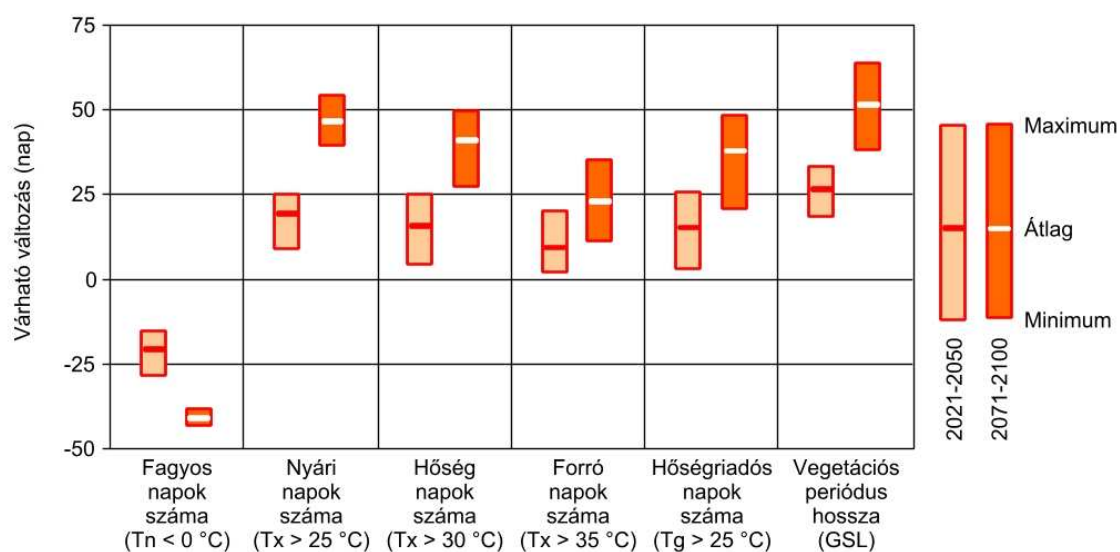


**8. ábra.** A 2021-2050-re várható nyári és téli csapadékösszegek legalább 5%-kal, illetve 10%-kal való megváltozásainak valószínűségei. A barna színek a negatív (felső két sor), a zöldek a pozitív változások (alsó sor) valószínűségére vonatkoznak.

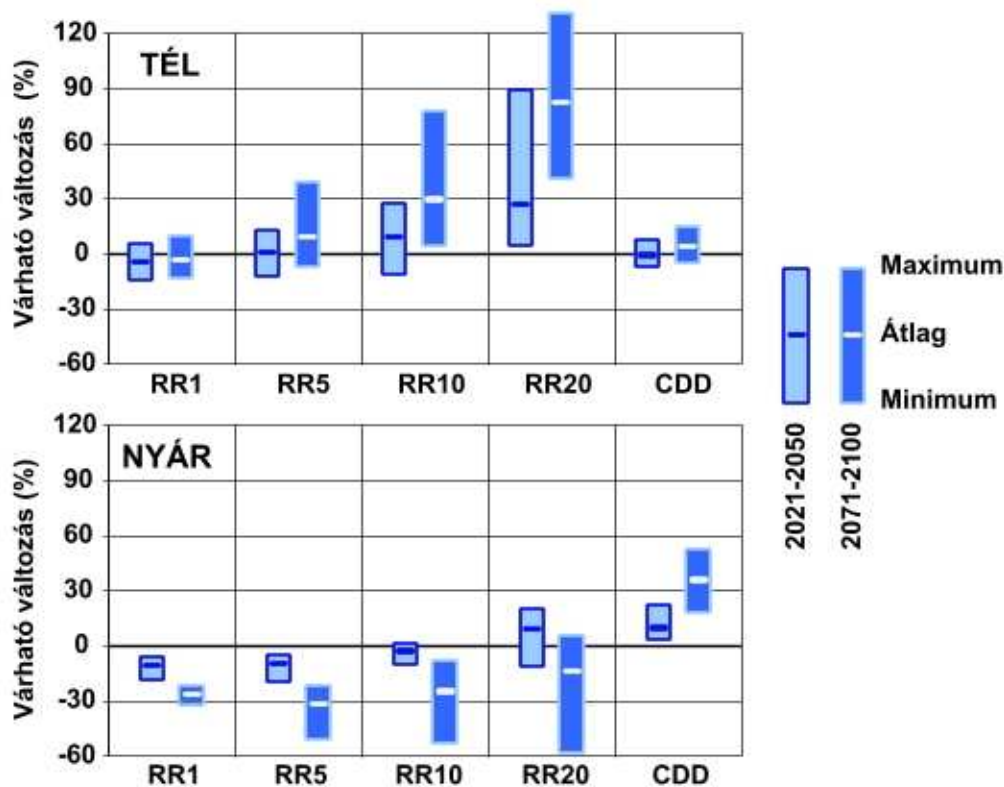


**9. ábra.** A 2071-2100-ra várható nyári és téli csapadékösszegek legalább 10%-kal, illetve 30%-kal való megváltozásainak valószínűségei. A barna színek a negatív (felső két sor), a zöldek a pozitív változás (alsó sor) valószínűségére vonatkoznak.

Végül, de nem utolsósorban vessünk pillantást a szélsőségekkel kapcsolatos várható változásokra is. Az átlagos viszonyokhoz hasonló formában mutatjuk be a hőmérséklettel (10. ábra), illetve a csapadékkal (11. ábra) kapcsolatos néhány szélsőség várható változását. A hőmérsékleti szélsőségek kapcsán azonnal szembeötlő az, hogy a negatív szélsőségek számában a számottevő csökkenés, míg a pozitív szélsőségek számában jelentős növekedés várható. A csapadék szélsőségeknél ismét csak a nyári és a téli változásokra koncentrálnak. Az általános tendencia az indexek többségében az, hogy télen a csapadékos események növekedése, nyáron pedig csökkenése valószínűsíthető, mely az évszázad végére nagyobb változást jelent. A kis csapadékkal (10 mm alatt) járó események száma mindegyik modell szerint csökken a nyár folyamán, míg télen a 20 mm feletti csapadékok növekednek egyértelműen. A többi csapadékkal kapcsolatos változás (kivéve a 10 mm-t meghaladó napok számát az évszázad végére) annyiban nem egyértelmű, hogy mindegyik index esetében a változás iránya bizonytalan (vannak pozitív és vannak negatív változásokat „prognosztizáló” modellek is). Az egymást követő száraz napok esetében a téli változás igen kis mértékű, viszont a nyári növekedés egyértelmű.



10. ábra. Hőmérsékleti szélsőség indexek várható változása (nap) Magyarország területére a 2021-2050 (világosabb narancsszín), illetve a 2071-2100 (sötétebb narancsszín) időszakokra az 1961-1990 referencia időszakhoz képest



11. ábra. A csapadékkal kapcsolatos szélsőség indexek várható változása (%) Magyarország területére a 2021-2050 (világosabb kék), illetve a 2071-2100 (sötétebb kék) téli és nyári időszakokra az 1961-1990 referencia időszakhoz képest

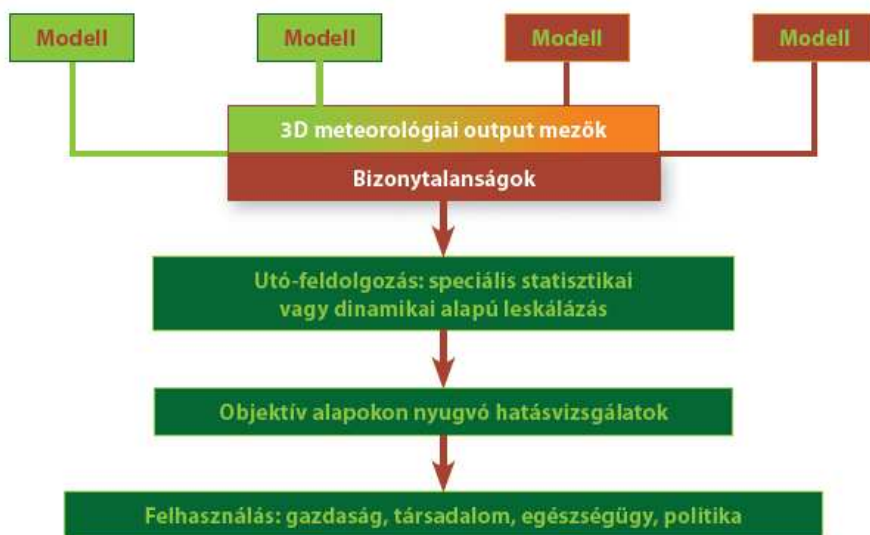
## **Összefoglalás, következtetések, tervek**

Az Országos Meteorológiai Szolgálat és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszéke egy négy regionális klímamodellből álló mini-ensemble rendszert állított össze és elemzett Magyarország területére. Az együttes kiértékelés során az OMSZ ALADIN-Climate és REMO (Szabó et al., 2011), illetve az ELTE PRECIS és RegCM (Pongrácz et al., 2011) modelljeit használtuk fel. A kiértékelés első lépése a modellek együttes múltira vonatkozó validációja volt, mely során megállapítottuk, hogy a modellek kisebb-nagyobb hibákkal terheltek, illetve a tökéletes határfeltételekkel és a globális modellekkel meghajtott eredmények merőben eltérnek egymástól nehezítve a modellekkel kapcsolatos hibák pontos meghatározását. Összességében az alkalmazott regionális klímamodellek általában melegebbek és csapadékosabbak, mint a valóság, de természetesen az egyes modellek eltérő viselkedést mutathatnak. A validációs eredmények alapján folyamatosan fejlesztjük az egyes modelleket, illetve a jövőre vonatkozó eredmények kiértékelése során az ún. delta-módszert használjuk, amikor a modellek által szimulált jövőbeli és múltbeli értékek különbségét képezzük az esetleges szisztematikus (és változatlanul feltételezett) modellhibák kiküszöbölésére. A jövőre vonatkozó projekciók elemzésénél arra voltunk elsősorban kíváncsiak, hogy az ensemble kiértékeléssel kapcsolatos eredmények mennyiben tudnak többet mondani, mint a már ismert európai projektek (PRUDENCE: <http://prudence.dmi.dk> és ENSEMBLES: <http://ensembles-eu.metoffice.com>) eredményei. Ebben a tekintetben elsősorban a csapadék megváltozása az, ami különösen érdekes, mert a csapadék az a változó, melynek magyarországi szimulációja az egyik legnehezebb feladat (ugyanis Magyarország egy olyan átmeneti zónában fekszik, ahol az éves csapadékösszeg megváltozása előjelet vált az európai térségben). Ráadásul a csapadék szimulációkban nagyfokú különbség mutatkozik az egyes modellek eredményei között, illetve a csapadékkal kapcsolatos változások többsége statisztikailag nem szignifikáns. Az európai vizsgálatok Magyarországra vonatkozó eredményei megerősítésre kerültek abban a vonatkozásban, hogy a hőmérséklet folyamatos (de nem egyenletes) emelkedése várható a jövőben. Az éves csapadék tekintetében némileg csökkenő trend figyelhető meg és a modellek jó egyezést mutatnak a nyári csapadékösszeg csökkenésében. A magyarországi éghajlatváltozással kapcsolatban fény derült néhány további olyan részletre is, amelyek árnyalják az ismereteinket, különös tekintettel a csapadékkal kapcsolatos változásokra:

- A legnagyobb mértékű melegedés a nyár folyamán várható, de ennek pontos mértéke különösen az évszázad végére nagyon bizonytalan.
- A téli csapadék változása jelen tudásunk szerint nem folytonosan (lineárisan) fog változni a jövőben: az évszázad közepére inkább csapadékcsökkenést valószínűsítene a modellek, amelyet azonban csapadéknövekedés követ a század végére.
- A csapadékintenzitás a várakozásoknak megfelelően várhatóan növekedni fog, azonban ez inkább az őszi és a téli időszakra lesz jellemző és nem a tavaszi és nyári zivataros évszakokban (és ez már ellentétben áll az általános vélekedéssel).

A fenti eredmények is azt igazolják, hogy fontos az együttes kiértékeléssel megkezdett munka folytatása. Ennek keretében az alábbi fejlesztési irányokat szeretnénk megvalósítani:

- Szükséges a jelen dolgozatban leírt mini-ensemble egyes tagjainak egyenkénti fejlesztése, hisz minél „jobbak” az alkalmazott regionális klímamodellek, annál jobb minőségű lesz a belőlük létrehozott modell-együttes is:
  - Újabb, fejlettebb modell változatok telepítése minden egyes regionális klímamodellel esetében.
  - A PRECIS futtatások kiegészítése a közelebbi jövőre és mindkét időszakra immáron az A1B forgatókönyv felhasználásával (ily módon egységesíthető lesz a négy modell együttese, azaz mindkét időszakra négy modell fog a rendelkezésünkre állni, ráadásul ugyanazt a kibocsátási forgatókönyvet használva).
  - A 10 km-es felbontású REMO futtatások előkészítése és megvalósítása.
  - Az ALADIN-Climate modell optimális tartományának meghatározása és a 10 km-es felbontású kísérletek megismétlése (ennek szükségességéről Szabó et al., 2011 nyújt áttekintést).
- A kapott eredményeket alaposabban szükséges összevetni az ENSEMBLES EU projekt eredményeivel annak érdekében, hogy világos legyen az, hogy a négytagú magyarországi ensemble mennyiben képes lefedni a teljes bizonytalansági intervallumot, illetve melyek azok a bővítési irányok, amelyek megvalósításával teljesebbé tehető a Magyarországra vonatkozó kiértékelés.
- Az OMSZ és az ELTE között fennálló együttműködés kiterjesztése az éghajlati hatásvizsgáló szakemberekkel. Ennek a lépésnek az a nem titkolt célja, hogy az éghajlatváltozás hatásaival, illetve az ahhoz való adaptációval foglalkozó szakemberek teljes és egységes képet kapjanak a hazai két klímamodellezéssel foglalkozó műhelytől, és legfőképpen figyelembe tudják venni az éghajlati projekciókban rejlő bizonytalanságokat is (a 12. ábra mutatja be az éghajlati modellek komplex, bizonytalanságokat is figyelembe vevő alkalmazhatóságát az éghajlati hatásvizsgálatok elvégzéséhez).



**12. ábra.** Az éghajlati hatásvizsgálatok sematikus ábrája az éghajlati modellekben rejlő bizonytalanságok számszerűsítésének figyelembevételével

Végezetül megemlítjük, hogy a jelen dokumentumban összegzett kutatás legfontosabb megállapításai elérhetőek és letölthetőek az OMSZ honlapjáról: [http://www.met.hu/pages/kfo/docs/OMSZ-ELTE\\_eghajlati\\_osszefoglalo.pdf](http://www.met.hu/pages/kfo/docs/OMSZ-ELTE_eghajlati_osszefoglalo.pdf).

### **Köszönetnyilvánítás**

A szerzők köszönetet szeretnének mondani a magyarországi regionális klímamodelllezési mini-ensemble-t alkotó modellek kifejlesztőinek, így a toulouse-i Météo France-nak és az ALADIN nemzetközi projekt résztvevőinek az ALADIN-Climate; az exeteri Hadley Központ-nak a PRECIS; a trieszti ICTP-nek a RegCM és a hamburgi Max Planck Intézetnek a REMO modell kifejlesztéséért és a kapcsolódó együttműködésekért. Külön köszönjük Tóth Helga, Lőrincz Andrea és Csima Gabriella munkáját az ALADIN-Climate modellel kapcsolatban. Kutatásainkat támogatta az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával az „Európai Léptékkal a Tudásért, ELTE-TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003. A felsőoktatás minőségének javítása a kutatás-fejlesztés-innováció-oktatás fejlesztésén keresztül” pályázat, a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, az OTKA K-78125 számú pályázata, az NKFP-6/079/2005 pályázat. További segítséget nyújtott az EU VI. keretprogram CECILIA és CLAVIER projektje.

### **Irodalomjegyzék**

- van der Linden, P., Mitchell, J.F.B. (eds.), 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter EX1 3PB, UK.
- Mitchell, T. D. and Jones, P. D., 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* 25, 693–712
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, Jung, T., Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi Z., 2000: *Special Report on Emission Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp. Available online at: <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm>
- Pongrácz R., Bartholy J., Pieczka I., Torma Cs., 2011: Az ELTE regionális klímamodelljei: PRECIS és RegCM. 36. Meteorológiai Tudományos Napok, beszámolókötet
- Szabó, P., Horányi, A., Krüzselyi, I., Szépszó, G., 2011: Az Országos Meteorológiai Szolgálat regionális klímamodelllezési tevékenysége: ALADIN-Climate és REMO. 36. Meteorológiai Tudományos Napok, beszámolókötet.
- Uppala, S.M., Kallberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., Bechtold, V.D., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., Van De Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Cairns, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Holm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, L., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J.F., Morcrette, J.J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., Woollen, J., 2005: The ERA-40 re-analysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 131, 2961-3012.



# **A modellezett éghajlatváltozás becsült hatása a Balaton párolgására**

**Kovács Ákos, Szilágyi József**

BME Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék  
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3–9, email: kovacs@vit.bme.hu, szilagyi@vit.bme.hu

**Összefoglaló** – A tavak vízmérlegében a párolgás az egyik legnagyobb részt kitevő elem, ezért pontosítása elengedhetetlen a hidrológiai előrejelzés szempontjából. Ebben a tanulmányban a Balaton párolgását a Penman- és a Priestley-Taylor-egyenletek segítségével adjuk meg oly módon, hogy hozzájuk egy-egy súlyszámot rendelünk havonta. A súlyszámok ismeretében a jövőbeli párolgás egyszerűen becsülhető. A párolgás előrejelzése a REMO 5.0 és REMO 5.7 adatbázisából készült modelladatok segítségével készült.

## ***Bevezetés***

Időjárásunkban az elmúlt években jelentős szélsőségeket figyelhettünk meg, ami a tavainkon is éreztette hatását. A 2000-es évek elején tapasztalt csapadékhiány miatt a nagy tavainkon a vízállás jelentősen csökkent, ami a Balaton esetében felvetette a vízpótlás kérdését. Ennek szükségességéről éles vita robbant ki a különböző érdekcsoportok, szervezetek és pártok között, a sajtó is sokat foglalkozott a témával. Az elmúlt években az időjárás ismét csapadékosabbra fordult. Ennek eredményeképpen a Balaton vízszintje rohamosan nőtt, elérte a felső szabályozási szintet, és manapság a Sió-csatorna zsilipkapuja aktívan üzemel.

Egy esetleges vízutánpótlás számos költséggel járna, így a párolgás pontosítása és annak előrejelzése gazdasági haszonnal kecsegtet. Ugyancsak az eredmények fontos felhasználója lehet a turizmus, hiszen a Balaton déli partján jelentős területek kerültek szárazra az említett aszályos időszakban, megváltoztatva ezzel a strandolási körülményeket.

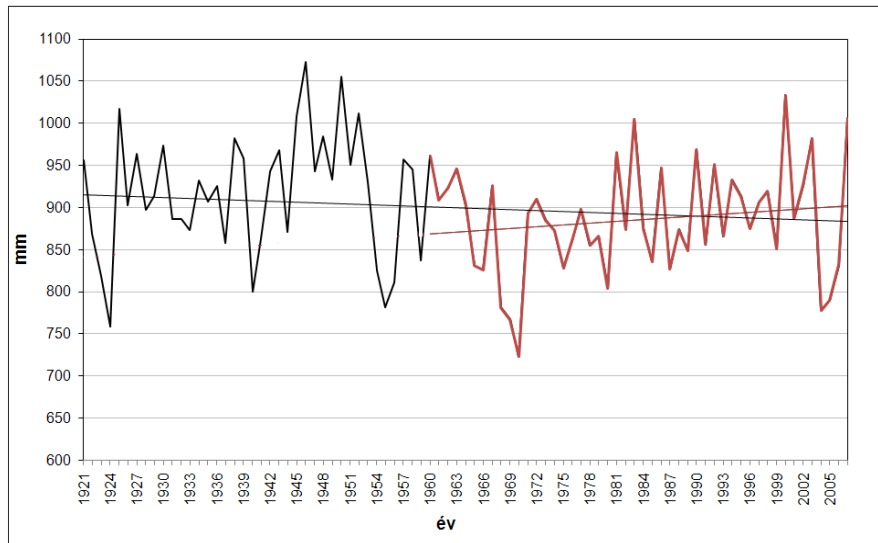
Jelen tanulmány célja annak a megvizsgálása, hogy a tó párolgása milyen összefüggést mutat a nedves környezeti és a potenciális párolgással, azaz milyen súlyozással lehetne alkalmazni ez utóbbi két párolgási értéket havonta, hogy a Balaton vízmérlegéből kapott párolgási értékek a lehető legoptimálisabb közelítést adják.

## ***Párolgás a múltban***

A Balaton vízmérlegéből kapott párolgását mutatja az *1. ábra*, ahol látható, hogy hosszú távon a tavon enyhe csökkenő trend figyelhető meg a párolgás terén. Ugyanezt a század közepétől nézve – mivel a kutatás során felhasznált modelladatok az 1950-től és 1960-tól álltak rendelkezésre – már növekvő trend észlelhető. Ez könnyen érthető is, hiszen mért adatok alapján a hőmérsékletben, a napfénytartamban és a telítési hiányban is növekvő trend volt, csupán a szélsébség csökkent kis mértékben.

Nem tudjuk, hogy a Balaton hosszabb távon csökkenő, vagy a rövidebb távon növekvő trendje érvényesül-e a jövőben. A következő 10–15 évben viszont ismét szárazabbra fordulhat időjárásunk, előállhat az elmúlt években tapasztalt vízhiányos helyzet és a vízpótlás kérdése ismét előtérbe kerülhet, mivel a turisztikai bevételekből élő vízparti lakosokat, a tó környéki települések önkormányzatait, a horgászokat és a vitorlázókat egyaránt károsan érinti a sekély víz miatt a partok eliszapolódása, megnehezítve a fürdözést, közlekedést. Sőt, a párolgás esetlegesen növekvő trendje és a

csapadék csökkenő trendje extrém esetekben a Balaton hosszú távon pozitív vízmérlegét is fenyegetheti, hiszen a múltban a tó legalább részlegesen többször is kiszáradt (Virág, 1999).



1. ábra. A Balaton vízmérlegből számolt párolgása és a trendje az időszak elejétől, valamint 1960-tól

### A tó párolgás becslése

Brutsaert és Stricker (1979) a Penman-egyenlettel (1948) határozta meg a potenciális párolgást ( $E_p$ , mm), ami a következőképp számítható:

$$E_p = \frac{\delta}{\delta + \gamma} Q_n + \frac{\gamma}{\delta + \gamma} f(u)(e^* - e)$$

ahol  $\delta$  a telítési párányomás görbéjének meredeksége (hPa/°C) a levegő hőmérsékletén ( $T$ ) (és nem a szükséges, de általában ismeretlen felszíni hőmérsékleten),  $\gamma$  a pszichrometrikus konstans (hPa/°C),  $f(u)$  a szélfüggvény (mm/nap/hPa, lásd lejjebb),  $e^*$  a telítési párányomás hPa-ban a levegő hőmérsékletén,  $e$  az aktuális párányomás szintén hPa-ban,  $Q_n$  pedig a nettó sugárzás mm/nap-ban.

Penman nyílt vízfelületre a következőképp határozta meg az  $f(u)$  szélfüggvényt:

$$f(u) = 0.26(1 + 0.54u_2)$$

ahol  $u_2$  a 2 m magasan mért szélesség, melyet m/s-ban szükséges kifejezni, hogy a párolgás mm/nap mértékegységű legyen a Penman-egyenletben.

A nedves környezeti párolgást ( $E_{TW}$ , mm) a Priestley-Taylor-egyenlet segítségével (Priestley és Taylor, 1972) lehet becsülni:

$$E_{TW} = \alpha \frac{\delta}{\delta + \gamma} Q_n$$

ahol  $\alpha$  értéke általában 1,20 és 1,32 között változik. A nedves környezeti párolgás döntően a felszín nettó sugárzásának ( $Q_n$ ) függvénye.  $E_{TW}$  és  $E_p$  között az a lényeges különbség, hogy míg a potenciális párolgási egyenletet Penman kis tavakra optimalizálta, addig a nedves környezetnek regionális méretűnek kell lennie, így az már jelentősen visszahat a környezeti változókra.

### A felhasznált meteorológiai jellemzők és a modellbe bemenő adatok

Mindkét egyenlethez léghőmérséklet-, párányomás- és globálsugárzás-adatok lettek alkalmazva, ezen kívül a Penman-egyenlethez szükségesek voltak a havi közepes szélsőségek is. Mivel a szélsőségek 10 m magasságban álltak rendelkezésre, ezért ezeket konvertálni kellett a szükséges 2 m-es magasságra (Brutsaert, 2005):

$$u_z = u_r \left( \frac{z}{z_r} \right)^{\frac{1}{7}}$$

ahol  $u_r$  a 10 m magasan mért szélsőségek m/s-ban és  $z_r=10$ .

Az állomások havi globálsugárzás-adataiból Morton WREVP modellje nettó sugárzást számolt (Morton, 1983) mm/nap mértékegységben. A nettó sugárzások viszont más értéket vesznek fel, ha a szárazföldre és mást, ha a tófelületre számítjuk. A Penman-egyenlet szárazföld felett mért légköri változókkal lett definiálva, beleértve a sugárzási mérleget is, így a hozzá szükséges  $Q_n$  is a szárazföldre számolt nettó sugárzásból adódott.

### A súlyozásos módszer

A tó párolgás becslése minden hónapra a Priestley-Taylor-egyenletből kapott nedves környezeti párolgás és a Penman-féle potenciális párolgás súlyozásával történt:

$$E_{súly} = a_1 \cdot \alpha \frac{\delta}{\delta + \gamma} Q_n^{t6} + a_2 \cdot \left[ \frac{\delta}{\delta + \gamma} Q_n + \frac{\gamma}{\delta + \gamma} f(u) (e^* - e) \right]$$

ahol  $a_1$  és  $a_2$  a kalibráció során kapott mértékegység nélküli súlyok,  $Q_n^{t6}$  a sekély tó felszínére számolt energia mm/nap-ban,  $E_{súly}$  pedig az ez által nyert becslés párolgás mm-ben. A számítás folyamán  $\alpha$ -t a leggyakrabban használt 1,26-os értékkel, míg a  $\gamma$  pszichrometrikus konstansot 0.67 hPa/°C-al alkalmaztuk.

Célszerű volt a kalibrálást mindig az adott tónál vizsgálható időszak páros éveire véghezvinni, azért hogy az esetleges párolgásban megfigyelhető trend hatását elkerüljük a kalibrációs és verifikációs időszakok között. A verifikációs időszakot tehát a vizsgálható időszak páratlan évei alkották. A cél a kalibráció során annak megállapítása volt, hogy amennyiben a vízmérlegből adódó tó párolgásokat interpoláljuk a Priestley-Taylor-egyenletből és a Penman-egyenletből származó párolgás közé, akkor az milyen eredményt ad úgy, hogy  $a_1$  és  $a_2$  konstans egyike sem lehet negatív. A párolgást havi bontásban vizsgáltuk.

Megjegyzendő, hogy a kutatás kezdeti fázisában  $a_1$  és  $a_2$  összegét egységben kötöttük ki. Ez azonban jelentősen alábecsülte volna a párolgást bizonyos hónapokban (Kovács és Szilágyi, 2009a, b), ezért  $a_1$  és  $a_2$  korlátozás nélkül bármilyen értéket felvehet a pozitív tartományban.

## **Morton párolgásbecslése**

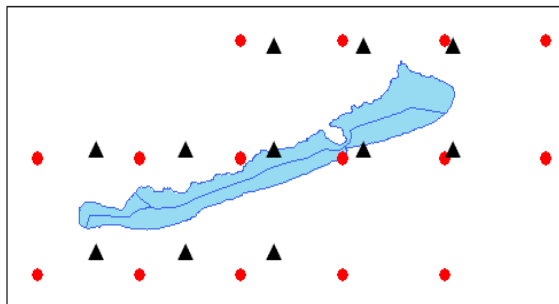
Morton párolgásbecslő modellje egy globális modell, mely a Föld minden pontján képes a párolgás becslésére mind tó, mind területi párolgás tekintetében. A futtatáshoz bemenő adatként meg kell adni a vizsgált hely tengerszint feletti magasságát, földrajzi szélességét; az evapotranszspiráció becsléséhez az évi átlagos csapadék mennyiségét, tó párolgás becsléséhez pedig a tó átlagos mélységét és sótartalmát. Az utóbbi kettő értéket 3 m-ben és 450 mg/l-ben határoztuk meg.

## **Felhasznált modelladatok**

A két bemenő adathalmaz közül az elsőt a REMO 5.0 regionális modell futtatásával készült modellkísérlet szolgáltatta az 1951–2050 időszakra, melyet az OMSZ készített el. A peremfeltételeket hazánk területén az ECHAM5/MPI-OM globális csatolt légkör-óceán modellrendszer mezői szolgáltatták, melyet az úgynevezett A1B-típusú üvegházgáz-kibocsátási forgatókönyv felhasználásával készítettek, ami egy közepesnek mondható forgatókönyv. A százéves időszakból két 30 éves szelet eredményeit használtuk fel a számításaink során. Ezzel az adathalmazzal a Balaton körül 11 rácspont modelladatainak számtani átlagával (2. ábra) becstük a párolgást az 1960–1990, illetve a 2020–2050 közötti időszakokra, az adatok felbontása 0.22 fokos.

A második adathalmaz neve REMO 5.7, melyet szintén az A1B-típusú üvegházgáz-kibocsátási forgatókönyv alapján a hamburgi Max-Planck-Institut für Meteorologie készített. Ez a modell Kelet-Franciaországtól Ukrajna keleti határáig lett futtatva az 1951–2050-ig tartó periódusra 0.25 fokos felbontás alapján.

A Balaton párolgását a REMO 5.7 modelladataival már 15 rácspont átlagával becstük a súlyozásos módszer segítségével (2. ábra). Mindkét modelladatsor esetben a felhasznált rácspontok körbeölelték a tavat.



2. ábra. A REMO 5.0 (háromszög) és a REMO 5.7 (kör) rácspontjai

## **A párolgás havi szintű vizsgálata**

A Penman párolgás átlaga a REMO 5.7 modelladataival alacsonyabb értékeket vesz fel a REMO 5.0-ból számolt párolgásnál végig az év folyamán. A Priestley-Taylor-féle nedves környezeti párolgást vizsgálva is ugyanez állapítható meg, bár az eltérés csupán kis mértékű a két adatsorral számolva (3., 4., 7. és 8. ábra).

Ezek magyarázata sem a tóra számolt nettó sugárzás (Priestley-Taylor párolgás esetén), sem a szárazföldre számolt nettó sugárzás (Penman párolgás esetén) havi átlagaiban nem felfedezhető, hiszen ezek az átlagok mindegyik adattípussal számolva

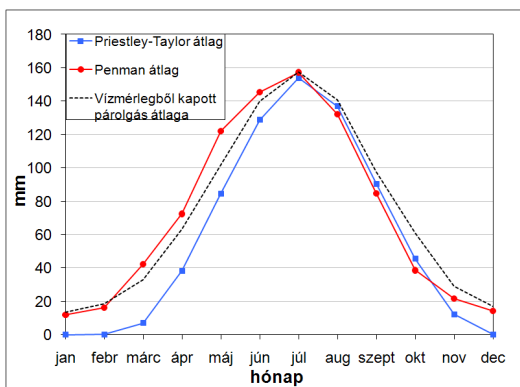
igen közel esnek egymáshoz. A nedves környezeti párolgás a nettó sugárzáson kívül csak a hőmérséklettől függ, a hőmérsékletek pedig pont a Priestley-Taylor párolgás nagyságának sorrendjében követik egymást. A Penman párolgás már függ a szélről és a telítési hiánytól is: bár a telítési hiányban jelentős különbség fedezhető fel a két adatsor között (a REMO 5.7 adatsora 20%-al szárazabb levegőt becsül a REMO 5.0-nál), ebben az esetben a szélsébség értékek voltak döntőek: a REMO 5.0 szélsébségei több, mint 50%-kal nagyobbak, mint a REMO 5.7-é (előbbi 3 m/s, utóbbi 2 m/s alatt van kevéssel, mindkettő 2 m magasán mérve). Júliustól év végéig mind a Priestley-Taylor párolgás, mind pedig a Penman-féle potenciális párolgás értékei kisebbek, mint a vízmérlegből számolt párolgás, emellett a különbségük is jóval kisebb, mint a tavaszi hónapokban, ami a Balaton nem elhanyagolható hőtárolási képességéből adódik (Kovács és Szilágyi, 2009). Ez mindkét adatsorból számolt párolgásra igaz.

A súlyozással kapott konstansokat az 1. táblázatban tüntettük fel. A súlyozásos egyenlet becslése mindkét modelladatsorral számolva igen közel esik a vízmérlegből kapott párolgáshoz (5., 6., 9. és 10. ábra). A legnagyobb hiba a kalibráció időszakában augusztusban keletkezett, a REMO 5.0 adataival számolva 9 mm, a REMO 5.7 adataival pedig 3 mm. A verifikáció időszakában a REMO 5.0 adataival júliusban lett a legnagyobb hiba, 8 mm, míg a REMO 5.7 adataival augusztusban, mely 5 mm.

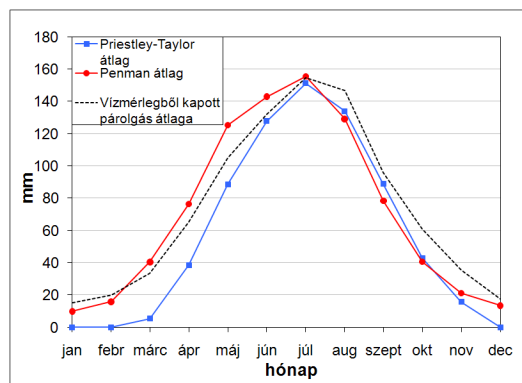
Szintén kivehető az 5., 6., 9. és 10. ábráról, hogy míg a REMO 5.0 adataival a Morton-modell annak ellenére, hogy egy globális modell, jól közelíti a párolgást, a REMO 5.7 adataival az év minden hónapjában alábecsli azt.

**1. táblázat.** A nedves környezeti párolgás ( $a_1$ ) és a Penman párolgás ( $a_2$ ) súlyértékei a Balaton esetében havonta

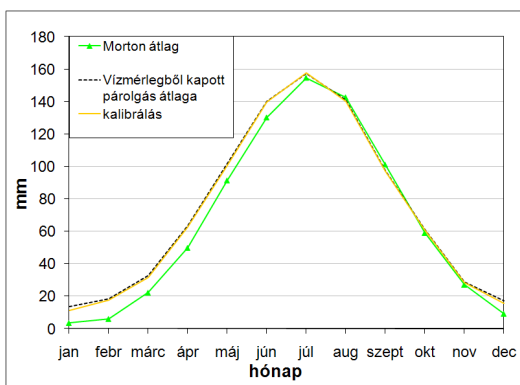
hónapok	REMO 5.0		REMO 5.7	
	$a_1$	$a_2$	$a_1$	$a_2$
január	0.000	0.925	0.000	0.787
február	1.912	1.068	0.000	0.929
március	0.000	0.748	1.542	0.593
április	0.000	0.863	0.547	0.603
május	0.279	0.632	0.032	0.899
június	0.477	0.539	0.948	0.188
július	0.908	0.114	1.086	0.000
augusztus	1.022	0.000	0.988	0.143
szeptember	0.651	0.448	0.000	1.200
október	0.699	0.746	1.378	0.147
november	0.988	0.751	0.724	0.932
december	0.526	1.092	4.774	0.953



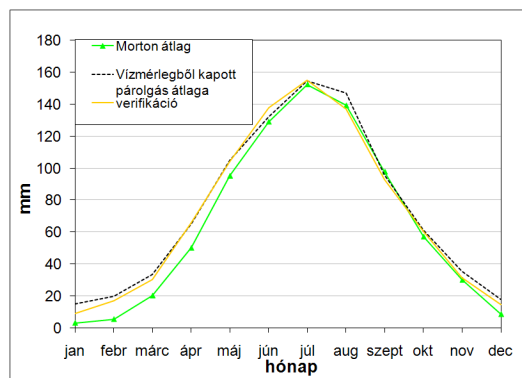
**3. ábra.** A Balaton 1960 és 1990 közötti párolgásainak havi átlaga a kalibrációs időszakban a REMO 5.0 adatbázisával számolva (páros évek)



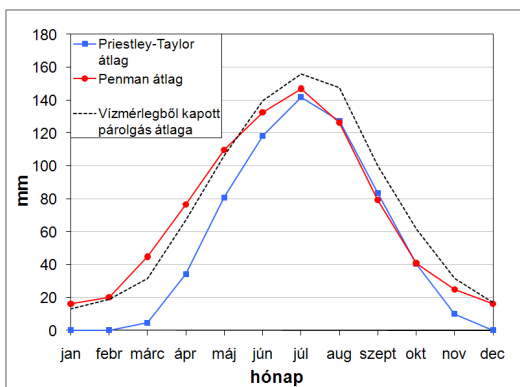
**4. ábra.** A Balaton 1961 és 1989 közötti párolgásainak havi átlaga a verifikációs időszakban a REMO 5.0 adatbázisával számolva (páratlan évek)



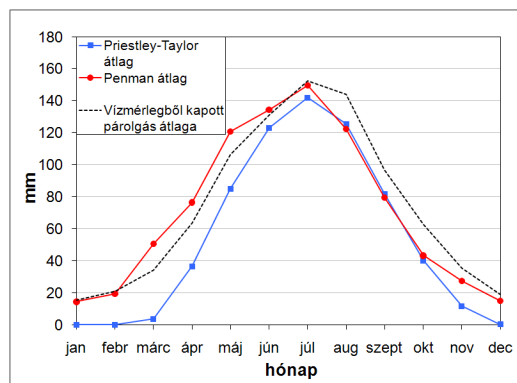
**5. ábra** A becsült párolgások a vízmérleg párolgásához képest az 1960-1990 közötti kalibrációs időszakban a REMO 5.0 adatsorával



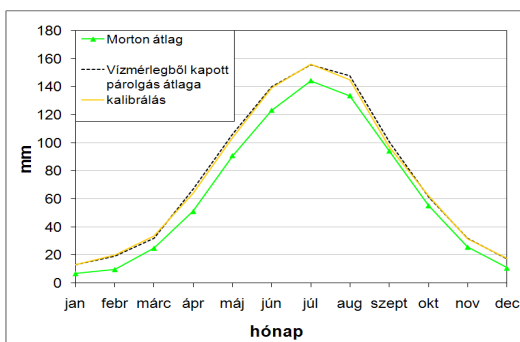
**6. ábra.** A becsült párolgások a vízmérleg párolgásához képest az 1960-1990 közötti verifikációs időszakban a REMO 5.0 adatsorával



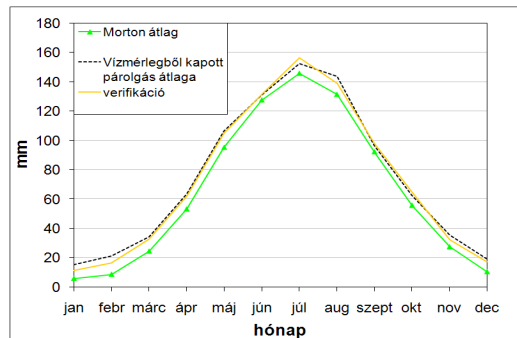
**7. ábra.** A Balaton 1952 és 2000 közötti párolgásainak havi átlaga a kalibrációs időszakban a REMO 5.7 adatbázisával számolva (páros évek)



**8. ábra.** A Balaton 1951 és 1999 közötti párolgásainak havi átlaga a verifikációs időszakban a REMO 5.7 adatbázisával számolva (páratlan évek)



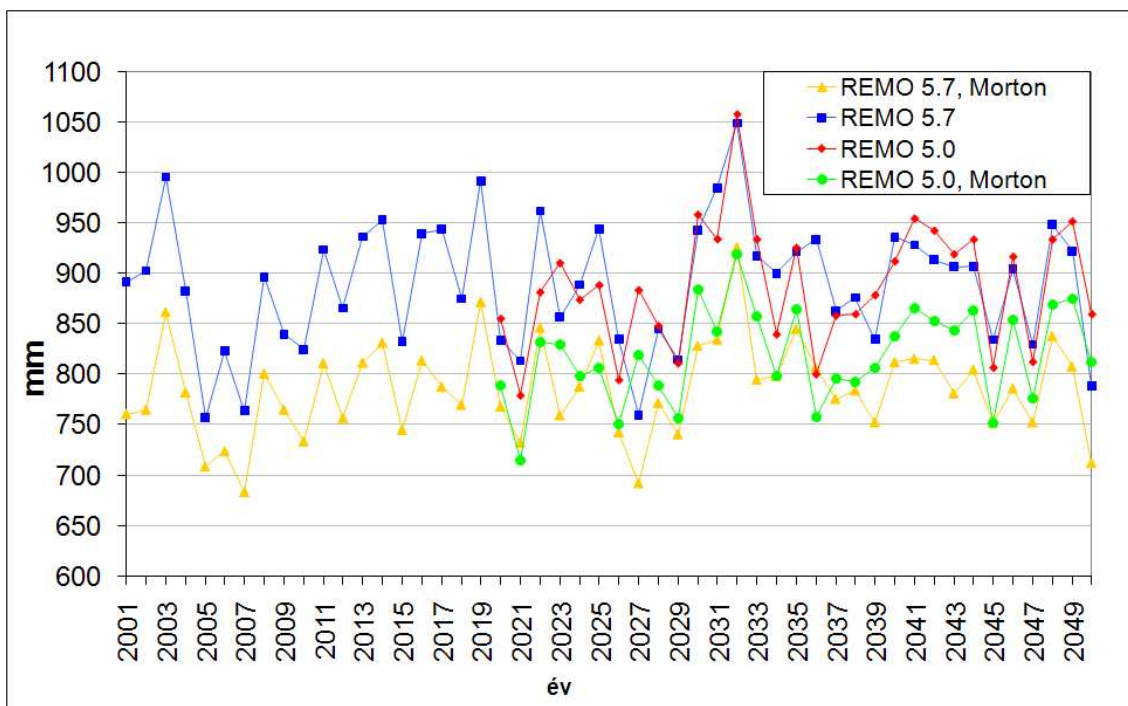
**9. ábra.** A becsült párolgások a vízmérleg párolgásához képest az 1950-2000 közötti kalibrációs időszakban a REMO 5.7 adatsorával



**10. ábra.** A becsült párolgások a vízmérleg párolgásához képest az 1950-2000 közötti verifikációs időszakban a REMO 5.7 adatsorával

### **Párolgás alakulása a jövőben**

A REMO 5.0 adataival 2020 és 2050 között tudtuk becsülni a párolgást, míg a REMO 5.7 adatsorával hosszabb periódust vizsgáltunk, mely 2001 és 2050 közé esett (11. ábra). Egyik adatsorral kapott becslés sem prognosztizált jelentős változást sem az 1951-2000, sem az 1960-1990 közötti időszak párolgásához képest: a REMO 5.0-ból kapott becslés 887 mm, a REMO 5.7 becslése 888 mm-t ad, ami 28 mm ill. 10 mm növekedést jelent. A Morton-modell mind a két adatsor jövőbeli becslésével számolva kisebb párolgást ad, mint a súlyozásos modell: 819 mm-t és 785 mm-t. Valószínűleg Morton a REMO 5.7 adataival alábecsülte a jövőbeli párolgást, ahogy azt a 2000 előtti időszakra havi szinten láttuk.



11. ábra. Balaton jövőben várható párolgása 2001 és 2050 között

### Eredmények értékelése, összefoglalás

Ebben a tanulmányban a Balaton jövőbeli párolgását becsültük Morton WREVP programja, ill. egy újfajta súlyozásos módszer segítségével. Bemutattuk, hogy a hónapok többségében a tó párolgása jól behatárolható felülről a Penman-egyenlettel, alulról pedig a Priestley-Taylor-egyenletből származó ún. nedves felszín párolgásértékeivel. Az egyenletek bemenő adatait a REMO 5.0 és REMO 5.7 adatbázisa szolgáltatta.

A célunk annak megvizsgálása volt, hogy miként lehet alkalmazni a nemzetközi irodalomban népszerű kétféle ún. „potenciális” párolgási egyenletet a Balaton párolgásának becslésére. Az eredmények részben igazolták azt a kiindulási hipotézist, hogy a tó párolgása behatárolható a Penman- ill. Priestley-Taylor-egyenletek által, lévén, hogy az előbbi kis sekély tavakra lett kalibrálva (süllyesztett párolgási kádak alkalmazásán felül), míg utóbbi regionális kiterjedésű nedves területek párolgási szintjének leírására alkalmas. Az utóbbinál figyelembe kellett venni azt a tényt, hogy a vízfelszín energiamérlege eltér egy tipikus növényzettel borított felszíntől, így az energiamérleg az előbbi felszínre lett számolva Morton WREVP programja segítségével.

Alapvető probléma volt, hogy a nedves környezeti párolgás számításához felhasznált Priestley-Taylor-egyenletben az  $\alpha$ -t csak az irodalomban leggyakrabban használt 1,26-os értékekkel alkalmaztuk. Az  $\alpha$  pontosabb, esetleg évszaktól függő meghatározásához azonban további kutatásokra lenne szükség. Az  $\alpha$  kalibrálásának hiánya, mint láthattuk, főként a nyári hónapokban okozhatott gondot.



A Balaton kiterjedtsége miatt előfordult az, hogy a nyári hónapokban a tó a Priestley-Taylor egyenletnek megfelelően viselkedett, azaz úgy tűnik, hogy a tó elég nagy már ahhoz, hogy legalábbis nyáron, amikor a párolgás a legintenzívebb, a felette lévő levegő nedvességét jelentősen befolyásolni tudja. Ez további vizsgálatok szükségességére mutat, hiszen valós körülmények között (ami nyilván függ a levegő stabilitási állapotától is) nem ismert, hogy mi is az a szükséges kritikus méret, ami már regionálisnak tekinthető, azaz amikor a Penman-egyenlet a Priestley-Taylor-egyenletre redukálódik. Ezen információ birtokában pontosabb tó párolgásbecslő eljárások kidolgozását várhatjuk, hiszen pl. Morton WREVAP programjában sem szerepel a tó méret, mint a becsült tó párolgás bemeneti változója.

### ***Irodalomjegyzék***

- Brutsaert, W., 2005. Hydrology: An Introduction. *University Press, Cambridge*, 605pp.
- Brutsaert, W., Stricker, H., 1979. An Advection–Aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration. *Water Resour. Res.* 15, 443–449.
- Kovács, Á., Szilágyi J., 2009a. Párolgásszámítási vizsgálatok hazai nagy tavainkon, I. *Hidrológiai Közlöny* 89. évf. 2. szám, 47-50
- Kovács, Á., Szilágyi J., 2009b. Párolgásszámítási vizsgálatok hazai nagy tavainkon, II. *Hidrológiai Közlöny* 89(2): 51–56.
- Morton, F.I., 1983. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *J. Hydrol.* 66, 1–76.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. In: *Proc. Royal Soc. London*, A193, pp. 120–146.
- Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100, 81–92.
- Virág, Á., 1999. A Balaton múltja és jelene. *Egri Nyomda Kft., Eger*.

# A természetes élővilág és az éghajlatváltozás – a modellezés lehetőségei

Czucz Bálint, Molnár Zsolt, Kröel-Dulay György

MTA Ökológiai és Botanikai Kutatóintézet, 2163 Vácrátót, Alkotmány u. 2-4.  
email: czucz@botanika.hu

**Összefoglaló** – A természetes ökoszisztémák számos alapvető szolgáltatást (pl. génmegőrzés, környezeti stabilitás, vízháztartás szabályozása) nyújtanak az emberi társadalom számára, amelyek az emberi társadalom működéséhez és jólétéhez alapvetően hozzájárulnak. Az éghajlatváltozás más antropogén hatásokkal együtt világszerte jelentős hatást gyakorolhat az ökológiai rendszerek működésére, és ez súlyos következményekkel járhat az emberiség számára. Ezek felderítéséhez és elkerüléséhez a lehetséges folyamatok részletes tudományos feltárására és modellezésére van szükség.

Az ökológiai rendszerek a légkör fizikai rendszerénél térben és időben heterogénebb, és csak igen nagyszámú állapotjelzővel leírható komplex rendszert alkotnak, mely a légkör fizikai és kémiai állapotával többféle mechanizmuson keresztül is szoros kapcsolatban van. Az éghajlatváltozás ökológiai hatásainak vizsgálata és modellezése ennek megfelelően összetett feladat. A ma világszerte legelterjedtebben használt két modellcsalád, a dinamikus globális vegetációs modellek (DGVM) és a statisztikus elterjedési modellek (SDM) közül ez utóbbi az, amely hazai térléptékben jobban használható. Munkánkban a leginkább éghajlat-érzékeny hazai természetes élőhelyek jelenlegi és jövőbeli várható elterjedését vizsgáltuk élőhely-elterjedési modellek segítségével. Ehhez négy különböző éghajlati modell (GCM) és három emissziós (SRES) forgatókönyv hat lehetséges kombinációjának Magyarország térségére leskálázott verzióját használtuk fel. Az elemzések három jövőbeli 30 éves időszakra (2010-2039, 2035-2064 és 2070-2099) készültek a Magyarország Élőhelyeinek Térképi Adatbázisa (MÉTA) alapján. Az eredmények kvantitatívan is megerősítették azt az általánosan elfogadott feltételezést, hogy a klímazonális erdőtürelések (bükkösök, gyertyános- és cseres-tölgyesek) éghajlati veszélyeztetettsége kimagasló, különösen azok alacsonyabb térszíni, peremhelyzetű állományai esetében. A lágyszárúak által dominált élőhelyek közül a hegyi rétek és kaszálórétek állományai kerülnek leginkább közvetlen veszélybe, míg a zömmel a XIX. századi folyószabályozások után kialakult, féltermészetes cickóros puszták számára a várható melegedés és szárazodás a változások kezdeti időszakában előnyös változásokat jelenthet.

## **Az ökológiai hatások vizsgálatának jelentősége és lehetőségei**

A globális éghajlatváltozás a XXI. század folyamán a bolygónkon élő növény- és állatfajok többsége számára komoly, sok esetben végzetes kihívást fog jelenteni (Fischlin *et al.*, 2007). A biológiai sokféleség drámai csökkenése egyre inkább elkerülhetetlennek látszik, és ez a folyamat várhatóan az ökológiai rendszerek által a társadalom felé nyújtott „szolgáltatásoknak”, az úgynevezett ökoszisztéma szolgáltatások („ecosystem services”, mint például a megporzás biztosítása, kártevők fékentartása, erózióvédelem, biológiai sokféleség fenntartása – bővebben lásd pl. MEA, 2005) általános csökkenésében fog megnyilvánulni. Mivel mindannyiunk élete, jóléte és ezáltal az egész társadalmi berendezkedésünk számos szállal függ ezeknek a szolgáltatásoknak a folyamatos elérhetőségétől, a biodiverzitás degradációjának elkerülése és az ökoszisztémák „egészségének” megőrzése alapvető társadalmi érdek. A sokféleségből fakadó reziliencia elvesztése megnöveli a kellemetlen „ökológiai meglepetések” (Fischlin *et al.*, 2007; Burkett *et al.*, 2005) kialakulásának a valószínűségét, amelyek pusztító következményekkel járhatnak az emberiség jóléte szempontjából.

Az éghajlatváltozás lehetséges káros következményeinek megismerése és megértése érdekében az elmúlt évtizedben számtalan hatáselemzés készült. Az éghajlatváltozásnak az élővilágra gyakorolt hatásait vizsgáló elemzések döntő többsége a várható változások számszerűsítésének módja alapján két fő csoportba sorolható: (1)

korrelatív, ún. faj-elterjedési modelleket („species distribution models, SDM), valamint (2) mechanisztikus modelleket használó vizsgálatokra (Fischlin et al., 2007). Ez utóbbiak legelterjedtebb képviselői az ún. dinamikus globális vegetációs modellek (DGVM), melyek néhány fiktív és kellőképpen általános növényi funkcionális csoport („plant functional types”) egymással és környezetükkel való kölcsönhatását, versengését modellezik a változó környezeti feltételek között. E modellek ennek megfelelően leginkább a nagyléptékű vegetációs átalakulások vizsgálatára alkalmasak, kisszámú, egymástól jelentősen eltérő vegetációs kategória (általában a főbb biomok) eltolódásának modellezéséhez kontinentális vagy globális skálán. Kisebb területek nagyobb tematikus felbontású vizsgálatára ezek a pontos kalibrációt és számos biológiai folyamat részletes parametrizációját igénylő nagy adat- és számításiigényű modellek már (még?) nem alkalmasak.

A korrelatív modellek ezzel szemben viszonylag csekélyebb és könnye(bbe)n teljesíthető igényekkel rendelkeznek: e modellek az egyes objektumok (általában fajok) jelenlegi földrajzi elterjedéséből kiindulva statisztikai kapcsolat formájában próbálják feltárni azok éghajlatigényét, és ezt az igényt vetítik ki a várható éghajlati forgatókönyvekre (Guisan & Zimmermann, 2000). Mindezek következtében e modellek egyfajta „egyensúlyi” megközelítésben csak a végállapotra adnak becslést, és nincs mód a háttérben rejlő átrendeződési, alkalmazkodási mechanizmusok megismerésére. Az ökológiai rendszerek azonban soha nincsenek igazi „egyensúlyban” a környezetükkel: egyensúlyt felborító tényezők például a nagy léptékű környezeti változások (többek között az éghajlatváltozás is) és az evolúció. További problémát jelent, hogy a fajok elterjedését számos indirekt visszacsatolási mechanizmus is befolyásolja (biotikus kölcsönhatások, az éghajlatváltozás abiotikus környezeti és társadalmi gazdasági hatásainak ökológiai következményei). A kalibrációs tartományon kívül eső éghajlati állapotokra való extrapoláció félrevezető műtermékekhez vezethet ennél a modellszaládnál. Ráadásul a rendelkezésre álló elterjedési adatok meglehetősen egyenetlen eloszlásban állnak rendelkezésre mind földrajzi, mind taxonómiai szempontból (elsősorban a nagytestű, könnyen megfigyelhető jellegzetes élőlényekről vannak adatok), és ez további problémákat vet fel korrelációs modelleken alapuló elemzések általános használhatóságát tekintve – jóllehet a több fajcsoportban nagyszámú fajt vizsgáló tanulmányok eredményeit többnyire a biodiverzitás egészére is kivetíthető általános tendenciaként fogadja el a tudományos közösség (pl. Thomas et al., 2004).

Az éghajlatváltozás ökológiai hatásainak átfogó vizsgálatára közepes (pl. Magyarországnyi) térbeli skálán sajnos a bemutatott két megközelítés (SDM és DGVM) egyike sem tűnik kifejezetten alkalmasnak. Ezen a léptéken a fajok száma már kezelhetetlenül nagy (és a rendelkezésre álló fajelterjedési adatok reprezentativitása is kétséges), a biomok száma pedig túl csekély ahhoz, hogy szakpolitikailag lényegretörő („policy relevant”) információ közvetítői legyenek. Ennek megfelelően, regionális elemzések céljaira egy köztes lépték, szerveződési szint objektumai javasolhatók, melyek közepes mértékű tematikus komplexitás mellett tudnak átfogó képet nyújtani az adott terület élővilágáról. Ez a szint a közösségek, vagy más szóval *élőhelyek* szintje (Ferrier & Guisan, 2006). Ebben az értelemben az élőhely nem pusztán az élőlények csoportjainak térbeli előfordulási helyeit jelenti, hanem sokkal inkább együtt élő, egymással trofikus kölcsönhatásokkal és/vagy hasonló környezeti igényeik alapján szoros kapcsolatban lévő fajok közösségei. Ezért, jóllehet az egyes fajok az éghajlat változásaira önállóan fognak reagálni, az együtt élő, hasonló környezeti igényekkel

rendelkező fajok érzékenysége is feltehetően hasonló lesz. Az egyes fajok alkalmazkodóképességre viszont mindez már nem áll: az adaptáció tekintetében a fajok valószínűleg jelentős mértékben különböznek egymástól, sőt éppen ezeknek a különbségeknek az érvényesülése, és a közösségek ezáltal való szétzilálódása az egyik legfontosabb veszélyeztetési mechanizmus (Thuiller, 2004). Ráadásul, mivel az alapobjektumok rendszere egy, a vizsgált térségre nézve erősen releváns és teljeskörű osztályozást alkot, véleményünk szerint a regionális/országos léptékű éghajlati sérülékenységi elemzések céljaira az élőhelyi szintű adatok lényegesen jobb eszközt nyújtanak, mint akár a faji szintű adatok, akár a globális léptékű vegetációs modellek.

### ***A hazai ökológiai hatások vizsgálata***

A bevezetésben felvázoltaknak megfelelően munkánk alapobjektumainak az *élőhelyeket* választottuk. Hazánk esetében szerencsére áll rendelkezésre megfelelő élőhelyi adatforrás: a MÉTA adatbázis („Magyarország Élőhelyeinek Térképi Adatbázisa”, <http://www.novenyzetiterkep.hu/meta/en/index.shtml>), amely egy közelmúltban lezajlott országos vegetációtérképezés eredményeit tartalmazza (Molnár *et al.*, 2007; Horváth *et al.*, 2008). Az adatbázis egy, a teljes országot lefedő, 35 ha felbontású hatszögrács celláihoz rendel élőhelyi adatokat: minden hatszöghöz az ott előforduló élőhelyek listáját, becsült kiterjedését, és még számos terepen becsülhető tulajdonságát (1. táblázat). Az élőhelyek meghatározása a Nemzeti Élőhely-osztályozási Rendszer (Bölöni *et al.*, 2003, 2007) definícióit veszi alapul, mely Magyarországra nézve egy teljes körű és konzisztens rendszert alkot.

***1. táblázat. A MÉTA adatbázis legfontosabb jellemzői***

Felmérések éve	2003-2005
Résztevő térképezők száma:	199
Terepnapok száma:	~7000
A térképezés alapegységei:	
– területi:	kétszintű területi felbontás: – 2834 db MÉTA kvadrát (~6,5×5,5 km), a térképezési munka és a táji információk gyűjtésének alapegysége), – ~270000 db MÉTA-hatszög (35 ha, az élőhelyek térképezésének alapegysége – egy-egy hatszögon belül lista készült az ott található természetközeli élőhelyekről és legfontosabb tulajdonságaikról)
– tematikus:	86 élőhely a programhoz kidolgozott Élőhelyismereti Útmutató (Bölöni <i>et al.</i> , 2003) ÁNÉR-en alapuló felosztása szerint
Az élőhelyenként gyűjtött főbb attribútumok:	kiterjedés, természetesség,... (és még számos további változó)
A hatszögenként gyűjtött főbb attribútumok:	tájhasználat, inváziós fertőzöttség,... (és még számos további változó)
Az adatbázis feltöltöttsége az elemzések idején:	89 %

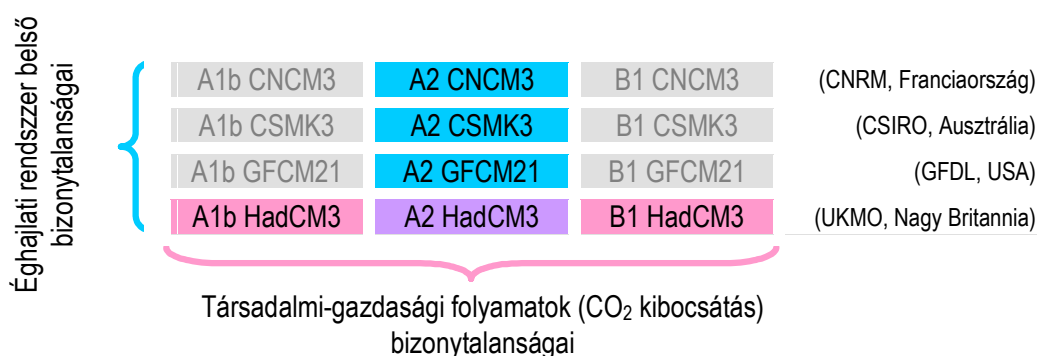
Mivel a munkánk kezdetekor még nem álltak rendelkezésre regionális klímamodellek (RCM) segítségével dinamikusan leskalázott éghajlati forgatókönyvek

Magyarország területére (lásd pl. *Csima & Horányi, 2008; Szépszó & Horányi, 2008*), így globális projekciókat kellett felhasználnunk az éghajlatváltozás jellemzésére. Ehhez az IPCC Negyedik Értékelő Jelentéséhez (AR4) készített, az IPCC Adatszolgáltató Központján (IPCC DDC, [www.ipcc-data.org](http://www.ipcc-data.org)) keresztül nyilvánosan hozzáférhető éghajlati projekciókat használtuk fel. Hazánk éghajlatváltozással szembeni kitettségének a számszerűsítéséhez négy különböző *általános légköri modellt* (GCM) által három különböző *társadalmi-gazdasági forgatókönyvre* (IPCC SRES kibocsátási scenárió) készített, összesen hat különböző éghajlati projekciót (forgatókönyvet) vettünk figyelembe. A projekciók e széles skálájának elemzésünkbe való beépítésével az volt a célunk, hogy ezáltal számításba tudjuk venni mind az éghajlati modellek belső bizonytalanságait, mind pedig a társadalmi-gazdasági környezet várható alakulásából adódó bizonytalanságokat (*1. ábra*).

Vizsgálatunk során a következő harminc éves időszakok átlagaival számoltunk: 1960-1990 (referencia-időszak), 2010-2040 (2025-re vonatkoztatva) és 2035-2065 (2050-re vonatkoztatva). A felhasznált projekciók szerint várható változásokról a *2. táblázat* nyújt rövid áttekintést. Mivel a nyers GCM modellkimenetek térbeli felbontása hazánk térségében meglehetősen csekély (~6-12 rácspont), ezért az éghajlati előrejelzések térbeli leskalázására volt szükség. Ezt a feladatot a *Parry és Carter (1998)* által javasolt egyszerű statisztikai eljárással oldottuk meg, melyhez a referencia időszakra vonatkozó nagy felbontású interpolált éghajlati adatokat az OMSZ-tól (havi csapadékösszegek 1960-90; *OMSZ, 2001*), illetve a WORLDCLIM adatbázisból (havi középhőmérsékletek 1960-90; *Hijmans et al., 2005*) vettük. Annak érdekében, hogy biológiai szempontból értelmes változókat nyerjünk, a havonkénti értékek felhasználásával 12 különböző, ökológiai modellekben gyakorta használt bioklimatikus index értékeit számítottuk ki. A következő fejezetben bemutatott élőhely-elterjedési modellek ezeken a bioklimatikus változókon alapulnak.

Az egyes élőhelyek éghajlat-érzékenységének a kiértékeléséhez először korrelatív elterjedési modellek használatával minden egyes élőhelytípus esetében megvizsgáltuk a közvetlen éghajlat-érzékenység mértékét; majd ez alapján azonosítottuk a legmagasabb közvetlen éghajlat-érzékenységgel rendelkező gyakori élőhelytípusokat és részletes térbeli elemzéseket készítettünk ezekre az esetekre.

Az élőhelyek közvetlen érzékenységének vizsgálatára feltételes következtetéseken alapuló regressziós fa („conditional inference based regression tree”) modelleket használtunk (*Hothorn et al., 2006*). A modellek kialakítása során a bioklimatikus változók mellett számos további környezeti változót (talaj- és vízrajzi paraméterek) is bevontunk az elemzésbe. Minden élőhelyre 12 ismétlésben (visszatevéses random „bootstrap” minták) háromféle modellt (kizárólag klimatikus, kizárólag aklimatikus, és mindkét típusú prediktorokat egyaránt tartalmazó) illesztettünk; és az egyes élőhelyek éghajlat-érzékenységét a különböző típusú modellek predikciós hatékonyságának összehasonlításával határoztuk meg (bővebben lásd *Czúcz et al., 2007* és *Czúcz, 2010*). A bootstrap minták és az éghajlati forgatókönyvek nagy számának köszönhetően minden számítás egy „ensemble”-jellegű környezetben történt, melyben „konszenzus előrejelzésnek” az átlagokat tekintettük, míg az értéktartomány terjedelmét az előrejelzés bizonytalanságának jelzésére használtuk fel.



**1. ábra.** Az elemzésünk során használt hat éghajlati projekció bemutatása. A kiválasztás fő szempontja az volt, hogy a segítségükkel kapott eredmények a társadalmi-gazdasági folyamatokból fakadó, valamint az éghajlati modellek belső bizonytalanságait egyaránt számszerűsítsék.

**2. táblázat.** A vizsgált éghajlati forgatókönyvek áttekintő jellemzése (átlagos változások az éves, nyári és téli középhőmérsékletben [°C] és csapadékösszegekben [%]) két különböző csoportosításban: a) különböző GCM-ek és azonos SRES szcenárió (A2) esetén; b) különböző SRES szcenáriók a HADCM3 modellel számolva.

	2025			2050			2025			2050		
a)	T <sub>a</sub>	T <sub>s</sub>	T <sub>w</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>s</sub>	T <sub>w</sub>	P <sub>a</sub>	P <sub>s</sub>	P <sub>w</sub>	P <sub>a</sub>	P <sub>s</sub>	P <sub>w</sub>
<b>HADCM3 A2</b>	1.4	1.6	1.2	2.6	2.9	2.3	-2.4	-8.2	3.1	-3.6	-13.4	7.0
<b>CNCM3 A2</b>	1.3	1.6	1.1	2.3	2.4	2.1	-4.0	-8.3	0.6	-5.6	-9.6	-0.8
<b>CSMK3 A2</b>	1.2	1.2	1.2	1.7	1.8	1.5	4.6	4.7	4.1	-1.5	0.4	-3.3
<b>GFCM21 A2</b>	0.9	1.1	0.7	1.8	2.1	1.6	0.7	-1.9	4.5	-5.2	-14.2	6.2
b)	T <sub>a</sub>	T <sub>s</sub>	T <sub>w</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>s</sub>	T <sub>w</sub>	P <sub>a</sub>	P <sub>s</sub>	P <sub>w</sub>	P <sub>a</sub>	P <sub>s</sub>	P <sub>w</sub>
<b>HADCM3 A2</b>	1.4	1.6	1.2	2.6	2.9	2.3	-2.4	-8.2	3.1	-3.6	-13.4	7.0
<b>HADCM3 A1B</b>	1.6	1.7	1.6	2.9	3.3	2.6	1.4	-3.3	5.6	-1.1	-10.9	9.4
<b>HADCM3 B1</b>	1.4	1.6	1.1	2.4	2.6	2.3	-0.2	-1.5	0.4	-4.7	-12.4	3.5

### A leginkább éghajlat-érzékeny élőhelyekre kapott eredmények

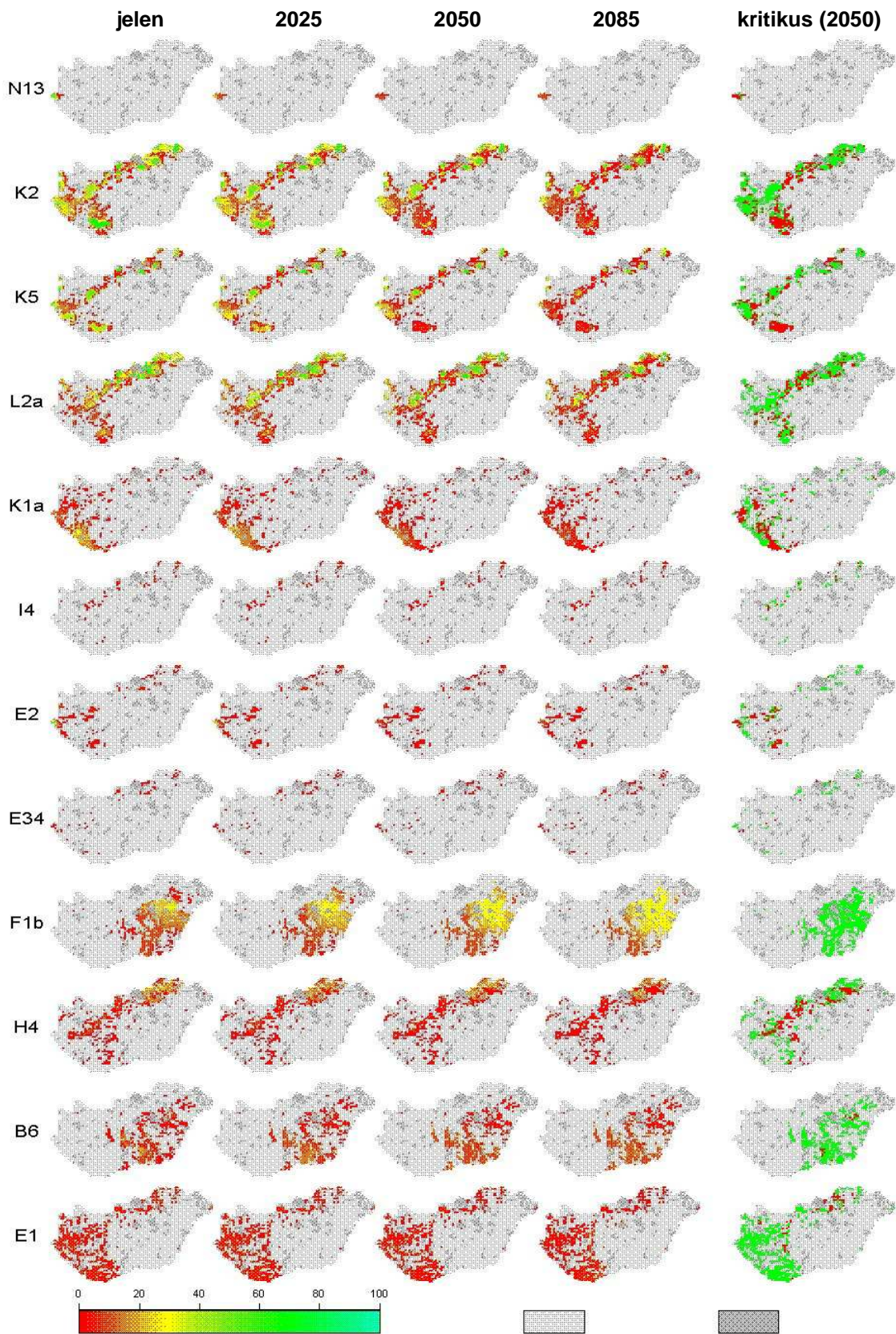
Az élőhely-elterjedési modellezés segítségével 12 kiemelten klímaérzékeny élőhelyet azonosítottunk. Ezen élőhelyek esetében az országos szinten várható hatásokat a 2. ábra térképsorain mutatjuk be. Az ábrákon az egyes élőhelyek különböző időszakokra jósolt előfordulási valószínűségei láthatók a különböző forgatókönyvekre és ismétlésekre átlagolva. Ezek az általában viszonylag alacsony értékek azt fejezik ki, hogy az adott éghajlati körülmények között mennyi a valószínűsége, hogy egy 35 ha-os területen (MÉTA hatszög, a modellezés területi egysége) rábukkanjunk az adott élőhely előfordulásaira. Ez szinte kizárólag klímazonális élőhelyek esetén képes magas értékeket felvenni, míg a ritkább, specializáltabb élőhelyeknél természetesen ez a szám még optimális körülmények között is alacsonyabb. Éppen ezért az előfordulási valószínűségek abszolút értékei csak korlátozott mértékben alkalmasak élőhelyek közötti összehasonlításra, és az élőhelyek veszélyeztetettsége csak a prevalenciájuk (a

referencia-időszakban mérhető átlagos gyakoriságuk) fényében ítélni meg. A legveszélyeztetettebb területek egyszerű vizuális kiemelése céljából a 2. ábra térképsorain (minden sorozatból az utolsó térképen) külön kiemeltük azokat a területeket, ahol az éghajlati referencia-időszakhoz (1960–1990) képest 2050-re legalább 50%-os előfordulási valószínűség csökkenést jósolnak a modellek (a különböző forgatókönyvek és ismétlések átlagában).

Az eredmények egyik általános tanulsága, hogy az erdők, különösen a klímazonális erdők sokkal határozottabb éghajlatfüggést mutatnak, mint a gyepesek vagy a cserjések. A három legfőbb zonális erdőtípus (bükkösök – K5, gyertyános kocsánytalan tölgyesek – K2, cseres tölgyesek – L2a) mindegyike esetén az alacsonyabb térszínnek peremhelyzetű állományai a legveszélyeztetettebbek. A bükkösök (K5) és a gyertyános-kocsánytalan tölgyesek (K2) esetében a dél-dunántúli (Mecsek, Zselic), míg a cseres-kocsánytalan tölgyesek (L2a) esetén az északi-középhegységi (Cserhát) állományok a leginkább közvetlenül veszélyeztetettek. A gyertyános-kocsányos tölgyesek (K1a) gyakorlatilag teljes elterjedési területükön jelentős visszaszorulásra/állapotromlásra számíthatnak, de itt is a peremhelyzeti előfordulások (Baranyai Dráva-sík, Zselic) vannak a legrosszabb helyzetben. A három fő zonális erdőtípus (K5, K2, L2a) esetében a kapott eredmények nagy mértékben összhangban vannak Mátyás Csaba és kutatócsoportja (*Mátyás & Czímber, 2004; Gálhidy et al., 2006; Czúcz et al., 2011*) erdészeti adatbázisokon alapuló modelljeinek eredményeivel.

Egy másik határozott tendencia, amely szintén nem okoz különösebb meglepetést, hogy a hegyvidéki elterjedésű közösségek nagyobb éghajlatfüggést mutatnak alföldi-síkvidéki társaiknál. Ez utóbbi leginkább annak köszönhető, hogy alföldjeinken az élőhelyek elterjedése a sokkal intenzívebb tájhasználat miatt már korántsem az eredeti mintázatokat követi. Az élőhelyek többsége országszerte jelentős antropogén behatás alatt áll; ezek esetében a jelenlegi elterjedés mintázatát erősen befolyásolhatja a tájhasználat térbeli mintázata. Mivel a tájhasználat intenzitása és jellege szintén interakcióban állhat az éghajlattal, ezért számos élőhely esetén valószínűsíthető, hogy eredeti elterjedési területének bizonyos részeiről szelektív tájhasználati nyomás hatására tűnt el, elkendőzve ezáltal a meglévő éghajlati kapcsolatokat (löszgyepesek, összes hegylábi-alföldi erdőtípus), vagy esetleg akár új tájhasználati alapokon nyugvó közvetett antropogén éghajlati kapcsolatokat hozva létre.

Ez a probléma különösen érinti a lágyszárúak által dominált élőhelyeket, és azok közül is elsősorban azokat, amelyek egy amúgy erdő-dominálta tájban évszázados emberi behatásra jöttek létre. Ezen élőhelyek esetében is kimutatható azonban közvetlen éghajlatfüggés, mely alapján úgy tűnik, hogy pl. a veres csenkeszes hegyi rétek (E2) dunántúli és a franciaperjés rétek (E1) északi-középhegységi és mezőföldi állományai vannak leginkább veszélyben az éghajlatváltozás kezdeti időszakában. A félszáraz irtásrétek (H4) esetén leginkább veszélyeztetettek a középhegység déli oldalán található előfordulások. Ezeknek az élőhelyeknek a legjelentősebb veszélyeztető tényezőjük azonban mindenképpen a korábbi fenntartó művelés (kaszálás) elmaradása. Az, hogy ezt milyen módon és mértékben egészíti ki az éghajlatváltozás miatti veszélyeztetés, további vizsgálatok tárgya kell legyen.



**2. ábra.** A 12 leginkább éghajlat-függő élőhely elterjedési valószínűségeinek modellezett változásai a XXI. század folyamán (bővebb magyarázat a szövegben)



Néhány határozott éghajlatfüggést mutató élőhely, és köztük kiemelten a cickóros puszták (F1b) számára a hazai elterjedési területükön belül a várható melegedés és szárazodás az éghajlatváltozás kezdeti időszakában előnyös változásokat jelenthet, azaz például üdébb szikes rétek, és kilúgzódó ürmös puszták alakulhatnak át cickóros pusztákká. A szikes mocsarak (B6) számára az éghajlati feltételek alig látszanak változni, itt valószínűleg egy olyan változó okozott éghajlatfüggést, amelyet a jelenlegi változások nem, vagy csak kevéssé érintenek. Ennek ellenére közvetett éghajlatfüggése (a vízáramlási viszonyok esetleges megváltozása) miatt hosszabb távon a B6 élőhelyet is veszélyeztetheti majd az éghajlatváltozás.

A legjelentősebb modellezett éghajlat-érzékenységgel rendelkező 12 élőhely listájáról számos olyan élőhely hiányzik, melyek létét közvetve (és ezért nehezen modellezhető módon), de mégis alapjában veszélyezteti az éghajlatváltozás. Ilyen élőhelyek, tipikusan a lápi élőhelyek, a szikesek és az ártéri élőhelyek, de az igen ritka, valamint a déli/alsó elterjedési határukat hazánkban el nem érő élőhelyek modellezése is számos technikai problémától terhelt. Ezen élőhelyek éghajlati sebezhetőségének objektív vizsgálata további elemzéseket igényel.

### ***Irodalomjegyzék***

- Bölöni J., Kun A., and Molnár Zs., 2003: *Élőhely-ismereti Útmutató*, Manuscript, MTA ÖBKI, Vácrátót.
- Bölöni J., Molnár Zs., Illyés E. and Kun A., 2007: A new habitat classification and manual for standardized habitat mapping, *Annali di Botanica* **7**, 105-126.
- Burkett V.R., Wilcox D.A., Stottlemeyer R., Barrow W., Fagre D., Baron J. et al. 2005: Nonlinear dynamics in ecosystem response to climatic change: Case studies and policy implications, *Ecological Complexity* **2(4)**, 357-394.
- Czúcz B., 2010: *Az éghajlatváltozás hazai természetközeli élőhelyekre gyakorolt hatásainak modellezése*, PhD Thesis, Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest.
- Czúcz B., Gálhidy L. and Mátyás Cs., 2011: Present and forecasted xeric climatic limits of beech and sessile oak distribution at low altitudes in Central Europe, *Annals of Forest Science* (accepted).
- Czúcz B., Kröel-Dulay Gy., Rédei T., Botta-Dukát Z. and Molnár Zs., 2007: Éghajlatváltozás és biológiai sokféleség – elemzések az adaptációs stratégia tudományos megalapozásához, Report, MTA ÖBKI, Vácrátót.  
[http://www.botanika.hu/download-01/NES/Eghajlatvaltozas\\_Biodiverzitas.pdf](http://www.botanika.hu/download-01/NES/Eghajlatvaltozas_Biodiverzitas.pdf)
- Csima G. and Horányi A., 2008: Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service, *Időjárás* **112(3-4)**, 155–177.
- Ferrier S. and Guisan A., 2006: Spatial modelling of biodiversity at the community level. *Journal of Applied Ecology* **43(3)**, 393-404.
- Fischlin A., Midgley G.F., Price J.T., Leemans R., Gopal B., Turley C., Rounsevell M.D.A., Dube O.P., Tarazona J. and Velichko A.A., 2007: Ecosystems, their properties, goods, and services. In Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ & Hanson CE (eds.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 211-272.
- Gálhidy L., Mátyás Cs., Czúcz B. and Torre F., 2006: Zonal forest types, climatic variables and effect of changes for Hungary, *Lesnícky časopis, Forestry Journal*

- 52, 99–105.
- Guisan A. and Zimmermann N.E., 2000: Predictive habitat distribution models in ecology, *Ecological Modelling* **135(2-3)**, 147-186.
- Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G. and Jarvis A., 2005: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology* **25**, 1965-1978.
- Horváth F., Molnár Zs., Bölöni J., Pataki Zs., Polgár L., Révész A., Krasser D. and Illyés E., 2008: Fact sheet of the MÉTA Database 1.2. *Acta Botanica Hungarica* **50**, 11-34.
- Hothorn T., Hornik K., and Zeileis A., 2006: Unbiased recursive partitioning: A conditional inference framework, *Journal of Computational and Graphical Statistics* **15(3)**, 651-674.
- Mátyás Cs., Czímber K., 2004: A zonális alsó erdőhatár klímaérzékenysége Magyarországon - előzetes eredmények, In *Erdő és Klíma IV.* (szerk.: Mátyás Cs., Víg P.), Sopron, pp. 35–44.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment), 2005: *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*, Island Press, Washington. 155 pp.
- Molnár Zs., Bartha S., Seregélyes T., Illyés E., Botta-Dukát Z., Tímár G., Horváth F., Révész A., Kun A., Bölöni J., Biró M., Bodoncz L., Deák J.Á., Fogarasi P., Horváth A., Isépy I., Karas L., Kecskés F., Molnár Cs., Ortmann-Ajkai A. and Rév Sz., 2007: A grid-based, satellite-image supported, multi-attributed vegetation mapping method (MÉTA), *Folia Geobotanica* **42**, 225-247.
- OMSZ, 2001: *Magyarország Éghajlati Atlasza*, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest.
- Parry M.L. and Carter T.R., 1998: *Climate Impact and Adaptation Assessment: A Guide to the IPCC Approach*, Earthscan, London.
- Szépszó G., and Horányi A., 2008: Transient simulation of the REMO regional climate model and its evaluation over Hungary, *Időjárás* **112(3-4)**, 203–231.
- Thomas C.D., Cameron A., Green R.E., Bakkenes M., Beaumont L.J., Collingham Y.C., Erasmus B.F.N., de Siqueira M.F., Grainger A., Hannah L., Hughes L., Huntley B., van Jaarsveld A.S., Miggley G.F., Miles L., Ortega-Huerta M.A., Peterson A.T., Phillips O.L., Williams S.E., 2004: Extinction risk from climate change, *Nature* **427**, 145–48.
- Thuiller W., 2004: Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change, *Global Change Biology* **10(12)** 2020-2027.

# Az éghajlatváltozás és az aszály

Szalai Sándor<sup>1</sup>, Lakatos Mónika<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SZIE Környezettudományi Intézet, Talajtani és Agrokémiai Tanszék  
2103. Gödöllő, Páter K. u. 1., email: [szalai.sandor@mkk.szie.hu](mailto:szalai.sandor@mkk.szie.hu)

<sup>2</sup>Országos Meteorológiai Szolgálat  
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1., email: [lakatos.m@met.hu](mailto:lakatos.m@met.hu)

**Összefoglaló** – Magyarországon feltehetőleg az aszály az egyik legnagyobb kárt okozó természeti csapás. Komplex jellege miatt mind a meghatározása, mind a mérése nem egyértelmű. Ennek következtében az általa okozott kár becslése nagyobb bizonytalansággal terhelt, mint a többi természeti csapás esetében. Az okozott károk azonban nemcsak a hatástól függenek, azaz adott esetben az aszály valamilyen mértékkel kifejezett nagyságától, hanem az aszály sújtotta régió aszály iránti sérülékenységtől is. Mivel az évi csapadékmennyiség változása rövidebb távon emelkedő és csökkenő szakaszokból áll, de hosszabb távon hazánkban csökkenő, illetve az éghajlatváltozás gyakorlat által is alátámasztott következménye a csapadékontenzitás növekedése, a szélsőségek gyakoribbá válása, ezért hosszú távon az aszályhajlam növekedésével kell számolnunk.

## Bevezetés

Az aszály mint természeti jelenség sok tulajdonságában különbözik a többi természeti csapástól. A víz szinte valamennyi természeti folyamatban szerepet játszik, így a nem kellő mennyisége negatív hatással van ezekre a folyamatokra. Bizonyos határokon belül a kevesebb rendelkezésre álló vízmennyiség nem okoz maradandó változásokat (ezt tekinthetjük a természetes változékonyság nagy gyakoriságú részének), de ha a vízhiány ennél nagyobb, akkor már károk keletkezhetnek. Mivel a folyamatoknak a víz mennyiségére, a vízhiányos időszak hosszára való érzékenysége változó, ezért nehéz általánosan elfogadott aszálydefiníciót adni. Ha ez szükséges, akkor valamilyen munkadefiníció szerint dolgoznak, ami áthidaló megoldást jelent.

Az előbbieket következményeként az aszály időbeli és térbeli lehatárolása nehezebb, mint a többi természeti csapásé. A pontos mérések hiánya miatt nehéz megállapítani a kezdetét és végét (sőt, ezek különböző folyamatok számára eltérő időben következnek be), illetve térben a kiterjedését. Viszont tudjuk, hogy az aszály általában hosszabb és nagyobb területre kiterjedő, mint a többi katasztrófa. Fontos tulajdonsága még, hogy lassan fejlődik ki, ahogyan a rendelkezésre álló víz mennyisége fokozatosan csökken, és lassabban szűnik is meg. Az általa okozott károkat is nehezebb meghatározni, mint más csapások esetében.

Viszont az aszály természetes eleme éghajlatunknak, a múltban is előfordult, és a jövőben is mindig kisebb-nagyobb gyakorisággal elő fog fordulni. A jelenlegi éghajlati tendenciák azonban olyanok (hőmérséklet emelkedése, évi csapadékösszeg csökkenése, csapadékontenzitás növekedése), hogy mind az aszály gyakoriságának, mind nagyságának növekedését vetítik előre.

Röviden megemlítjük, hogy az aszály közvetlenül természeti jelenségnek tekintendő, bár éppen az éghajlatváltozási elmélet szerint az emberi tevékenységnek is van rá hatása, de csak közvetetten. Úgy tekinthetjük, mint az éghajlatilag rendelkezésre álló víz mennyiségének rövidebb időszakra való negatív anomáliáját. Ha ez a hiány összemérhető az éghajlati értékek meghatározására használt időszakkal, akkor már nem aszályról, hanem szárazságról beszélünk. Napjaink növekvő vízigénye szükségessé teszi, hogy a rendelkezésre álló vízmennyiséget és a vízigényt összehasonlítsuk. Ez a

vízszűkössége, vízszűke. (Az angolban két, alapvetően különböző kifejezésnek ugyanaz a magyar fordítása. A lack of water víznek a hiányát jelenti, azért, mert nem áll rendelkezésre. A water scarcity azonban az a helyzet, amikor akár sok víz is lehet, de a fogyasztás meghaladja a rendelkezésre álló készletet. Nyilvánvalóan, az utóbbi esetben a helyzet javítható víztakarékos technológiákkal, a felhasználás átstrukturálásával, míg az előbbiben nem. Ezért fontos, hogy magyarul is meg tudjuk különböztetni a két jelenséget.) Ha hosszú ideig vízszűke áll fent, akkor az a fenntarthatóságot veszélyezteti, káros, irreverzibilis folyamatokat indíthat be. Ilyenkor vagy újabb, megújuló vízforrásokat kell találni, vagy a fogyasztás mértékét a megújítható szintre csökkenteni. Amíg az aszály közvetlenül természeti esemény, addig a vízszűke természeti és társadalmi-gazdasági folyamatok együttes eredménye.

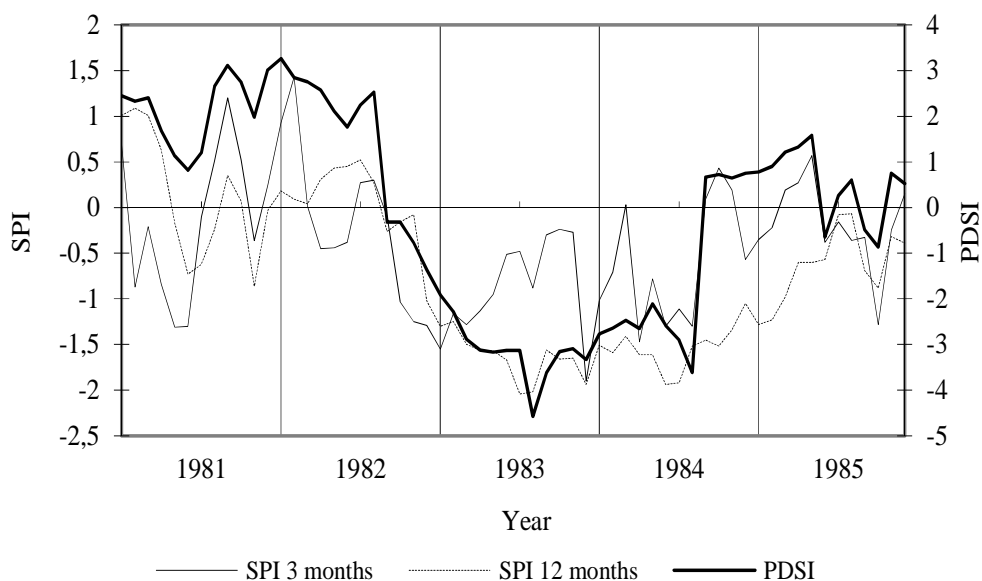
### ***Az aszály mérhetősége, a mérték kiválasztásának szempontjai***

Az aszály definíciós problémáiból következik a mérhetőségi nehézségei. Úgynevezett aszályindexekkel mérjük, amelyekből többszázat fejlesztettek ki, bár döntően csak mintegy 10-15 használata elterjedt. Magyarországon főként a Palmer-féle aszályossági indexet (Palmer Drought Severity Index, PDSI), a standardizált csapadék indexet (Standardized Precipitation Index, SPI), a relatív evapotranspirációt és a Pálfi-féle Aszályossági Indexet (PAI, illetve jelenleg kifejlesztés alatt áll a PaDI, aminek a meghatározásához csak havi csapadék és hőmérsékletértékekre van szükség) használjuk. Ezen utóbbiról meg kell jegyezni, hogy egyedül ez az az aszályindex, amelyik hazai származású, és a nemzetközi gyakorlatba is bekerült.

Az indexekről még azt is tudni kell, hogy nincsen tökéletes index, mindegyiknek vannak hibái és előnyei. Ezért van az, hogy áttekintőbb vizsgálatokhoz több indexet használunk fel (például az US Aszály Monitoringja hetet), és ezek együttes vizsgálata ad csak jobb képet egy-egy adott helyzetről. Erre példa az 1. ábra, amelyen szarvasi adatokkal három aszályindexet ábrázoltunk.

A felhasznált indexek tehetetlensége (nevezhetjük emlékezetnek is) a 12 hónapos SPI esetében a legnagyobb, ezt a PDSI és a 3 hónapos SPI követi. Az ábrán jól látszik, hogy a legnagyobb változékonysága a 3 hónapos SPI-nek van, míg a 12 hónapos SPI görbéje a legsimább. Így előfordulnak helyzetek, amikor az egyik index aszályhelyzetet jelez, míg a másik nem, illetve fordítva. 1981 tavaszán kevesebb csapadék hullott, ezért a gyorsabban reagáló 3 havi SPI már aszályhelyzetet jelez, míg a másik két index még nedves körülményeket. Fordított a helyzet 1983 nyarán, amikor a csapadék már hosszabb ideje elmaradt a sokéves átlagtól, így a nagy tehetetlenségű indexek aszályos körülményeket mutatnak, de egy kis csapadékosabb időszak elegendő volt ahhoz, hogy a gyorsan változó 3 havi SPI értéke már magasabb legyen, mint a száraz időszakot jelző határérték. A példából jól látható, hogy az elemzésekhez mindig megfontoltan kell az indexeket megválasztani, és lehetőség szerint többet.

A fentebb említett indexek közül az SPI rugalmasan alkalmazható egy-egy folyamat karakterisztikus idejéhez, azaz több időlépcsőben is használható, a PDSI és a PAI kötött időléptékű. Így az SPI segítségével jól jellemezhető az egyes hónapok csapadékmennyiségének hatása a nagyobb időléptékű folyamatokra. Erre egy példát a 2. ábrán mutatunk be.



1. ábra. A 3 és 12 hónapos SPI, valamint a PDSI menete Szarvason 1981 és 1985 között

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,2	0,41	0,06	-0,46	-0,75	-0,7	-0,81	-1,3	-1,62
-0,23	0,46	0,08	-0,16	-0,56	-0,82	-0,75	-0,84	-1,24
1,27	0,58	0,92	0,56	0,29	-0,11	-0,32	-0,26	-0,37
0,32	0,94	0,51	0,84	0,54	0,3	-0,08	-0,27	-0,21
0,3	0,28	0,87	0,49	0,8	0,53	0,31	-0,04	-0,22
0,17	0,23	0,26	0,94	0,53	0,9	0,59	0,34	-0,01
-2,91	-1,27	-0,66	-0,43	0,4	0,08	0,54	0,25	0,03
-2,49	-4,48	-2,63	-1,47	-1,08	-0,17	-0,37	0,13	-0,1
-0,89	-2,53	-3,52	-2,83	-1,86	-1,61	-0,55	-0,69	-0,13
0,09	-0,56	-1,55	-2,09	-2,32	-1,78	-1,48	-0,58	-0,67
0,22	0,07	-0,46	-1,29	-1,8	-1,92	-1,53	-1,3	-0,51
0,18	0,15	0,04	-0,32	-0,92	-1,43	-1,51	-1,28	-1,15
-0,23	-0,1	-0,04	-0,11	-0,45	-1,02	-1,45	-1,57	-1,4

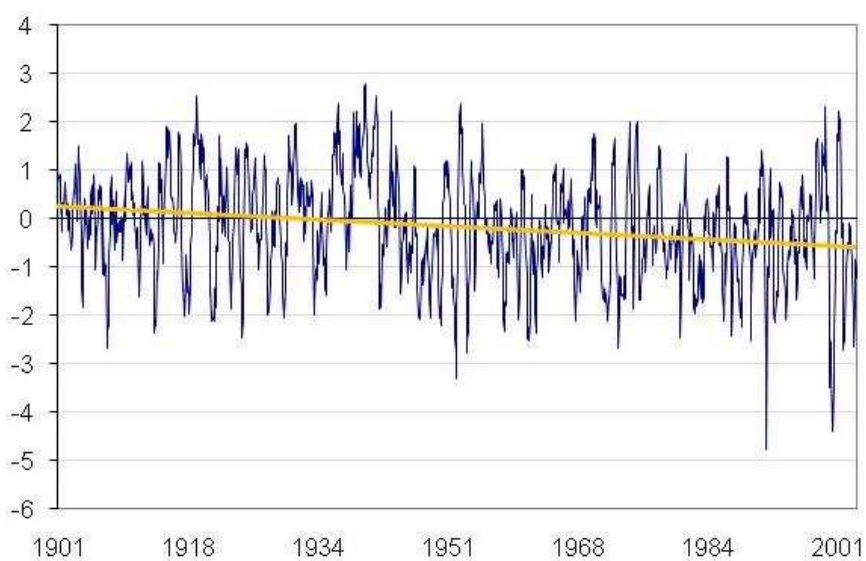
2. ábra. A különböző időléptékű SPI indexek változása Mosonmagyaróváron. A vízszintes tengely mentén az SPI időléptéke, a függőleges mentén a hónapok találhatóak. 2002 augusztusától 2003 augusztusáig. Zölddel jeleztük a normálérték alatti, de még nem száraz körülményeket, sárgával az enyhe és erős aszályt, lilával a rendkívüli aszályt és feketével a legalacsonyabb (azaz a legaszályosabb) értéket.

Lényegében átlagos, illetve az átlagnál valamivel nedvesebb ( $SPI > 1,0$ ) viszonyok uralkodtak 2002 augusztusától 2003 januárjáig. Ekkor egy nagyon száraz február következett. Az is jól látszik, hogy a február extrém száraz volt, a kéthavi SPI is még aszályos viszonyokat jelezett, de a nagyobb időléptékben még normális, közel normális

viszonyok uralkodtak. A csapadékhiányos februárra hasonlóan száraz március következett (ld. első oszlop), ami a két hónap összességében nagyon ritka, szélsőséges csapadékhiányt okozott. Az aszályos viszonyok még az öthónapos SPI-ben is megfigyelhetőkké váltak. Ezután minden egyes hónap csapadéka az átlagos körül mozgott (az első oszlopból látható), de a csapadékhiány egyre nagyobb időlépcsőjű indexekre terjedt ki. Így végül 2003 augusztusában, amikor már öt hónap telt el a száraz február-március óta, az öt hónapnál nagyobb időlépcsőjű SPI-k még mindig száraz viszonyokat mutattak. Ez azt mutatja, hogy az aszály általában nem szűnik meg egy csapadékesemény hatására, de még csak huzamosabb átlagosnak megfelelő időszak után is vannak nagy tehetlenségű folyamatok, amelyek még az aszály hatásainak vannak kitéve.

### **Aszálytendenciák**

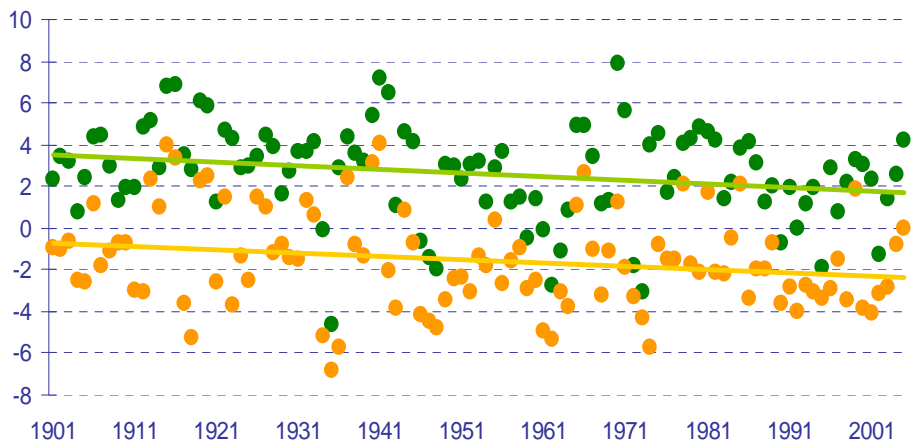
Magyarországot hosszútávon szárazodási tendencia jellemzi. Ezen belül természetesen vannak szárazabb és nedvesebb időszakok, illetve amikor a csapadékmennyiség növekvő vagy csökkenő tendenciát mutat. (Ezért szokás a csapadékelemzéseknél hosszabb időszakot használni, mint például a hőmérsékletnél, ahol a tendenciák egyértelműbbek.) Minél kisebb az SPI értéke, annál nagyobb a csapadékhiány. A 3. ábra Szeged példáján mutatja be, hogy a hosszútávú csökkenést az SPI idősor hogyan tükrözi, a tendenciája negatív.



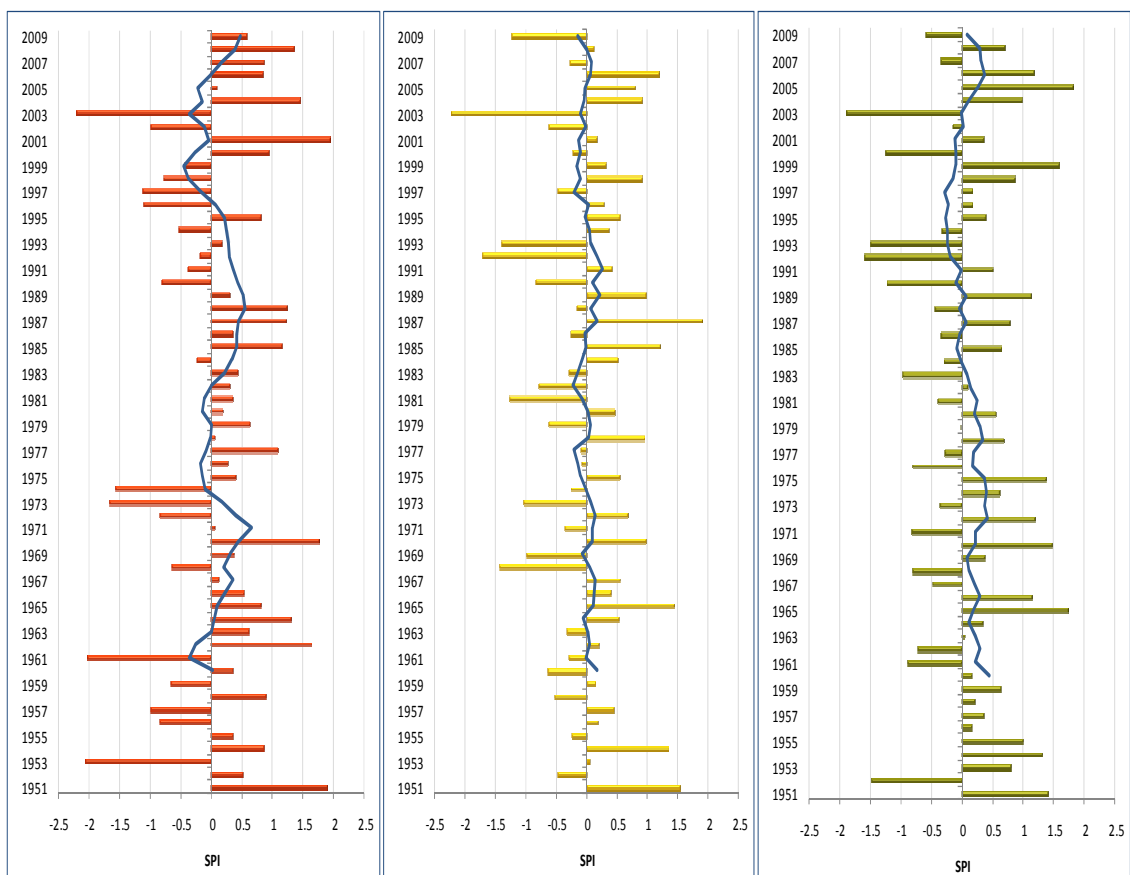
**3. ábra.** A 6 hónapos SPI idősora Szegeden, 1901-2003

A 4. ábra az évi minimum és maximum PDSI értékek idősorát mutatja. Ez lényegében az átlaghoz viszonyított legszárazabb és legnedvesebb időszak mérőszáma. (Az SPI-vel összevetve, mintegy 6-8 hónapról ad információt) Mivel a PDSI esetében is az alacsonyabb érték aszályosabb viszonyokat jelent, így a csökkenő tendencia mind a legszárazabb, mind a legnedvesebb időszakban az aszályhajlam növekedésére utal.

Az 5. ábrán három SPI érték országos idősorát ábrázoltuk. Mindhárom görbe a márciussal kezdődő egy (csak március), három (március május) és hat (március-augusztus) időszakot jellemzik. Bár a görbék fő menetükben hasonlóak, jól megfigyelhető az egyes időszakok ellentétes viselkedése.



4. ábra. A Palmer-index éves maximumainak és minimumainak idősora Debrecenben

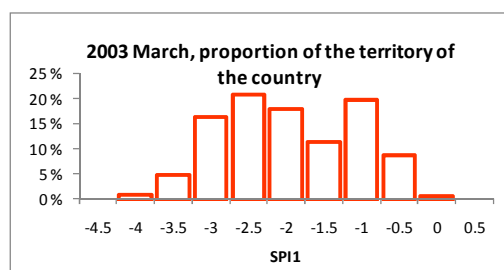
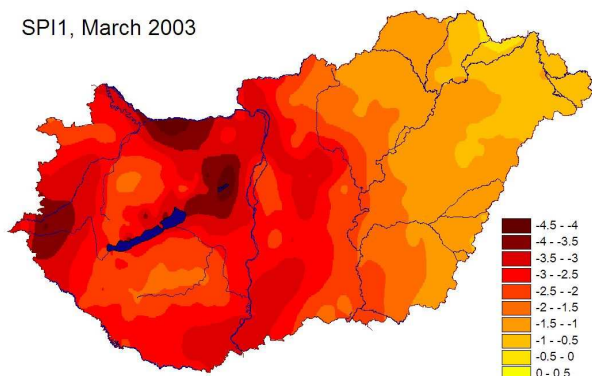


5. ábra. A márciushoz tartozó 1 (baloldali), 3 (középső) és 6 (jobboldali) hónapos SPI index idősora 1951-2009. Az értékek a rácsponti interpoláció átlagolásával készültek, és az országos átlagot jelentik

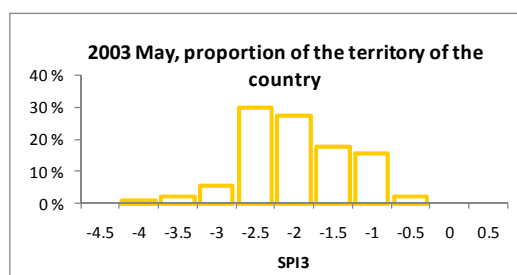
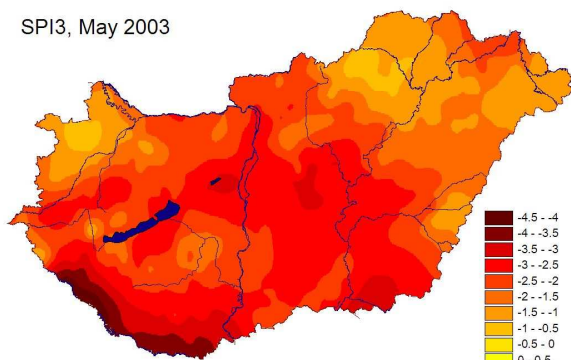
## Az aszály időtartamának és mértékének kapcsolata

A 6. ábra a 2003-as évi helyzetet mutatja be. Márciusban elsősorban Észak-Dunántúlon volt csapadékhiány, a tavaszi időszakban a Dél-Dunántúlon volt leginkább aszályos a helyzet az országban, míg a március-augusztusi hat hónapban Dél-Magyarországon, különösen a délkeleti területeken vált súlyossá az aszály.

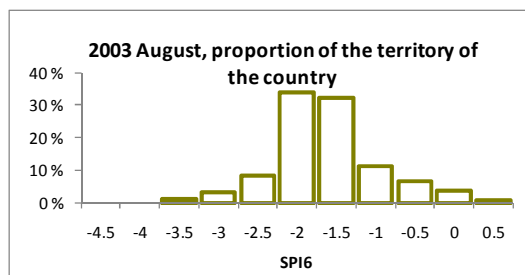
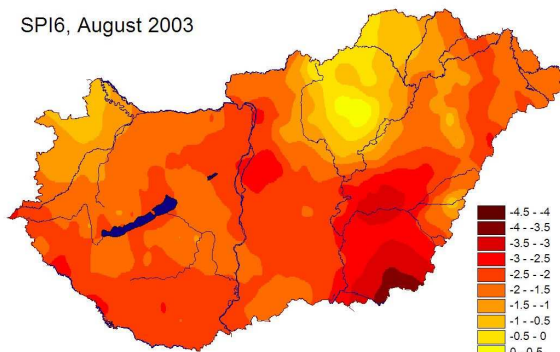
SPI1, March 2003



SPI3, May 2003



SPI6, August 2003



6. **ábra.** A 2003 év aszályának fejlődése. A felső sor a márciusi helyzet, amikor a csapadék havi mennyisége jelentősen a sokévi átlag alatt maradt, a középső sor a március-május időszakról ad információkat, míg az alsó sor a március-augusztus időszakot mutatja be. A térképek a megfelelő SPI-k térbeli eloszlását szemléltetik, míg a grafikonon a térképi értékek előfordulási gyakoriságát ábrázolja.



A változások oka az, hogy helyenként és időnként kisebb csapadékok azért kaptak egyes területek, aminek következtében az adott helyeken nem romlott tovább a helyzet. Ugyanis, amíg szinte bármikor és bárhol előfordulhat, hogy egy hónapban ne essen csapadék, addig olyan még nem fordult elő, hogy egy hónapig ne essen az egész országban az eső. Az is látszik a 6. ábra térképein, hogy egy-egy hónapban az általánosan várt éghajlati képtől jelentősen eltérő eloszlás is kialakulhat (általában Észak-Dunántúl Magyarország csapadékosabb területei közé tartozik), de hosszabb távon az éghajlati jellegzetességek egyre erőteljesebben megjelennek, így a hathavi SPI már a jól ismert sajátosságot mutatja, azaz, hogy az ország délkeleti részén a legnagyobb az aszályhajlam.

Az eloszlásokból az derül ki, hogy az igazán nagy szélsőségek rövidebb időtávon jelentkeznek, minél hosszabb léptékű SPI-t használunk, az indexértékek ingása úgy csökken. Az eloszlás annál kiegyenlítettebb, minél rövidebb a leírandó időintervallum. Míg március hónapban 5 kategória fordul elő hasonló gyakorisággal, addig tavasszal két kategória kiemelkedő és kettő nagyobb gyakoriságú, és a hathónapos időlépcsőben az ország mintegy 70%-a -1 és -2 közé esik.

### *Sérülékenység*

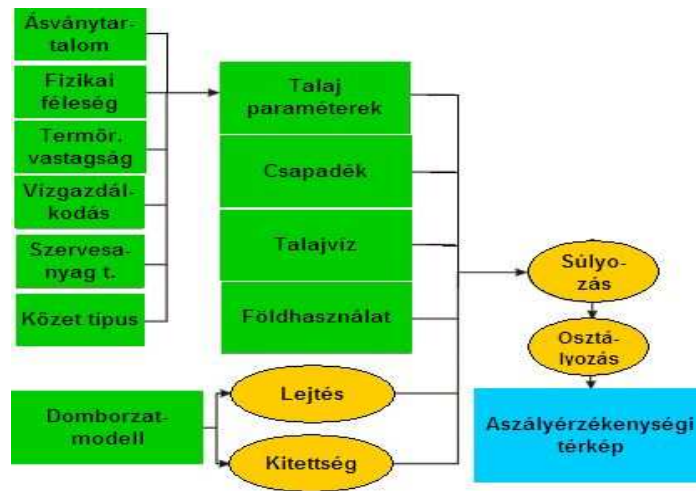
Amikor egy folyamatnak egy rendszerre való hatását vizsgáljuk, akkor egyfelől a hatást kutatjuk, másfelől a hatást elszenvedő rendszert. Esetünkben a hatás az aszály, amit kiterjedésével, mértékével jellemezhetünk. Ezt vizsgáltuk az előbbieken, ebben a fejezetben pedig a hatást elszenvedő rendszer jellemzőit is azok időbeli változásait ismertetjük. Ehhez a sérülékenység fogalmát használjuk fel. Az IPCC meghatározása szerint a sérülékenység 'Az a szint, amelynél a rendszer már képtelen megbirkózni az éghajlatváltozás negatív hatásaival, beleértve az éghajlati változékonyságot és szélsőségeket. A sérülékenység a rendszerre ható éghajlati ingadozás jellegétől, nagyságától és sebességétől függ, továbbá a rendszer érzékenységétől és alkalmazkodó képességétől.'

Az érzékenységet természeti tényezőkkel írhatjuk le, az alkalmazkodó képességet társadalmi gazdaságiakkal. Így például az érzékenységhez tartozhat a terület kitettsége, hiszen a délies lejtők hajlamosabbak az aszályra, mint az északiak. A társadalmi-gazdasági hatásokhoz tartozik például az adott területen a lakosság képzettsége, általános jövedelme stb., mert ezek teszik alkalmassá a különböző alkalmazkodási eszközök megértésére és beszerzésére. Jelen helyzetben csak a természeti tényezőket vizsgáljuk.

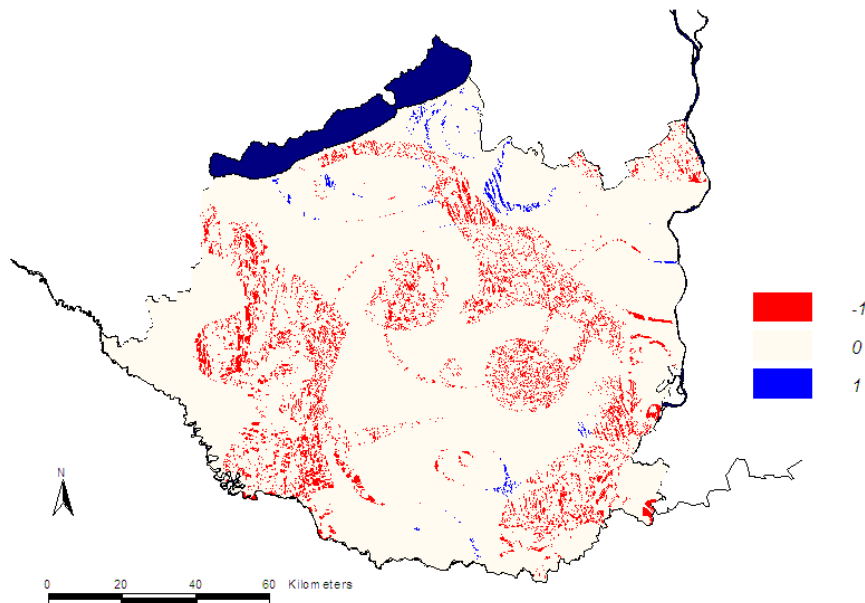
A rendszer összeállításánál több szempontot is figyelembe kellett venni. Így egyrészt nem célszerű túlságosan sok paramétert figyelembe venni, másrészt az alapvető paramétereket mégis szerepeltetni kell. Az egyes paramétereken belül kategóriákat állítottunk fel. Ezek jelenleg szubjektívek, de objektívvé tehetők. A sérülékenység mértéke az egyes paraméterek aktuális értékéhez tartozó kategóriaértékek összege.

A szubjektív kategóriaértékeket verifikációval tudnánk pontosítani. Mivel az aszály hatásának nyilvánvaló mértéke a termésátlag, ezen idősorok különböző helyekről való felhasználásával lehet a kategóriabesorolásokat értékelni és pontosítani. Az adatsorok összegyűjtése után lehetséges a verifikáció és ezzel a különböző kategóriák súlyának pontosítása. A jelen vizsgálathoz figyelembevett paraméterek: a talaj

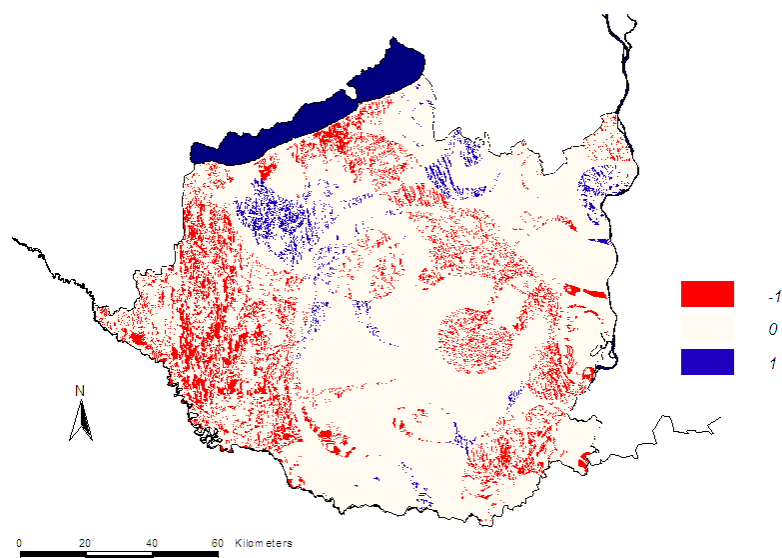
tulajdonságai, a csapadékmennyiség, a talajvízszint mélysége, a felszínhasználat és a domborzat, amelynek mind a lejtését, mind a kitétségét vizsgáltuk.



7. ábra. Az aszályérzékenység meghatározásának folyamata



8. ábra. Az aszályérzékenység megváltozása az 1951-1980 és az 1961-1990 időszak különbsége alapján



**9. ábra.** Az aszályérzékenység megváltozása az 1951-1980 és az 1971-2000 időszak különbsége alapján

A fenti paraméterek alapján megpróbáltuk az általunk definiált mennyiség változásait meghatározni. A változásokat a 8. és 9. ábra mutatja. Látható, hogy vannak területek, ahol a helyzet javult, és olyan is ahol romlott, de nagyobb területen romlott, mint javult. Azt is láthatjuk a két ábra összehasonlításából, hogy a helyzet nemcsak a két harmincéves időszak között romlott, hanem a romlás jelentősebb, ha az 1971-2000-es időszakhoz hasonlítjuk az 1951-1980-as időszakot, mintha az 1961-1990-eshez.

### ***Következtetések***

Az aszály vizsgálatához komplexebb megközelítés szükséges. Egyrészt az aszályindexek alkalmazásánál nagyobb figyelmet kell fordítani a vizsgálat céljához legjobban illő index, de még inkább indexek felhasználására. Összességében kijelenthetjük, hogy hazánk aszályhajlama növekszik, bár különböző idősorozatokra eltérőek a változások. Bonyolultabb kölcsönhatások vizsgálata is szükségessé válik (például sérülékenység), ami kiterjedtebb monitoring tevékenységet feltételez. A hatások összehangolt, nemzeti tevékenységet igényelnek.

### ***Irodalomjegyzék***

- Bussay Attila, Szinell Csaba, Szentimrey Tamás: Az aszály előfordulásainak vizsgálata és mérhetősége, Éghajlati és agrometeorológiai tanulmányok 7, 1999 Budapest, Országos Meteorológiai Szolgálat
- Hayes, M., 2002: Drought indexes // Drought indices. 9p. Lincoln, Nebraska: University of Nebraska.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, pp. 179–184. January 17–22, Anaheim, California
- Szalai, S., Bella, Sz., Németh, Á.: Drought Sensitivity Investigations and its Tendency, Balwois workshop, Ochrid, március 10-11

## Hozzászólás

Mika János

Eszterházy Károly Főiskola 3300 Eger Leányka u. 6.  
Országos Meteorológiai Szolgálat, 1024 Budapest Kitaibel P. u. 1.  
email: mika.j@lmet.hu

**Összefoglaló** – A programban egy ötperces hozzászólásra kaptam lehetőséget. Ebben három témakört érintettem. Elsőként néhány példát mutattam, amelyek alapján a globális változás tényét és annak emberi eredetét még bizonyosabbnak tekinthetjük, mint ahogy azt az IPCC Negyedik Értékelő Jelentése (AR4: IPCC, 2007; IPCC-DŐ, 2007) megállapította. Ebből egyetlen ábrát, a Föld-légkör rendszer energiamérlegének egy újabb számbavételét mutatom be, amiből a felszín, azaz elsősorban az óceánok folyamatosan elnyelnek  $0,9 \text{ Wm}^{-2}$  energiát, minden bizonnyal a légkör üvegházhatásának erősödése miatt. A második pontban az AR4-ben is szerepelt globális klímamodellekkel Európára előrejelzett változásokat mutatjuk be, saját számításként a MAGICC/SCENGEN diagnosztikai modell- rendszer (Wigley, 2008) felhasználásával. Ezen eredmények jóval részletesebben mutatják be a globális modellek válaszait, mint az AR4 térképei. Emellett a légnomásváltozás alacsony szignifikancia szintje arra utal, hogy a regionális klímaváltozás legkorszerűbb eszközei, a beágyazott modellek számára peremfeltétellel szolgáló globális háttér-modellek egymás között eltérő eredményei további bizonytalansági forrást jelentenek. E bizonytalanság hozzáadódik a maguknak a beágyazott modelleknek az egymás közötti eltéréséből, valamint a kisebb skálájú folyamatok lehetséges eltérő parametrizációi miatt megmutatkozó szóródáshoz képest. Ez utóbbi vonatkozásokat hozzászólásunk harmadik fejezetében ismertetjük, az EU Ensembles (2009) Projektjének zárójelentésében bemutatott ábrák alapján.

### Bevezetés

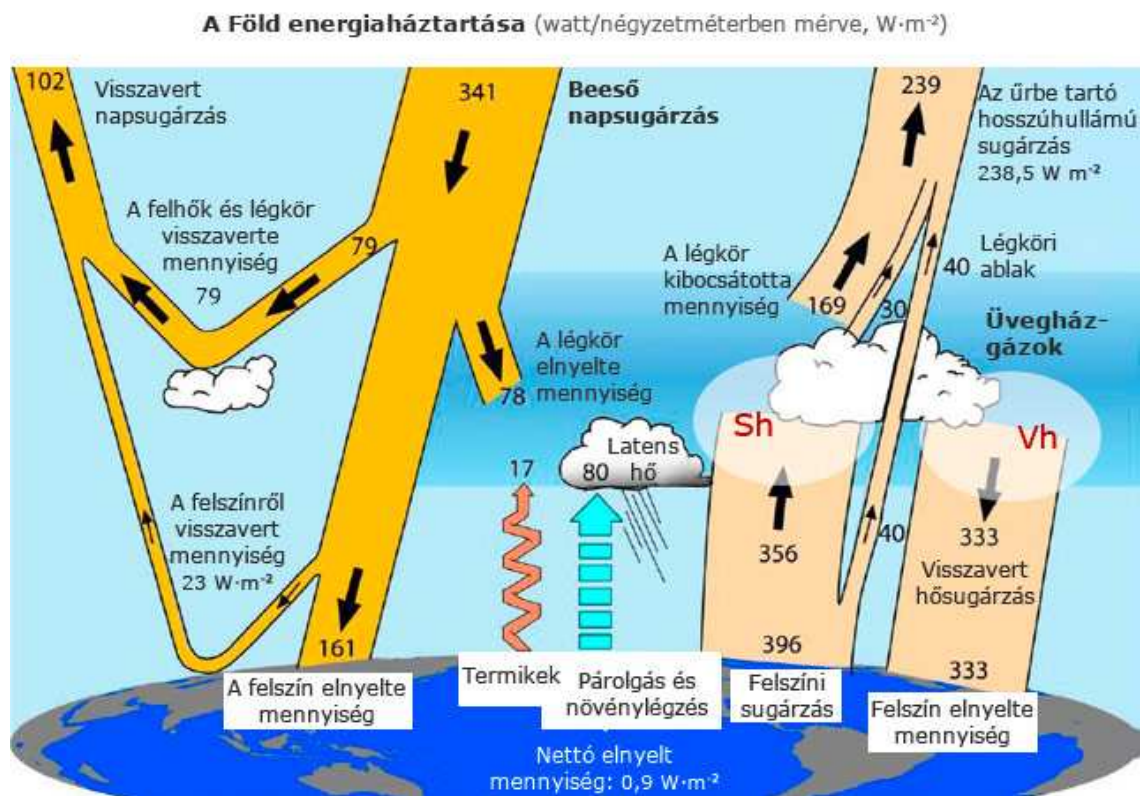
Egy régi mondás szerint tudományos ismereteink háromfélék lehetnek: Hipotézisek („Így is lehet”), diagnózisok („Így van” esetleg „Így volt”) és bizonyítások („Így kell(ett) lennie”). Az éghajlatváltozások terén a hipotéziseken túl vagyunk, a változásról szóló diagnózisaink is egyértelműek, ám a bizonyításhoz birtokában kell lennünk a hatótényezők alakulása mellett, az éghajlati rendszer működése ismeretének is.

Ez utóbbi feltétel teljesüléséhez kínálnak kulcsot az ún. éghajlati modellek, amelyek a fizika alaptörvényeit, tehát a tömeg, az impulzus és az energia megmaradását matematikai öntik egyenletekbe, Ezek közül a fenti célt elsősorban a minden folyamatot egyben kezelő (igaz a gyors időjárási jelenségek és szélsőségek tekintetében kevésbé pontos) globális klímamodellek. Ezeket a modelleket – a korábbi, túl egyszerű elődeiktől való megkülönböztetés érdekében – általános cirkulációs modelleknek, illetve a csak a légkörre kiterjedő elődöktől megkülönböztetve, kapcsolt óceán-légkör általános cirkulációs modelleknek (OAGCM) is nevezzük.

Rövid hozzászólásunk írásos változatában elsősorban a globális és a regionális modellek válaszaival foglalkozunk. Utóbbiak sokkal finomabb felbontásúak, azaz teljesebb fizikai tartalmúak globális társaiknál. Névleges horizontális felbontásuk (rácstávolságuk) napjainkban 10-25 km, szemben a globális modellek kb. tízszer ekkora rácstávolságával. Természetesen ezek a finomabb modellek ma még nem futtathatók a teljes Földre, hanem csak a modell-alkotók (alkalmazók) számára érdekes célterületre. E két modell-osztály válaszait hasonlítjuk össze hozzászólásunk nagy részében. Előtte azonban a globális változás egy újabb bizonyítékát mutatjuk be, ami eddig viszonylag kisebb figyelmet kapott.

## A Föld-légkör rendszer energiamérlege újraszámolva

Trenberth et al. (2009) újraszámolták a saját korábbi becsléseiket (Kiehl and Trenberth, 1997) a sugárzási mérleget illetően (1. ábra). A korábbi megfigyelési periódus 1985-1989 volt, míg az utóbbi becslések a 2000 márciusa és 2004 májusa közötti időszakot fogják át. A számértékek eltérését valószínűleg nem a klímaváltozás, hanem a becslési technikák eltérései és a rövid periódusok ingadozásai okozták. Ugyanakkor első ízben jelent meg a hasonló becslések történetében az a  $0.9 \text{ Wm}^{-2}$  mértékű egyensúlytalanság, ami a légkör és a felszín, elsősorban az óceánok között érvényesül. Ez a folyamatosan átadott hőmennyiség jelzi, hogy a Föld-légkör rendszer energiamérlegét valami, minden bizonnyal elsősorban az üvegházhatású gázok szaporodása, folyamatosan eltolja.



**1. ábra.** Az éghajlati rendszer energiamérlege (Trenberth et al., 2009: 2000. márciustól 2004 májusig terjedő adatok). Az ábra rögzíti a folyamatos melegedés tényét:  $0,9 \text{ Wm}^{-2}$  az óceánban elnyelődik!

## Változások a kapcsolt óceán-légkör modellek eredmény-mezői alapján

Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) 2007. évi Negyedik Értékelő Jelentésében (10. fejezet Supplement) közreadott 21 OAGCM modell-eredmény alapján bemutatjuk a hőmérséklet és a csapadék téli és nyári átlagértékeinek változásait. Az 1. táblázatban bemutatjuk a felhasznált modelleket és megadjuk a további ábrákon használt rövidítéseket, a modell származási helyét és a modell eredeti forrását (az IPCC WG-I 8. fejezetére utalva, ahol a részletek fellelhetők), a légköri és az óceáni almodellek horizontális és vertikális felbontását.

## A MAGICC/SCENGEN felépítése és validálása

A MAGICC/SCENGEN programcsomag egy kapcsolt gázkörforgási/klíma modell (MAGICC), amely egy specifikus klímaváltozási szcenárió generátort (SCENGEN) lát el kiinduló adatokkal. A MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change) egy sor gáz-körforgalmi, éghajlati és jégolvadási modell kombinációja, ami lehetővé teszi, hogy meghatározzuk a földi átlaghőmérséklet alakulását valamely előre adott üvegházgáz koncentráció-változás esetén. (Wigley, 2003, 2008) Az SCENGEN a MAGICC kimenő adatait felhasználva készít térképeket, a jövő regionális éghajlati sajátosságairól.

Az 1. táblázatban megadjuk a felhasznált modellek szokásos rövidítését, azok származási helyét és forrásait (a hivatkozások az IPCC WG-I 8. fejezetében fellelhetők), továbbá az egyes légköri és az óceáni almodellek horizontális és vertikális felbontásait. A modellek felbontása megfelel a SCENGEN eredmények 2,5 x 2,5 fokos léptékének.

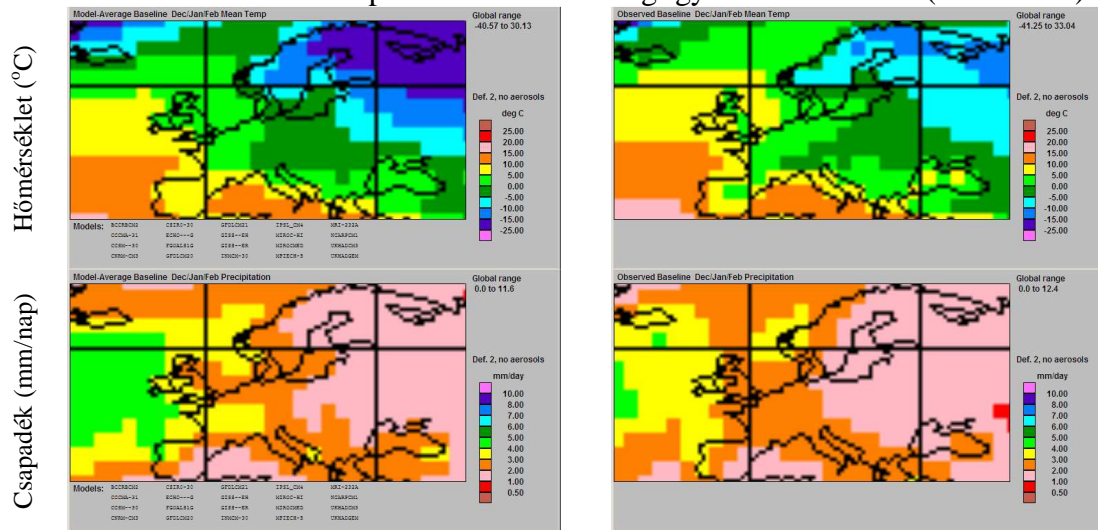
**1. táblázat.** Az alább bemutatandó kapcsolt óceán-légkör modellek specifikációja (az IPCC 2007 WG-I, Ch. 8., 597-599 o. alapján) Az információk sorrendje: a modellt jegyző intézmény és ország, a modell-légkör felső határa, a vertikális szintek száma (**top**), a légköri modell horizontális felbontása (**A**) és ugyanez az óceáni modellben (**O**).

<b>MODELLEK ÁTLAGA</b> = 21 modell eredményeinek átlaga, ha mind közölte	<b>GISS-AOM, 2004:</b> NASA Goddard Institute for Space Studies, USA, <b>top</b> = 10 hPa, L12 <b>A:</b> 3° x 4° <b>O:</b> 3° x 4° L16
<b>GISS-EH, 2004:</b> NASA Goddard Institute for Space Studies, USA, <b>top</b> = 0.1 hPa, L20 <b>A:</b> 4° x 5° <b>O:</b> 2° x 2° L16	<b>GISS-ER, 2004:</b> NASA Goddard Institute for Space Studies, USA, <b>top</b> = 0.1 hPa L20 <b>A:</b> 4° x 5° <b>O:</b> 4° x 5° L13
<b>GFDL-CM2.0, 2005:</b> NOAA/ Geophys. Fluid Dyn. Lab., USA <b>top</b> = 3 hPa L24, <b>A:</b> 2.0° x 2.5° <b>O:</b> 0.3°–1.0° x 1.0°	<b>GFDL-CM2.1, 2005</b> NOAA/Geophys. Fluid Dyn. Lab., USA, =GFDL-CM2.0 with semi-Lagrangian atmospheric transport
<b>CGCM3.1(T47), 2005:</b> Canadian Centre for Clim. Mod. Anal., <b>top</b> =1 hPa, L31 <b>A:</b> T47 (~2.8°x2.8°) <b>O:</b> 1.9°x1.9° L29	<b>CGCM3.1(T63), 2005:</b> Canadian Centre for Clim. Mod. Anal., <b>top</b> =1 hPa, L31 <b>A:</b> T63 (~1.9° x 1.9°), <b>O:</b> 0.9° x 1.4° L29
<b>MIROC3.2(hires), 2004:</b> U.Tokyo; Nat. Ins. Env. Stud.,Japan <b>top</b> =40 km L56 <b>A:</b> T106 (~1.1° x 1.1°) <b>O:</b> 0.2° x 0.3° L47	<b>MIROC3.2(medres),2004:</b> U.Tokyo; Nat. Ins. Env. Stud.,Japan <b>top</b> = 30 km L20 <b>A:</b> T42 (~2.8°x2.8°) <b>O:</b> 0.5°–1.4°x1.4° L43
<b>UKMO-HadCM3, 1997:</b> Hadley Centre / Meteorol. Office, UK <b>top</b> =5 hPa, L19 <b>A:</b> 2.5° x 3.75° <b>O:</b> 1.25° x 1.25° L20	<b>UKMO-HadGEM1, 2004:</b> Hadley Centre/ Meteorol. Office, UK <b>top</b> = 39.2 km, L38 <b>A:</b> ~1.3° x 1.9° <b>O:</b> 0.3°–1.0° x 1.0° L40
<b>CCSM3, 2005:</b> National Center for Atmosph. Res., USA, <b>top</b> = 2.2 hPa, L26 <b>A:</b> T85 (1.4°x1.4°), <b>O:</b> 0.3°–1°x1°, L40	<b>CNRM-CM3, 2004:</b> Météo-France/Centre Nat. Rech. Mét., France, <b>top</b> =0.05 hPa L45, <b>A:</b> T63 (~1.9° x 1.9°) <b>O:</b> 0.5°–2° x 2° L31
<b>CSIRO-MK3.0, 2001:</b> Comm. Sci. Ind. Res. Org., Australia, <b>top</b> = 4.5 hPa, L18 <b>A:</b> T63 (~1.9° x 1.9°) <b>O:</b> 0.8° x 1.9° L31	<b>ECHAM5/MPI-OM, 2005:</b> Max Planck Inst. f. Meteor., Germany, <b>top</b> =10 hPa, L31 <b>A:</b> T63 (~1.9° x 1.9°), <b>O:</b> 1.5° x 1.5° L40
<b>ECHO-G, 1999</b> Met. Inst. Univ. Bonn, FRG, Met. Res. Inst. Korea, <b>top</b> =10 hPa L19 <b>A:</b> T30 (3.9°x3.9°) <b>O:</b> 0.5°–2.8°x2.8° L20	<b>FGOALS-g1.0, 2004:</b> Nat. Key Lab. /Inst. Atmos. Phys., China, <b>top</b> = 2.2 hPa, L26 <b>A:</b> T42 (~2.8° x 2.8°) <b>O:</b> 1.0° x 1.0° L16
<b>INM-CM3.0, 2004:</b> Institute for Numerical Mathematics, Russia <b>top</b> = 10 hPa, L21 <b>A:</b> 4° x 5° <b>O:</b> 2° x 2.5° L33	<b>IPSL-CM4, 2005:</b> Institut Pierre Simon Laplace, France <b>top</b> = 4 hPa, L19 <b>A:</b> 2.5° x 3.75° <b>O:</b> 2° x 2° L31
<b>MRI-CGCM2, 2003:</b> Met. Res. Institute, Japan, <b>top</b> = 0.4 hPa L30 <b>A:</b> T42 (~2.8°x2.8°) <b>O:</b> 0.5°–2.0°x2.5° L23	<b>PCM, 1998:</b> National Center for Atmosph. Research, USA <b>top</b> = 2.2 hPa L26 <b>A:</b> T42 (~2.8°x2.8°) <b>O:</b> 0.5°–0.7°x1.1° L40

A MAGICC/SCENGEN programcsomag 5.3.v2-es sorozatszámú verzióját 2008 szeptemberében hozták nyilvánosságra. Ez a szoftver-csomag már az IPCC (2007) prognózisait dolgozza fel. A MAGICC által egyesített modelleket a Climatic Research Unit (Anglia) és a NCAR (USA) központokban dolgozták ki. A tanulmányban az intenzív koncentráció-növekedést feltételező, A1B forgatókönyv eredményeit ismertetjük, 2,5×2,5 fokos bontásban.

Elsőként a modell-szimulációk pontosságát vizsgáltuk az 1980-1999 évek megfigyelt hőmérséklet és csapadék-adataihoz képest (2. ábra)

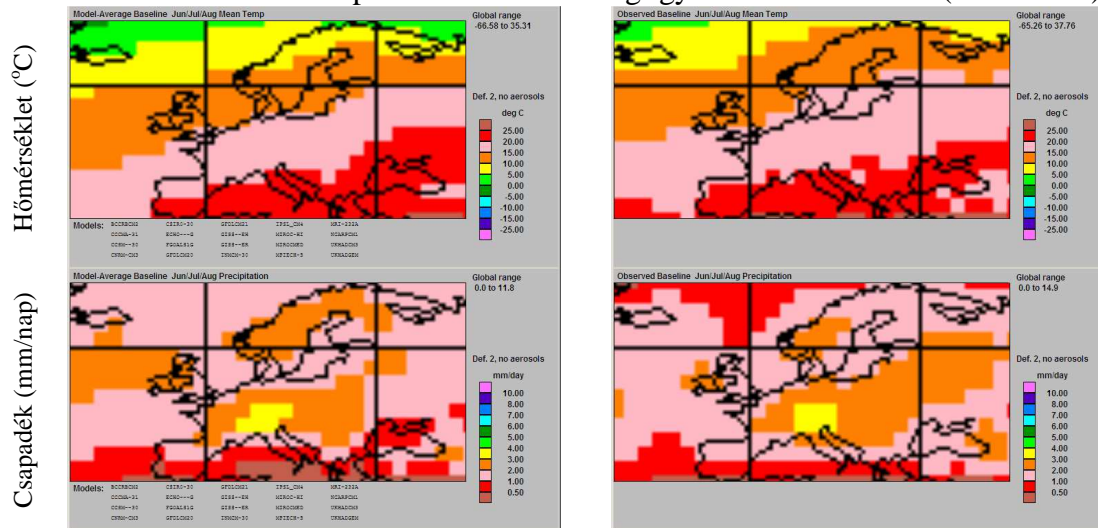
### A hőmérséklet és a csapadék szimulált és megfigyelt értékei – TÉL (1980-1999)



A 20 modell átlaga

Megfigyelt értékek (ERA-40)

### A hőmérséklet és a csapadék szimulált és megfigyelt értékei – NYÁR (1980-1999)



A 20 modell átlaga

Megfigyelt értékek (ERA-40)

**2. ábra.** A hőmérséklet (mindig felül) és a csapadék (mindig alul) referencia értékei télen (felső négyes) és nyáron (alsó négyes) a modellek átlagában (balra) és a tény-adatok analízise alapján (ERA-40 – jobbra, UPPALA et al., 2005) az 1980-1999-as alapidőszakban.

A téli és a nyári átlaghőmérséklet szimulált területi eloszlása nagyjából megfelel a valóságnak, de Európa legtöbb térségében a modellek átlagos kiinduló állapota hidegebb annál. A hiba Észak-Európában jelentős, ott télen helyenként meghaladja a -8 °C-ot, míg a kontinens nagy részén az eltérés -3 °C nál nem nagyobb.

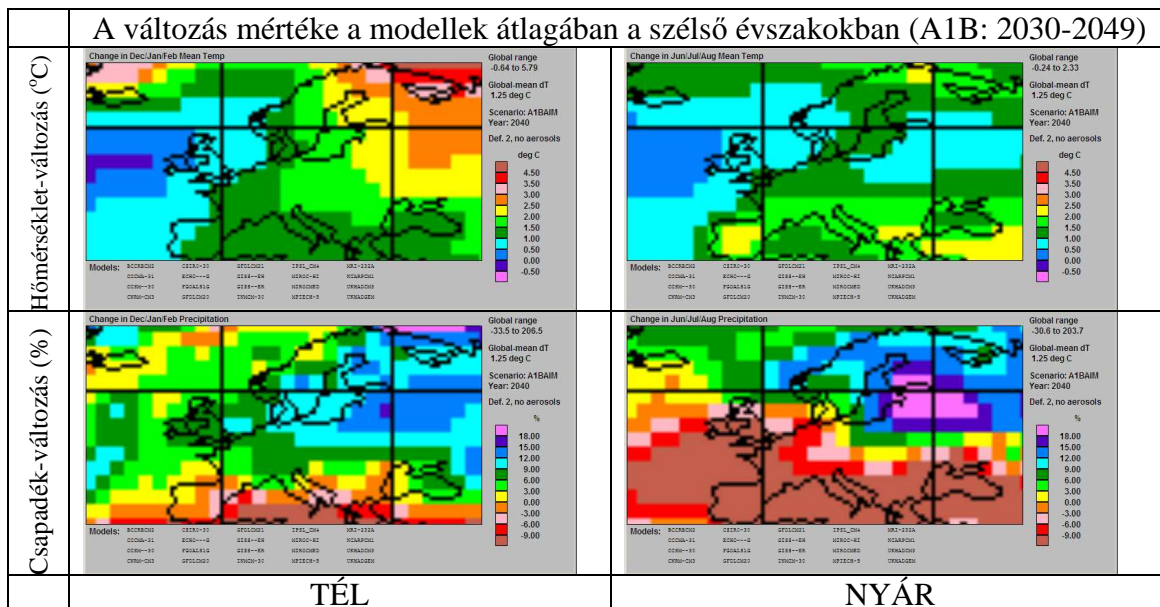
A téli és a nyári csapadékösszeg szimulált mezőinek térbeli szerkezete is emlékeztet a valós képre, ám itt a csapadékhozam túlbecslése jellemzi a kivágtat legnagyobb részét. A téli csapadék túlbecslése a kontinensen jellemzően 10-50 %-os, ám épp a Kárpátok térségében meghaladja a 70 %-ot is. A nyári a kép kedvezőbb, a kontinens túlnyomó részén a hiba ±30 %-on belül marad, sőt Közép-Európa közepén, így a Kárpát-medence térségében is csupán ±10 %!

A légnyomás téli reprodukált képe a kontinens túlnyomó részén 1-5 hPa-lal kisebb a valóságnál, ezen belül a Kárpát medencére a nagyobb hibák esnek (összhangban a csapadék túlbecslésével). Nyáron a kép kedvezőbb, a hiba a kontinens túlnyomó részén ±3 hPa-n belül marad.

### A megváltozások mértéke és szignifikanciája

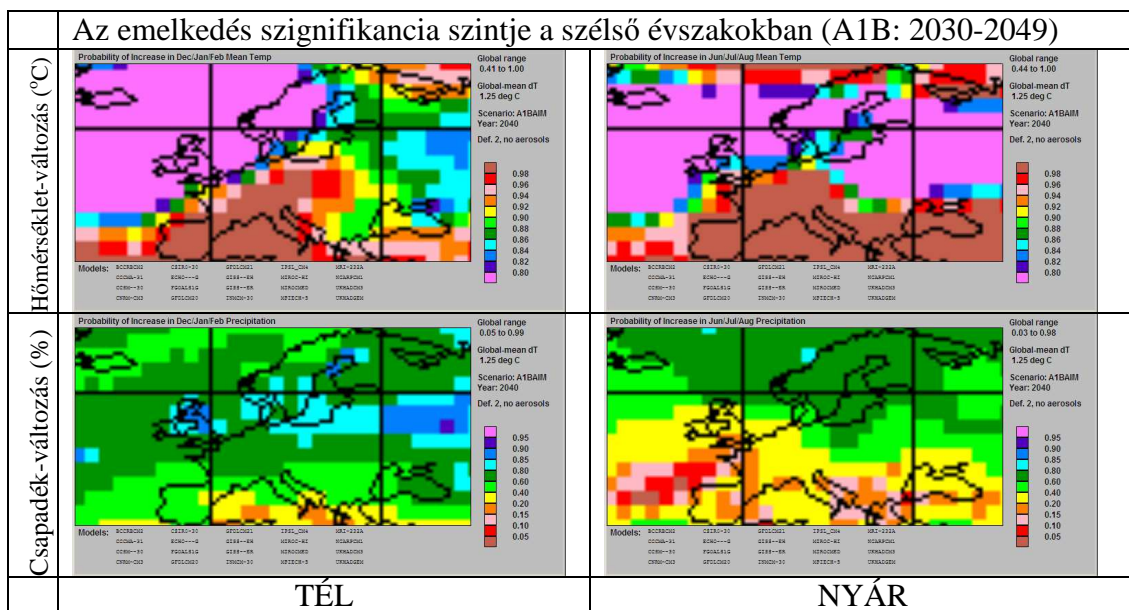
A továbbiakban a MAGICC/SCENGEN rugalmasságát kihasználva, egy kevésbé szokásos időszakra, a 2030-2049 évekre történő megváltozásokat vizsgáljuk, ami az 1980-1999-es referencia időszakhoz képest pontosan fél évszázados változásokat jelent.

A hőmérséklet téli emelkedése (3. és 4. ábra, balra) a mediterrán térségben és Közép-Európában 90 %-os és efölötti szinten szignifikáns. Ugyanakkor, a melegedés bizonyossága az Atlanti óceán és az Orosz síkság területén kisebb, néhol 80 % alatti. A nyári változás (3. és 4. ábra, jobbra) szignifikanciája a Kárpát-medence területén alig haladja meg a 80 %-os értéket, míg a mediterrán térség mellett Nyugat-Európában is egyértelmű a változás, de a télen bizonytalan területek a nyáron is olyanok.



3. ábra. A hőmérséklet (felül) és a csapadék (alul) változásai az A1B szcenárió szerint a modellek átlagában 2030-2049-re (1980-1999-hez képest). Balra a téli-, jobbra a nyári változások láthatók. A globális melegedés átlagos mértéke 1,25 °C.

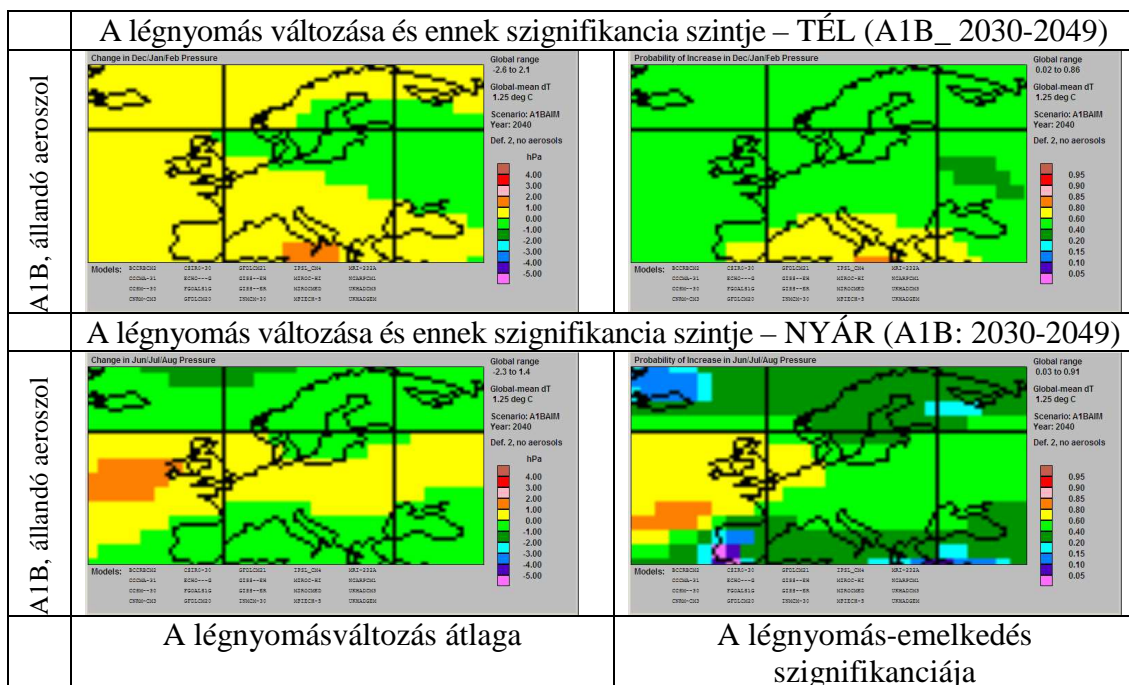




4. ábra. A hőmérséklet- (felül) és csapadék-növekedés (alul) szignifikancia szintje az A1B szcenárió szerint 2030-2049-re. Balra a téli-, jobbra a nyári változások láthatók.

A téli csapadék a modellekben többnyire növekszik, de a szignifikancia csak kisebb foltokban éri el a 90 %-ot Európában. A nyári változásokban egyértelmű a zérus változás végighúzódnása Európán, elválasztva a szárazabbá váló déli területeket, a több csapadékot kapó északiaktól. A változás előjele azonban ritkán szignifikáns.

Hazánk télen a növekedés-, nyáron a jelentős csökkenés területére esik.

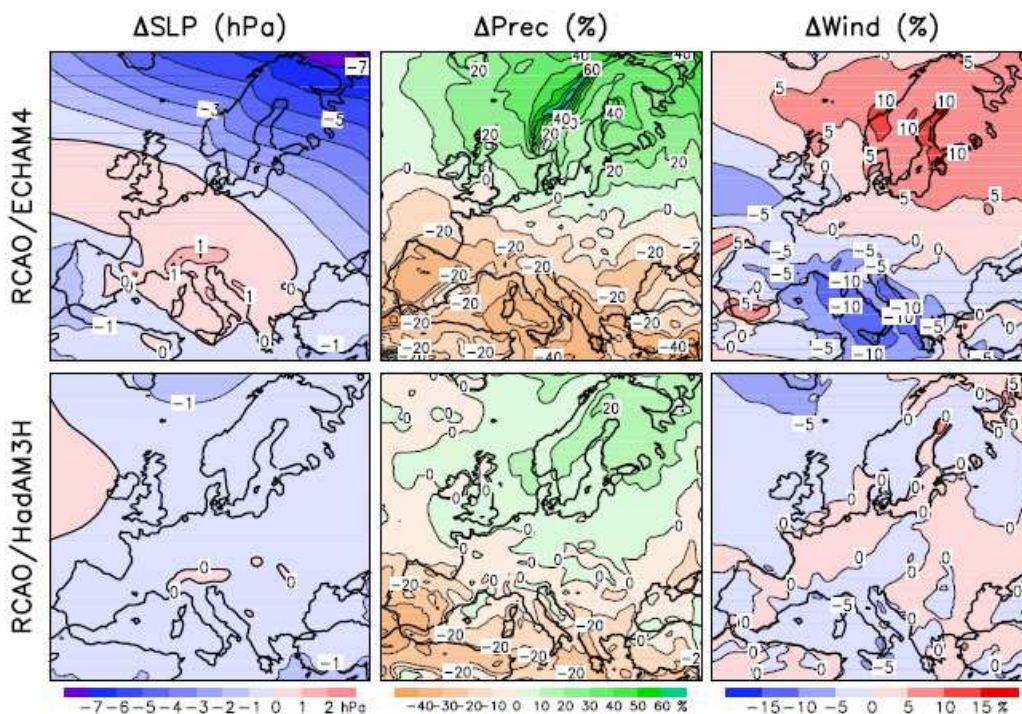


5. ábra. A tengerszinti légnyomás változása (balra) és annak szignifikancia szintje (jobbra) az A1B szcenárió szerint, 2030-2049-re (1980-1999-hez képest). Felül a tél, alul a nyár eredményei.

A légnyomás-változás (5. ábra) majdnem mindenütt 1 hPa-nál kisebb, a szignifikancia szintje jellemzően 50 % körüli. Nyáron az abszolút változás ugyanilyen kicsi, de egyes, Közép-Európától távoli kisebb térségekben szignifikáns.

Ez egyben azt illusztrálja, hogy a beágyazott modellek számára a durva felbontású globális modellektől származó oldalsó határfeltételek eléggé eltérőek lehetnek. Amint ezt a 6. ábra is bizonyítja, a határfeltételeknek ez a különbsége erősen befolyásolja a jövőre vonatkozó előrejelzéseket.

A 6. ábra tanúsága szerint ugyanis ugyanaz a modell két eltérő háttér-modellhez kapcsolva erősen különböző eredményt adhat. Megállapíthatjuk, hogy a légnyomásváltozás évi átlagban is különbözik két különböző háttér-modellhez kapcsolt ugyanazon beágyazott modell belső területén. A légnyomás különbsége önmagában nem okozója, de a határfeltételek modellek közötti különbözőségére utalva, indikátora a csapadék-változások eltérő viselkedésének. Még szorosabb a kapcsolat a szélmező megváltozásában rejlő különbség és a nyomásváltozás különbségei között.



**6. ábra.** Az évi átlagos tengerszinti légnyomás ( $\Delta SLP$ ), csapadékösszeg ( $\Delta Prec$ ) a felszíni szélesség ( $\Delta Wind$ ) változásai 2071-2100-ra az 1961-1990 évekhez képest, az A2 forgatókönyv feltételezésével. A számítást a stockholmi Rossby Centre regionális óceán-légkör modelljében készült, két különböző modell által biztosított oldalsó határfeltételek mellett. A felső ábrák az ECHAM4/OPYC3 háttér-modellhez, míg az alsó ábrák a HadAM3H modellhez kapcsolt futások eredményei. A két háttérmodellhez kapcsolt futás eredményei eléggé eltérnek egymástól. (Forrás: IPCC, 2007: Fig. 11.6)

A következőkben bemutatjuk egy a beágyazott modelleket igen nagy számban vizsgáló Projekt eredményeit. Azonban, amint ezt látni fogjuk, még ez a nagy projekt sem tudta megoldani, hogy egy-egy beágyazott modell egyszerre nagyszámú háttér modellel lehessen egyoldalúan egybekapcsolva. (Az egyoldalúság azt jelenti, hogy a beágyazott modell folyamatai nem hatnak vissza a háttér-modell viselkedésére.)

## Beágyazott modellek – az Ensembles Projekt eredményeiből

Ma már hozzáférhetőek az Ensembles Projekt (van den Linden és Mitchell, 2009) eredményei. Itt az együtttest nem elsősorban a beágyazott modellek sok háttér-moddellel való összekapcsolása képezte, hanem a kezdeti feltételek és a parametizációk variálása. Az egyes beágyazott modellekhez átlagosan 1,7 háttér-modell kapcsolódott, tanúsítva, hogy e két bonyolult rendszer összekapcsolása nehéz tudományos feladat.

A 7. ábrán a téli-, a 8. ábrán pedig a nyári megváltozás-mezők láthatók, amint ezek az Ensembles Jelentés (van den Linden és Mitchell, 2009) 140-141. oldalán láthatók. A 2080-2099 évekre vonatkozó előrejelzésben nagy az eltérés az alsó és felső decilisekhez (10 %-os és 90 %-os küszöbökhez) tartozó megváltozás-mezők között.

Csak a mediánokra tekintve megállapíthatnánk, hogy a melegedés *télen* mindenhol jelentős, észak-keletről délnyugatra csökkenve, csak a kontinens nyugati szélén, az óceán hatása alatt marad +2 °C közelében (7. ábra). Ugyanitt a Kárpát-medencében 4-6 °C-os a melegedés. Ha viszont a 10 és 90 %-os határokat nézzük, akkor ugyanitt csak 2-3 °C-os, illetve 7-9 °C-os lehet a változás. A csapadék esetében a térség nagy részén a medián csapadék-többletről tanúskodik. A Kárpát-medencében zérustól 40 %-ig terjed a változás. Az alsó 10 %-hoz tartozó megváltozások ugyanitt nullához közeli, míg délkeleten negatívak. Ugyanakkor a 90 %-os határ jellemzően 40-60 % csapadéknövekedés, míg egy pixelben 80 %-nál is több.

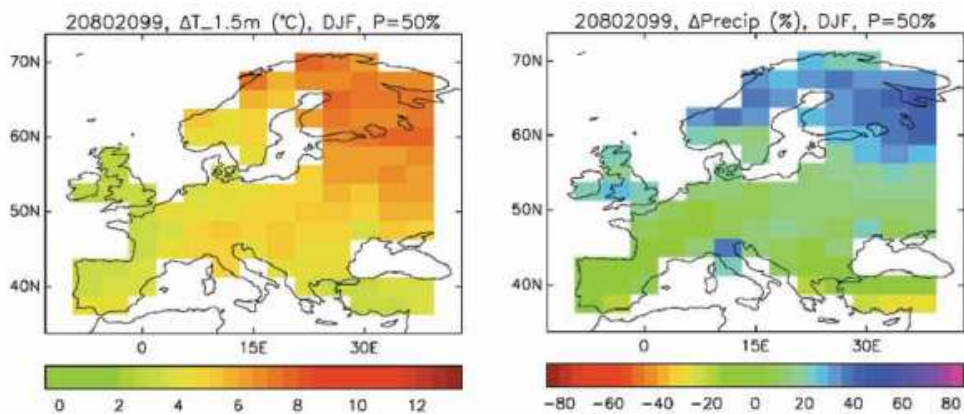
Rátérve a nyári változásokra (8. ábra), a hőmérsékletváltozás mediánja Európában a téli változás eloszlásával ellentétes értelmű, azt az észak-keleti térségek kivételével meghaladó melegedést mutat. A Kárpát-medencében a melegedés 6-7 °C, a decilis határok között már csak 2-3 °C, illetve 9-11 °C. A csapadék esetében a medián a kontinens nagyobb részén csökkenésre utal. Az alsó decilisnél ez még inkább egyértelmű, míg a felső decilist már inkább a növekedés uralja. A Kárpát-medencében az alsó decilis szerint 60-80 %-os csapadék-csökkenés, a felső decilisnél viszont 0-25 %-os növekedés a küszöbérték.

**2. táblázat.** Az Ensembles projekt 8háttér-modellje (oszlopok) és 15 beágyazott modellje (sorok), valamint az időszakok, amelyekre a számítások vonatkoztak. (van den Linden és Mitchell, 2009)

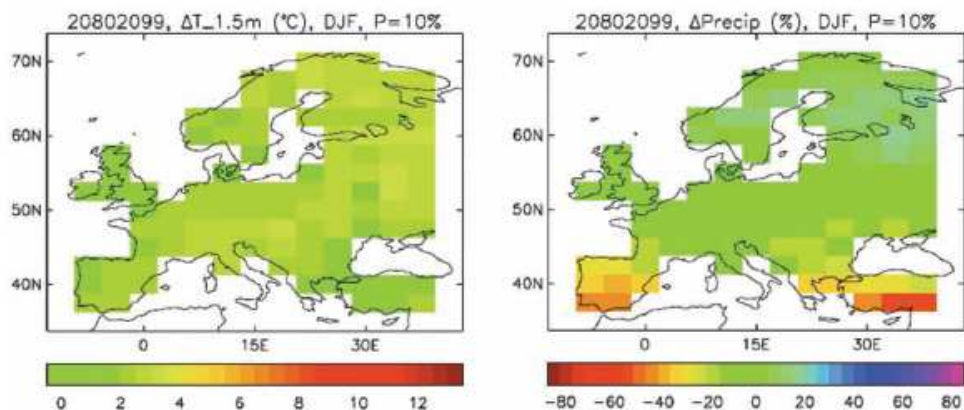
Table 5.1: The ENSEMBLES RCM simulations at 25 km resolution. Those simulations and institutions marked with an asterisk (\*) are outside of the contractual runs. For the METO-HC GCM, there are standard (std), low, and high sensitivity runs.

	GCM	ERA40	METO-HC, Std	METO-HC, Low	METO-HC, High	MPIMET	IPSL	CNRM	NERSC	CGCM3	Total
RCM											
METO-HC		1961-2002	1951-2100	1951-2100*	1951-2100*	1951-2100					4
HadRM											
MPIMET		1961-2002				1951-2100	1951-2050*				2
REMO											
CNRM		1961-2002						1951-2050			1
ALADIN											
DMI		1961-2002				1951-2100*		1951-2100	1951-2100*		3
HIRHAM											
ETH		1961-2002	1951-2100								1
CLM											
KNMI		1961-2002				1951-2100					1
RACMO											
ICTP		1961-2002				1951-2100					1
RegCM											
SMHI		1961-2002		1951-2100*		1951-2100*			1951-2100		3
RCA3											
UCLM		1961-2002	1951-2050	1951-2050							1
PROMES											
G4		1961-2002			1951-2100*	1951-2050*					2
RCA3											
GKSS		1961-2002					1951-2050*				1
CLM											
MetNo		1961-2002	1951-2050						1951-2050*		1
HIRHAM											
CHMI		1961-2002						1951-2050*			1
ALADIN											
OURANOS*		1961-2002								1951-2050*	1
CRCM											
EC*		1961-2002									
GEMLAM											
VMGO*			1951-2050*								1
VMGO											
Total			3	3	2	7	2	3	3	1	25

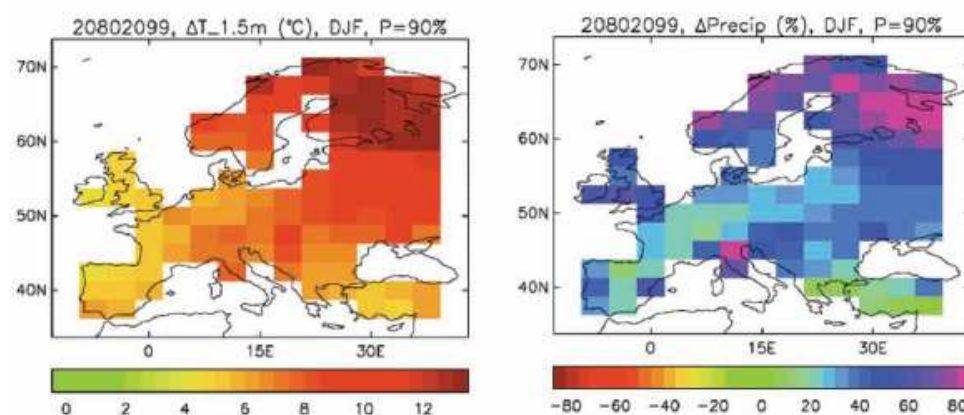
### MEDIÁN (50 % – a modellek alap-parametrizációi)



### ALSÓ DECILIS (90 % – minden bizonytalansággal)

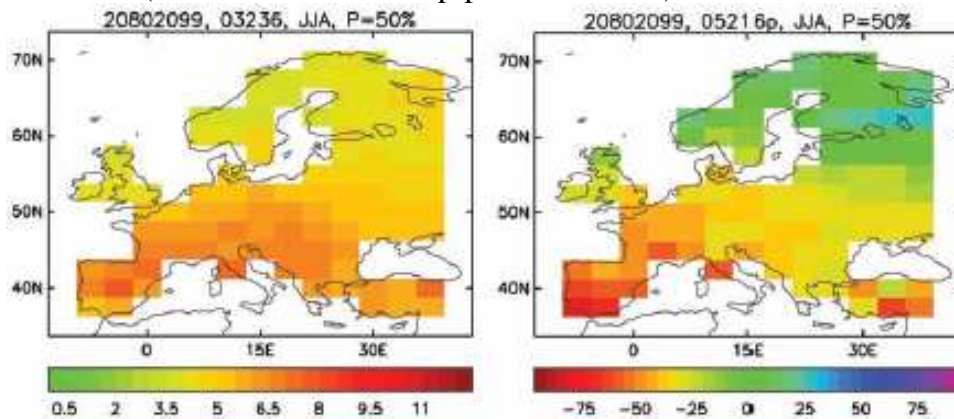


### FELSŐ DECILIS (90 % – minden bizonytalansággal)

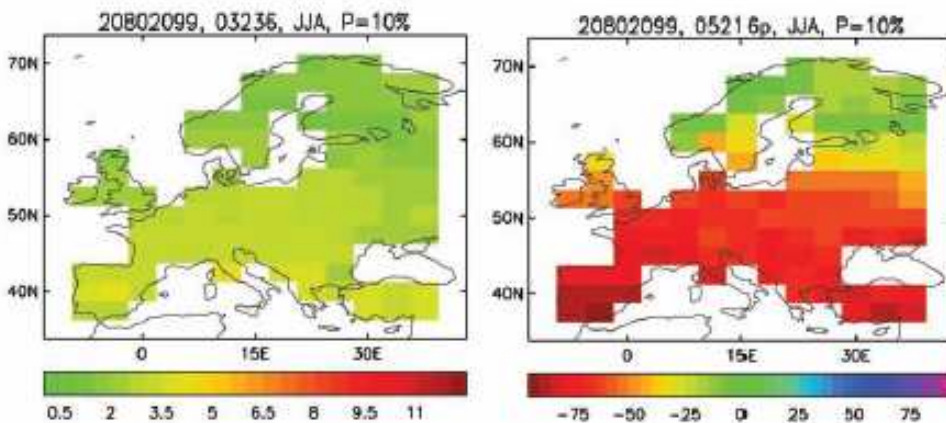


7. ábra. A hőmérséklet (balra, mindenütt pozitív előjellel) és a csapadék (jobbra, változó előjellel) megváltozása télen, az 1961-1990 évek átlagaihoz képest. Felül a medián (az eloszlás 50 %-a), azaz egy kézenfekvő középérték látható. Középen az alsó decilis (amelynél kisebb változásra csupán 10% eséllyel van kilátás, míg a legalsó ábra-pár a felső decilis, amelynél nagyobb fokú változás is csak 10 % eséllyel következik be 2080-2099 évek átlagában. (van den Linden és Mitchell, 2009)

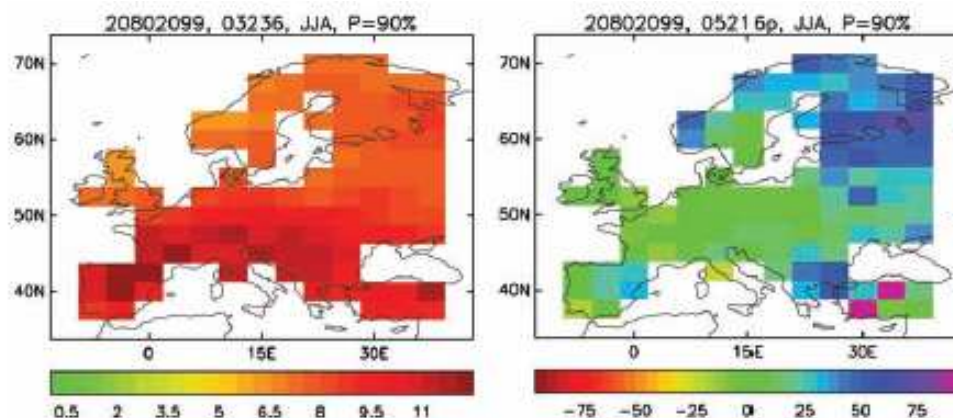
MEDIÁN (50 % – a modellek alap-parametrizációi)



ALSÓ DECILIS (90 % – minden bizonytalansággal)



FELSŐ DECILIS (90 % – minden bizonytalansággal)



**8. ábra.** A hőmérséklet (balra, mindenütt pozitív előjellel) és a csapadék (jobbra, változó előjellel) megváltozása nyáron, az 1961-1990 évek átlagaihoz képest. Felül a medián (az eloszlás 50 %-a), azaz egy kézenfekvő középérték látható. Középen az alsó decilis (amelynél kisebb változásra csupán 10% eséllyel van kilátás, míg a legalsó ábra-pár a felső decilis, amelynél nagyobb fokú változás is csak 10% eséllyel következik be 2080-2099 évek átlagában.

A fenti, szélső decilisek valószínűleg erőltetetten nagy különbségeket tükröznek. A beágyazott modellek mai parametrizációkkal futó változatai között bizonyára sokkal kisebb az eltérés. Ezekre kötetünk más dolgozatai utalnak, melyek kiválasztott modellek eredményeit mutatják be, ugyancsak az Ensembles projekt alapján.

### ***Következtetések***

Rövid hozzászólásunk írott változatának elején bemutattuk, hogy a légkör és az óceán között immár egyértelmű egyirányú hőátadás történik, aminek valószínű oka az üvegházhatás folyamatos erősödése, amit az éghajlati rendszer egyfelől a hőmérséklet emelkedése folytán erősödő felszíni kisugárzással, másrészt ennek a többlet-hőnek az óceánban elnyelésével ellensúlyoz, keresve az egyensúlyt a Nap állandó besugárzásával.

A további pontok tanúsága szerint, a globális melegedés hatására az évi hőmérséklet változásai Európa-szerte, s így a Kárpát-medencében is valamivel nagyobbak, mint a földi átlagos változás. Télen az igen hideg észak-kelet európai területek melegszenek a leggyorsabban, míg nyáron a mediterrán térség tágabb partvidéke. Az éves csapadékváltozás Európában megoszlik a többletet mutató észak- és a csökkenő hozamú dél-európai szektorok között. A téli változás csaknem egész Európában csapadék-többlet, míg nyáron igen magas szélességekig csapadék-csökkenés mutatkozik.

A légnyomás-mező változásainak bizonytalansága kapcsán rámutatunk, hogy a beágyazott modellekkel kapott eredmények erősen függenek az oldalsó határfeltételektől.

Végül, a beágyazott modellezés ma még meglévő bizonytalanságát illusztráltuk az ENSEMBLE Projekt 25 regionális modell-futtatása alapján, amelyek önmagukban, azaz átlagosan csak 1,7 db háttér-moddellel kapcsolva is igen széles sávban tárják elénk az évszakos hőmérséklet és csapadékváltozásokat. Ugyanakkor, a globális modellek átlagai és a regionális modellek mediánjai a Kárpát-medence térségében jól egyeznek.

### ***Irodalomjegyzék***

- IPCC, 2007: Climate Change 2007: WG-I, The Physical Science Basis. WG-II, Impacts, adaptation and vulnerability. WG-III, Mitigation of Climate Change <http://www.ipcc.ch>.
- IPCC-DÖ, 2007: Éghajlatváltozás 2007. Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület Negyedik Értékelő Jelentése Munkacsoportjainak Döntéshozói Összefoglalói. *KvVM-OMSZ, Budapest*. 1-88.
- Kiehl J. T., Trenberth K. E., 1997. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78:2, 197-208
- van der Linden P., and J.F.B. Mitchell (eds.) 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. *Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK*. 160pp. (<http://www.ensembles-eu.org>, 2009. 12.27)
- Uppala, S.M. AND 44 coauthors, 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012.doi:10.1256/qj.04.176
- Trenberth K.E., J. T. Fasullo J. K.,2009. Earth's Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90:3, 311-323
- Wigley, T.M.L. (2008): MAGICC/SCENGEN 5.3: *User Manual (version 2)* 1-81 pp.