



Az éghajlatváltozás hatásainak komplex vizsgálatát támogató információs rendszer fejlesztése

Szépszó Gabriella, Allaga-Zsebeházi Gabriella, Bordi Sára, Megyeri-Korotaj Otília, Schuchné Bán Beatrix, Zempléni Zsuzsanna

HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt., szépszo.g@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2024.K.4

A magyar meteorológiai szolgálat több forrásra támaszkodik a következő évtizedekben várható éghajlatváltozással kapcsolatos információ-igény kielégítésére. Az elmúlt években megújult az intézmény ALADIN-Climate és REMO regionális modelleken alapuló 10 km-es felbontású klímaprojekció-együttese, továbbá a EURO-CORDEX adatbázisból kiválasztott regionális szimulációs eredmények feldolgozása is bővül. Megkezdődött a lokális jelenségek vizsgálata nem-hidrosztatikus klímamodellekkel, s folytatódott a klímaváltozás városi hatásainak feltérképezése az 1 km-es felbontású SURFEX felszíni modellel. A hazai mérési és szimulációs adatok alapján elkészült a KLIMADAT adatbázis, ami Magyarországra 10 km-es, Budapestre 1 km-es felbontással tartalmaz éghajlati információkat 2100-ig. A meteorológiai szolgálat éghajlati szolgáltatásokkal kapcsolatos stratégiájának részeként az adatbázis adatokat és információt nyújt a klímaváltozás hatásaihoz való alkalmazkodás számára, s a folyamatosan köré épülő keretrendszerben fontos eleme a témával kapcsolatos tájékoztatásnak is.

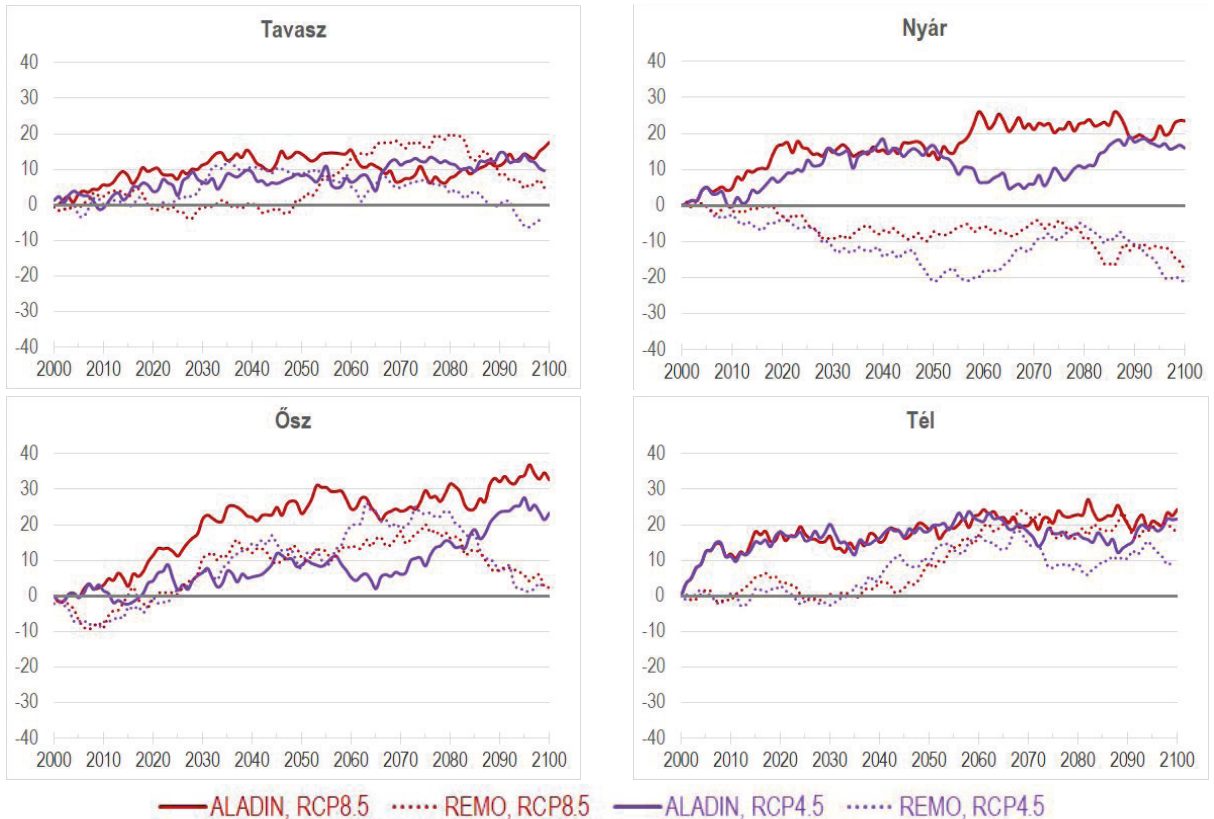
Development of an information system supporting the complex examination of the effects of climate change

The Hungarian meteorological service satisfies the information need on future climate change from multiple sources. The 10 km resolution climate projections based on the in-house simulations of the ALADIN-Climate and REMO regional climate models (RCM) as well as the EURO-CORDEX RCM results have been updated in the last few years. Local climate phenomena have been studied using non-hydrostatic climate models, while urban climate impacts have been explored with the SURFEX surface model at 1 km resolution. The KLIMADAT database is established based on measurement and simulation data over Hungary and it provides climate information covering the country with 10 km resolution until 2100 with a more detailed focus on Budapest at 1 km resolution. In the framework of climate service strategy of the meteorological service, the database supports climate adaptation and related communication.

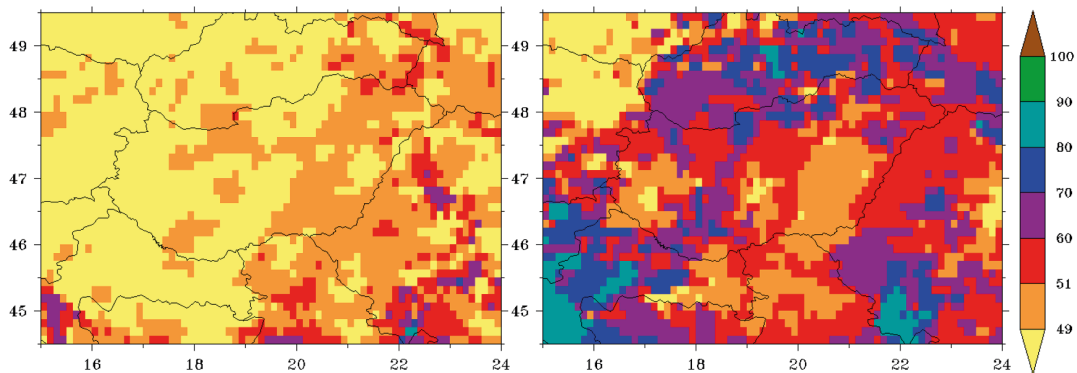
Az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás információt igényel a változások meteorológiai vonatkozásairól. Az elmúlt évtizedekben tapasztalt tendenciákat a mérési adatsorok, a jövőben várható változásokat pedig a modellezés eszközeivel tanulmányozhatjuk. Az éghajlati rendszer kormányzó folyamatait leíró matematikai egyenletrendszer közelítő megoldására a tartományt egy háromdimenziós ráccsal fedjük le, s ennek rácspontjaiban írjuk le a meteorológiai állapotváltozások időbeli megváltozását, a ráctávolságnál kisebb skálájú folyamatok hatását ún. parametrizációk alkalmazásával figyelembe véve. A fizikai és az antropogén folyamatok közelítő leírásából eredő bizonytalanságokat több modellkísérlet eredményeinek együttes vizsgálatával jelenítjük meg. A modellszimulációk térbeli és időbeli felbontása, a bennük reprezentált folyamatok nagyban meghatározzák, hogy az eredményeiket milyen célokra lehet alkalmazni. A cikkben bemutatjuk a magyar meteorológiai szolgálatnál a Kárpát-medencében várható éghajlatváltozás vizsgálatára használt különböző modelleket, betekintést nyújtunk az eredményekbe, azok felhasználásába, valamint a folyamatban lévő fejlesztésekbe.

Regionális modellszimulációk

A jövőben várható éghajlatváltozás részleteinek feltárására regionális éghajlati modelleket használunk, amelyek segítségével egy kiválasztott területre 10–50 km-es rácsfelbontás alkalmazásával pontosíthatjuk a globális klímamodellekből származó nagyskálájú információkat. A magyarországi változások vizsgálatára a meteorológiai szolgálatnál két regionális modellel készítünk szimulációkat: az időjárás-előrejelzésben is használt, nemzetközi együttműködésben fejlesztett ALADIN modell klímaváltoztatával (Bán et al., 2021), illetve a hamburgi Max Planck Intézetben kifejlesztett REMO modellel (Szépszó, 2014). Az elmúlt években 4 projekciós kísérletet hajtottunk végre a modellekkel egy Közép- és Kelet-Európát 10 km-es felbontással lefedő tartományon. A tartományon kívül zajló folyamatok leírását a CNRM-CM5 és az MPI-ESM-LR Föld-rendszer modellek ALADIN-Climate-tel illetve REMO-val 50 km-es felbontással leskálázott eredményei adták, egy-egy közepes és magas antropogén üvegházgáz kibocsátást feltételező (RCP4.5 és RCP8.5; Moss et al., 2010) forgatókönyv alkalmazásával.



1. ábra. A magyarországi átlagos évszakos csapadékösszeg változása (%) az 1971–2000 időszak átlagához képest nagy modellszimuláció 30-éves mozgóátlaga alapján.



2. ábra. Az 1971–2000 időszak átlagához viszonyítva 2071–2100-ra várható nyári csapadékcsökkenés valószínűsége (%) 12 modellszimuláció alapján az RCP4.5 (bal) és RCP8.5 (jobb) forgatókönyvek alkalmazásával.

Az eredmények (Megyeri-Korotaj et al., 2022) alapján Magyarországon 2071–2100-ra országos átlagban 1,6 és 4 °C közötti éves átlaghőmérséklet emelkedésre számíthatunk az 1971–2000 időszak átlagához képest. A legnagyobb változások nyárra és télre várhatók, s az évszázad második felében egyértelműen megmutatkozik a különböző forgatókönyvek hatása: minden évszakban a nagyobb növekedést az RCP8.5 forgatókönyvvel készített kísérletek adják. A néhány fokal hőmérséklet-emelkedés jelentős változásokat eredményezhet a ritkán előforduló, szélsőséges események gyakoriságában. A hóhullámos napok száma például az évszázad végére 6–27 nappal megemelkedhet, miközben a 0 °C alatti minimumhőmérsékletű, fagyos napok előfordulása egyes tájakon akár 90%-kal is csökkenhet.

A projekciók a nyár kivételével minden évszakban a magyarországi csapadék növekedését valószínűsítik, s ezt tavasszal és ősszel a 10 mm-t meghaladó csapadékösszegű napok gyakoribbá és a száraz időszakok hosszabbá válása kíséri. Nyárra két modellszimuláció a csapadékösszeg országos átlagában mintegy 20%-os növekedést, kettő pedig hasonló mértékű csökkenést vetít előre az évszázad végére (1. ábra). A forgatókönyv megválasztásának a magyarországi csapadék esetében nem mutatkozik hatása a változás irányára, a projekciók bizonytalansága a csapadékképződéssel kapcsolatos folyamatok eltérő leírásából ered.

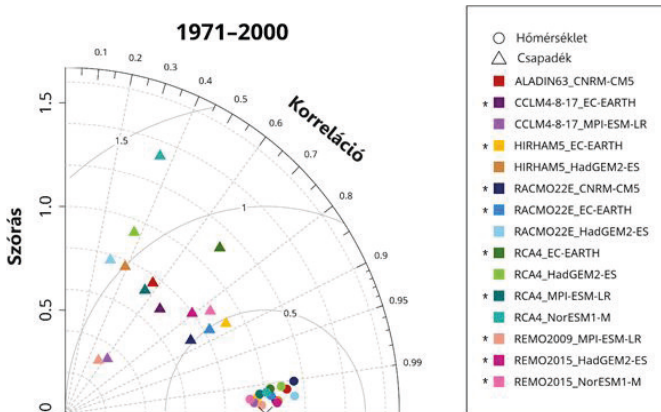
Európai klímamodell eredmények vizsgálata

A 4-tagú szimuláció-együttes alapfokú információt ad a projekciók forgatókönyv- és modellválasztásból eredő bizonytalanságáról. Ugyanakkor, ahogyan az 1. ábra is illusztrálja, nem elegendő ahhoz, hogy kizárólagos alkalmazásával teljeskörűen feltérképezzük például a klímaváltozás hazai csapadékviszonyokra

gyakorolt hatását. Ezért a saját szimulációink mellett figyelembe vesszük az európai éghajlatkutató intézetek regionális klímamodell eredményeit is. Ehhez jó alapot szolgáltat a World Climate Research Programme által 2009-ben kezdeményezett CORDEX együttműködés Európára koncentráló ága. A EURO-CORDEX együttműködésben (Jacob et al., 2013) 10–50 km-es felbontással készülnek szimulációk a kontinensre az RCP antropogén forgatókönyvek felhasználásával.

Az elmúlt években 24 projekciót választottunk ki, melyek a globális és regionális modellek 12 kombinációjával készültek az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek alkalmazásával. Ezek az eredmények árnyalják vagy kiegészítik a hazai eredményeket: például ahogyan azt a 2. ábra mutatja, Magyarország nyugati tájain az évszázad végére a nyári csapadék csökkenése valószínűbb a magasabb antropogén kibocsátás következtében.

Időközben az általunk feldolgozott együttesben szereplő szimulációkból többet is újrafuttattak fejlettebb modellváltozatokkal vagy beállításokkal, egy esetben pedig a felfedezett hibák miatt nem ajánlották annak további használatát. Emiatt szükségesnek tartottuk a korábbi eredményeink frissítését a rendelkezésünkre álló új adatok felhasználásával. Ezúttal az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek mellett az RCP2.6 kibocsátási szcenáriót is vizsgáljuk, amely azokról a változásokról ad információt, ami a légköri szén-dioxid koncentráció csökkentése mellett valószínűleg megvalósulna. A globális és regionális modellek 15 kombinációjával készült kísérletek 12 km-es felbontású adatait töltöttük le, s megvizsgáltuk, hogyan teljesítettek az 1971–2000 időszakon. A validációhoz a magyar meteorológiai szolgálatnál előállított, homogenizált és rácsra interpolált HuClim (Izsák et al., 2022) éghajlati adatsort használtuk. A modellkísérleteket a napi csapadékösszeg, valamint az átlag-, maximum- és minimumhőmérséklet, és az ezekből származtatott éghajlati



3. ábra. A modellszimulációk Taylor-diagramjai az 1971-2000 időszakra vonatkozó magyarországi havi átlaghőmérséklet és csapadékösszeg alapján. A Taylor-diagram 3 mérőszámot mutat egyszerre: a korrelációt (függőleges tengellyel bezárt szög), a referenciaértékkel normált szórását (origó körüli koncentrikus körök) valamint a szintén normált centralizált átlagos négyzetes hibát (X-jel körüli koncentrikus körök). Optimális esetben a modellszimulációkat jelölő szimbólumok az X pont közelében helyezkednek el. A csillaggal megjelölt 9 modellkombináció eredményeit a projekciós vizsgálatokhoz is felhasználjuk.

indexek éves menete, évszakos és havi átlagai, hibái, korreláció- és szórásértékei alapján rangsoroltuk. (A 3. ábrán a modellszimulációk átlaghőmérséklet és csapadék adatainak statisztikai jellemzői láthatók, Taylor-diagram formájában megjelenítve.) Ez alapján összesen 9 modellszimulációt választottunk ki, amit felhasználunk a 2041–2070 és 2071–2100 időszakokra vonatkozó projekciós vizsgálatokhoz.

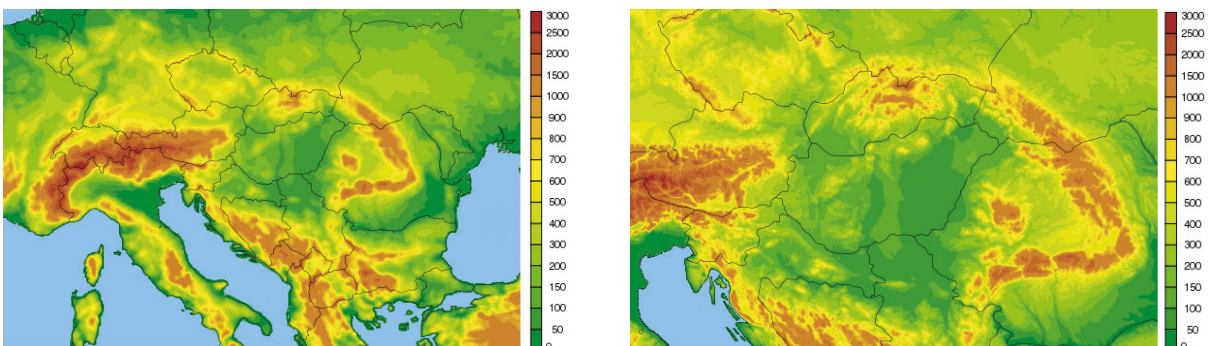
A lokális jelenségnek vizsgálata

Bár az EURO-CORDEX regionális modellszimulációi részletes képet adnak az Európában várható változásokról, a hozzávetőlegesen 10 km-es rácsfelbontás még mindig nem elegendő a kisebb méretskálájú, lokális jelenségek, pl. az intenzív csapadék-

események részletes leírásához. Ezek a folyamatok olyan néhány km-es felbontású, nem-hidrosztatikus modellek segítségével tanulmányozhatók, melyekben a mélykonvekciót nem parametrizáció útján, hanem a rácsponthoz közeli mélykonvekció segítségével írják le. Számos vizsgálat (pl. *Ban et al., 2021; Lind et al., 2023*) igazolta, hogy ezek a modellek részletesebben és pontosabban írják le a csapadék mennyiségét, intenzitását, napon belüli menetét, területi eloszlását, illetve a rövid idő alatt nagy mennyiségű csapadékkal járó eseményeket.

Ebből a célból kezdtük meg 2023-ban a HARMONIE-Climate (HCLIM) éghajlati modell adaptálását. A modell az ACCORD (A Consortium for CONvection-scale modelling Research and Development) mezoskálájú rövidtávú modellfejlesztő konzorcium modelljeire és keretrendszerére (*Bengtsson et al., 2017; Termonia et al., 2018*) épül, s két fő konfigurációban futtatható (*Belušić et al., 2020*): a HCLIM-AROME az AROME nem-hidrosztatikus időjárás-előrejelző modell parametrizációin és dinamikáján alapul, míg a hidrosztatikus HCLIM-ALADIN az ARPEGE hidrosztatikus globális modell korlátos tartományú változata. Vizsgálatainkhoz a HCLIM 43-as verzióját (HCLIM43) választottuk, mely még kiértékelés alatt áll, ezáltal eredményeinkkel hozzájárulhatunk ennek folyamatához.

A HCLIM43-ALADIN és HCLIM43-AROME konfigurációval elsőként két rövid tesztkísérlet végzünk: (1) egy hidrosztatikus modellfuttatást 10 km-es felbontáson és 65 szinten az ALADIN-Climate regionális klímamodellünk tartományával megegyező területre, illetve (2) egy nem-hidrosztatikus modellfuttatást 2,5 km-es felbontáson és 65 szinten az operatív AROME előrejelző modellünk tartományával megegyező területre (4. ábra). Az integrálási időlépcső az első esetben 360, míg a második esetben 60 másodperc, az 1 évre szóló modellfuttatás várhatóan 1, illetve 7 napot fog igénybe venni a HungaroMet szuperszámítógépén. Az oldalsó peremfeltételeket a kb. 30 km-es horizontális



4. ábra. A HCLIM regionális éghajlati modell 240x160 rácsponthoz álló 10 km-es (balra) és 500x320 rácsponthoz álló 2,5 km-es (jobbra) horizontális felbontású tesztkísérleteinek tartománya és domborzata.

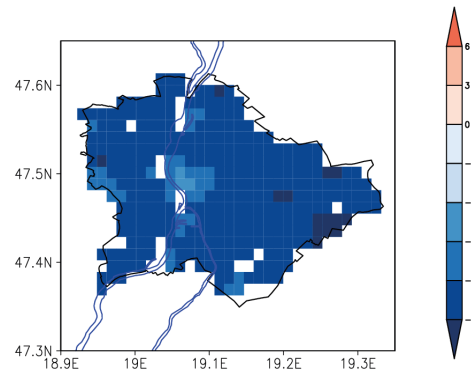
felbontású ERA5 adatbázis (Hersbach et al., 2020) 3-óránkénti reanalízisei szolgáltatják. A felszíni folyamatok leírása a SURFEX (Surface Externalisécé) csatolt felszíni modellel történik.

A tesztek először egy-egy múltbeli évre tervezzük futtatni, melynek célja, hogy az előállt eredményeket összehasonlítsuk az ALADIN-Climate 10 km-es felbontású eredményeivel, majd megvizsgáljuk a felbontásnövelés és az eltérő fizikai csomag hatását. Ezt érzékenységi vizsgálatok követik majd az optimális tartomány és felbontás megválasztására, amihez a rendelkezésre álló számítási kapacitást is figyelembe vesszük. Ezután következhet a finomfelbontású modell részletes validációja egy többéves időszakon, illetve később projekciók készítése.

A klímaváltozás városi jellemzőinek vizsgálata

A jelenlegi regionális klímaszimulációk nem adnak részletes információt a városi éghajlat várható alakulásáról. Ennek oka egyrészt az, hogy a tipikusan 10 km-es horizontális felbontásuk nem elegendő a heterogén városi felszínborítás kialakította lokális éghajlat leírására, másrészt az, hogy a regionális klímamodellek többnyire egyszerű közelítéssel írják le a városi felszín és a légkör közötti kölcsönhatásokat. A városi légkört jellemző fizikai folyamatokat is tartalmazó felszíni modellek költséghatékony eszközök jelentenek lokális éghajlati projekciók készítésére. Erre a feladatra a SURFEX felszíni modellt alkalmazzuk, melyben a városi folyamatokat a TEB (Town Energy Balance; Masson, 2000) parametrizációs séma írja le.

Ezzel a felszíni modellel készültek el a 21. századra vonatkozó projekciók 1 km-es horizontális felbontással Budapest és Szeged városokra. A SURFEX által kezelt néhány 10 méteres réteg feletti meteorológiai viszonyokat az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei írták le, a forgatókönyvekből adódó bizonytalanságot pedig az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriókon keresztül vettük figyelembe (Allaga-Zsebeházi, 2021). A szimulációs eredmények alapján a városkörnyéki természetes területek fokozottabb melegezése miatt a város hőmérsékletnövekedése (azaz az ún. városi hősziget-intenzitás mértéke) a jövőben gyengülhet. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a városi lakosság a jövőben ne lenne fokozottan kitéve az éghajlatváltozásnak, hiszen például azon éjszakák száma, amikor a minimumhőmérséklet nem süllyed 20 °C alá, Budapesten már az évszázad közepére 2–2,5-szeresére növekedhet az 1971–2000 időszakhoz képest.



5. ábra. Az útfelszín átlagos augusztusi maximális napi hőmérsékletének eltérése az albedó növelése után a változtatás nélküli referencia szimuláció megfelelő értékétől a 2046–2055 időszakon, RCP8.5 forgatókönyv alapján.

A SURFEX-szel érzékenységvizsgálatokat is végzünk különböző klímaadaptációs lehetőségek vizsgálatára. Például a modell segítségével vizsgáljuk Budapesten a tetők és az utak napsugárzás visszaverő képessége (azaz az albedó) változtatásának hatását a felszíni, illetve a felszínközeli léghőmérsékletre. Egy 10 éves időszakon az utakra a SURFEX modellben alapértelmezetten használt 0,08 értékű albedót 0,58-ra emeltük, amely közelítőleg a gránit és a beton albedójának felel meg. A legnagyobb hatást az utak maximális felszíni hőmérsékletében tapasztaltuk: a nyári hónapokban a belváros kivételével kiterjedt területen 12–15 °C-os csökkenés volt elérhető (5. ábra). A belvárosban a csökkenés ennél kisebb, 7–9 °C mértékű. Ennek oka, hogy a belvárost a modell nagyobb épületmagassággal és szűkebb utcákkal jellemzi, így az utak jobban árnyékolnak, és kevésbé tud érvényesülni az albedó növelésének a hatása. A felszíni hőmérsékletben ilyen módon elérhető csökkenés fontos például a kötőtpályás közlekedési rendszerek szempontjából.

Az éghajlati információk felhasználása

Az éghajlatváltozás hatásai érintik a természeti környezetet és számos szektort. A felkészüléshez a meteorológiai változások különböző területekre kifejtett hatásait célzott és objektív vizsgálatokkal mérik fel, s ezek eredményei beépül(het)nek az alkalmazkodással kapcsolatos stratégiai döntéshozatalba. Az éghajlati információkat célszerű olyan rendszerbe szervezni, amely az alkalmazkodás különböző szereplői számára hozzáférhető és értelmezhető. A HungaroMetnél fejlesztés alatt áll egy olyan portál, ami egy helyre gyűjti a szakemberek által megbízhatónak tartott éghajlati

adatokat, ezek felhasználóbarát elérhetővé tételével szolgálja a hatások számszerű vizsgálatát, éghajlati információkra épülő szolgáltatásokat közvetít, továbbá felületet biztosít a klímaváltozással kapcsolatos tudományos alapú ismeretterjesztésnek és tájékoztatásnak.

A tervezés alatt álló éghajlati portál egyik fontos alapját nyújtja az elmúlt években kialakított KLIMADAT alkalmazás. Ebben a klimadat.met.hu címen keresztül hazai mérési és a cikkben bemutatott szimulációs adatokból (a cikk készítésének időpontjában az ALADIN-Climate, a REMO és a SURFEX eredményeiből) számított hőmérsékleti és csapadék indikátorok kérdezhetők le, jeleníthetők meg és tölthetők le Magyarország területére. Az alkalmazás segítségével 30-éves időszakokat tudunk kiválasztani, s azokat 10 évenként tudjuk léptetni 1971 és 2100 között. Az 1971–2000, 1981–2010 és 1991–2020 időszakokra vonatkozó információk a magyarországi állomási mérések homogenizációjával és egy 0,1-fokos felbontású horizontális rácsra való interpolációjával álltak elő. A 2001–2030-tól 2071–2100-ig terjedő időszakokra négy regionális klímamodell-szimuláció eredményein alapuló információk jeleníthetők meg. Az alkalmazás egyik különlegességét adják a részletesebb városi hőmérsékleti információk, melyek elsőként Budapestre érhetőek el, s a mérések és a két 0,01-fokos

felbontású SURFEX városi szimuláció eredményeinek kombinálásával készültek. Az adatok többféle területi lehatárolásban jeleníthetők meg: Magyarországra lehetőség van a regionális információk megyei és járási átlagok formájában való megtekintésére is, míg Budapestre rácsponti információkat vagy kerületekre kiszámított átlagértékeket kérhetünk le. A projekciók bizonytalanságának számszerűsítését speciális megjelenítési formák támogatják. A kvantilis típusú megjelenítéssel az adatbázisban lévő modellszimulációk eredményei alapján az adott változó várható értékének minimumát, maximumát vagy mediánját tudjuk megtekinteni. A valószínűségi térképek arról adnak információt, mennyi a valószínűsége az adatbázisban elérhető modellszimulációk eredményei alapján, hogy az adott indikátor jövőbeli megváltozása meghalad egy küszöbértéket. (A 6. ábra a napi minimumhőmérséklet júliusi jellemzőire mutat be néhány példát.) A térképek és az azokon szereplő adatok elmenthetők és további feldolgozások végezhetőek rajtuk például más térinformatikai rendszerekben.

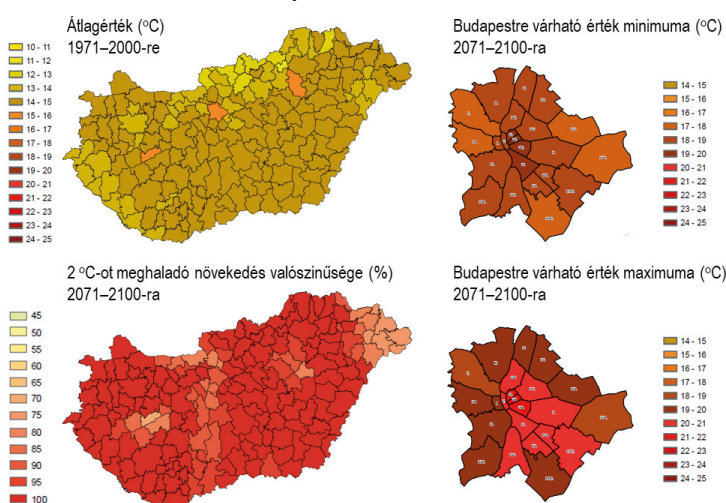
Összefoglalás

A társadalmi és gazdasági fejlődés egy feltételezett pályájának hatását az éghajlatunkra a modellezés segítségével vizsgálhatjuk. A magyar meteorológiai szolgálatnál az éghajlati modellek széles skáláját használjuk a térségünkben várható változások feltérképezésére. A nyers adatokból kiszámított hőmérsékleti és csapadék indikátorok számos szakterület számára nyújtanak kiindulási információt az éghajlatváltozás további hatásainak vizsgálatához és az ezzel kapcsolatos tervezéshez. A háttérre adó adatbázis fejlesztése folyamatos: mind a regionális, mind a városi projekciókat bővítjük és frissítjük a legújabb modelledményekkel; megkezdjük az első km-es térskálájú regionális szimulációkat; a városi hatások vizsgálatát több magyarországi városra is kiterjesztjük; további indikátorokkal és speciális megjelenítési eszközökkel támogatjuk a várható változások és azok bizonytalanságának számszerűsítését. Az ezekre épülő KLIMADAT alkalmazás lényeges eleme a meteorológiai szolgálat éghajlatváltozási szolgáltatásainak és az azzal kapcsolatos tájékoztatásnak.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott fejlesztések és vizsgálatok az EEA-C13-10 számú (RCMTÉR), a KEHOP-1.1.0-15-2015-00001 számú (KlimAdat), a LIFE20 CCA/HU/001774 számú (Városi Eső), illetve a Széchenyi Terv Plusz

Júliusi napi minimumhőmérséklet



6. ábra. Bal felső panel: A napi minimumhőmérséklet júliusi átlagértéke (°C) a magyarországi járásokra 1971–2000-ben mérések alapján; bal alsó panel: annak valószínűsége (%) 4 regionális klímamodell-szimuláció eredményei alapján, hogy a napi minimumhőmérséklet júliusban 2 °C-ot meghaladó mértékben növekszik 2071–2100-ra az 1971–2000 időszakhoz képest; jobb felső/alsó panel: a napi minimumhőmérséklet 2 városi modellszimuláció eredményei alapján 2071–2100-ra várható legkisebb/legnagyobb júliusi értéke (°C) Budapest kerületeire.

program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú (Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium) projektek támogatásával valósultak meg.

Irodalomjegyzék

- Allaga-Zsebeházi, G. 2021: Az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel készített SURFEX városi éghajlatváltozási kísérletek kiértékelése. KlimAdat projekt beszámoló. https://www.met.hu/klimadat/doc/reports/KLIMADAT_beszamolo_Allaga-Zsebehazi_202112.pdf
- Ban, N., Caillaud, C., Coppola, E., Pichelli, E., Sobolowski, S., Adinolfi, M., Ahrens, B., Alias, A., Anders, I., Bastin, S., Belušić, D., Berthou, S., Brisson, E., Cardoso, R. M., Chan, S. C., Christensen, O. B., Fernández, J., Fita, L., Frisius, T., Gašparac, G., Giorgi, F., Goergen, K., Haugen, J. E., Hodnebrog, Ø., Kartsios, S., Katragkou, E., Kendon, E. J., Keuler, K., Lavin-Gullon, A., Lenderink, G., Leutwyler, S., Lorenz, T., Maraun, D., Mercogliano, P., Milovac, J., Panitz, H.-J., Raffà, M., Remedio, A. R., Schär, C., Soares, P. M. M., Srnec, L., Steensen, B. M., Stocchi, P., Tölle, M.H., Truhetz, H., Vergara-Temprado, J., de Vries, H., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V., and Zander, M.J., 2021: The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: evaluation of precipitation. *Climate Dynam.* 57, 275–302. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>
- Bán, B., Szépszó, G., Allaga-Zsebeházi, G., and Somot, S., 2021: ALADIN-Climate at the Hungarian Meteorological Service: from the beginnings to the present day's results. *Időjárás* 125, 647–673. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.4.6>
- Belušić, D., de Vries, H., Dobler, A., Landgren, O., Lind, P., Lindstedt, D., Pedersen, R. A., Sánchez-Perrino, J. C., Toivonen, E., van Ulft, B., Wang, F., Andrae, U., Batrak, Y., Kjellström, E., Lenderink, G., Nikulin, G., Pietikäinen, J.-P., Rodriguez-Camino, E., Samuelsson, P., van Meijgaard, E., and Wu, M., 2020: HCLIM38: a flexible regional climate model applicable for different climate zones from coarse to convection-permitting scales. *Geosci. Model Dev.* 13, 1311–1333. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1311-2020>
- Bengtsson, L., Andrae, U., Aspelien, T., Batrak, Y., Calvo, J., de Rooy, W., Gleeson, E., Hansen-Sass, B., Homleid, M., Hortal, M., Ivarsson, K.-I., Lenderink, G., Niemela, S., Nielsen, P. K., Onville, J., Rontu, L., Samuelsson, P., Santos Munoz, D., Subias, A., Tijn, S., Toll, V., Yang, X., and Költzow, M.Ø., 2017: The HARMONIE–AROME Model Configuration in the ALADIN–HIRLAM NWP System. *Mon. Weather Rev.* 145, 1919–1935. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0417.1>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépau, J.-N., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Izsák, B., Szentimrey, T., Lakatos, M., Pongrácz, R., and Szentés, O., 2022: Creation of a representative climatological database for Hungary from 1870 to 2020. *Időjárás* 126, 1–26. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2022.1.1>
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preussmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., and Yiou, P., 2013: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, Springer Berlin Heidelberg, 1–16.
- Le Moigne, P., Albergel, C., Boone, A., Belamari, S., Decharme, B., Dumont, M., Masson, V., 2018: SURFEX V8.1 main scientific documentation. https://www.umr-cnrm.fr/surfex/IMG/pdf/surfex_scidoc_v8.1.pdf
- Lind, P., Belušić, B., Médus, E., Dobler, A., Pedersen, R. A., Wang, F., Matte, D., Kjellström, E., Landgren, O., Lindstedt, D., Christensen O. B., Christensen, J. H., 2023: Climate change information over Fennoscandinavia produced with a convection-permitting climate model. *Clim. Dynam.* 61, 519–541 <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06589-3>
- Masson, V. 2000: A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Bound.-Lay. Meteorol.* 94, 357–397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>
- Megyeri-Korotaj O., Bán B., and Suga R., 2022: A REMO2015 és az ALADIN5.2 regionális klímamodellek projekciós eredményeinek közös kiértékelése. KlimAdat projekt beszámoló. https://www.met.hu/klimadat/doc/reports/KLIMADAT_beszamolo_Megyeri-Korotaj_et_al_202203.pdf
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Szépszó G., 2014: A REMO regionális éghajlati modellen alapuló klímadinamikai vizsgálatok a Kárpát-medence éghajlatának jellemzésére. Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földtudományi Doktori Iskola, Földrajz–Meteorológia Program. https://teo.elte.hu/minosites/ertekezes2014/szepszo_g.pdf
- Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouysse, F., Brožková, R., Bénard, P., Bochenek, B., Degrauwe, D., Derková, M., El Khatib, R., Hamdi, R., Mašek, J., Pottier, P., Pristov, N., Seity, Y., Smolík, P., Španiel, O., Tudor, M., Wang, Y., Wittmann, C., and Joly, A., 2018: The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geosci. Model Dev.* 11, 257–281. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018>