

A FELSŐ-TISZA VÍZGYŰJTŐ VIZSGÁLATA ÉGHAJLATI ÉS HIDROLÓGIAI SZIMULÁCIÓK ALKALMAZÁSÁVAL

ANALYSIS OF THE UPPER-TISZA CATCHMENT USING CLIMATOLOGICAL AND HYDROLOGICAL SIMULATIONS

Kis Anna¹, Pongrácz Rita^{1,2}, Bartholy Judit^{1,2}, Szabó János Adolf³

¹ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A., ²ELTE Természettudományi Kar Kiválósági Tudásközpont, 2462 Martonvásár, Brunszvik utca 2., ³HYDROInform Bt., 1021 Budapest, Hűvösvölgyi út 54.
kisanna@nimbus.elte.hu, prita@nimbus.elte.hu, bartholy@caesar.elte.hu, janos.szabo@hydroinform.hu

Összefoglaló. A Felső-Tisza vízgyűjtőjét vizsgáljuk éghajlati és hidrológiai szimulációk alapján az 1971–2000 referencia időszakra, majd a XXI. század végére vonatkozóan. Eddigi eredményeink alapján a jövőbeli várható melegedés és a csapadék éven belüli eloszlásának megváltozása miatt az éves lefolyás-karakterisztikák változása valószínűsíthető a vizsgált céletterületen.

Abstract. The Upper-Tisza catchment is analysed for the 1971–2000 reference period and the end of the 21st century using climatological and hydrological simulations. According to our results, a change of the yearly average runoff is projected for the target area in the future due to the expected warming and the estimated change of the annual distribution of precipitation.

Bevezetés. A víz túlzott többlete, illetve időszaki hiánya egyaránt komoly problémákat okozhat társadalmi-gazdasági rendszerünkben és a természetes ökoszisztémákban is. Az átlagosnál több lefolyó víztömeg árvizeket, villámárvizeket, belvizeket; míg az átlagosnál kevesebb aszályt, ivóvízhiányt, hajózhatósági nehézségeket idézhet elő. A 2003-as európai aszály például összességében mintegy 30%-os csökkenést eredményezett a nettó primer produkcióban, amely aztán a légköri CO₂ koncentráció emelkedéséhez vezetett, ezzel is tovább fokozva a felmelegedést (Ciais et al., 2005). 2007 is egy különösen száraz év volt Európa-szerte; Magyarországon a kukorica átlagosnál alacsonyabb terméshozama közel 80 milliárd forintnyi veszteséget okozott (Faragó et al., 2010). Megfelelő felkészüléssel azonban ezek a károk jelentősen csökkenthetők. Például vízátervezést biztosító rendszerekkel, öntözéses gazdálkodással lehetőségünk van a potenciális aszálykárok enyhítésére. Az időről időre bekövetkező száraz időszakok mellett 1900 óta több mint 30 olyan árvízi esemény fordult elő világszerte, amely egymillió dollárt meghaladó összegű anyagi kárt okozott, illetve legalább ezer halálos áldozatot követelt. Az ártereken való terjeszkedés, a földhasználat változása, valamint az éghajlatváltozás miatt az árvíz kockázat és a sérülékenység több térségben is megnövekedett az elmúlt években, és ennek további fokozódása várható a jövőben (Kundewicz et al., 2005). Napjainkban számos árvízvédelmi módszer áll rendelkezésre a potenciális károk megelőzésének céljából. Ilyenek például: gátak, mobilgátak, ideiglenes védelmi létesítmények, szükségtározók kiépítése; árvízvédelmi töltések létesítése vagy magasítása; hullámtér növelése; folyómeder mélyítése, kotrása.

A lehetséges károk, veszteségek mérséklésének, minimalizálásának érdekében azonban nem elég a technikai megoldások megléte; a jövőben várható vízkészlet-eloszlások becslése is elengedhetetlen feltétele a sikeres védekezésnek. Tanulmányunkban a XX. és a XXI. század végére vonatkozóan vizsgáljuk éghajlati és hidrológiai szimulációk alapján a Felső-Tisza vízgyűjtőjét, amely hazánk egyik kiemelten fontos területe árvízvédelmi szempontból. Az elmúlt években több nagyobb árvíz is volt e területen: 1995 decemberében, 1998 novemberében, 1999 márciusában, 2000 áprilisában és 2001 márciusában (Konecsny, 2006). Ez utóbbi esetben különösen magas

vízállás értékek fordultak elő, amely több meghatározó tényező (~130 mm csapadék három nap alatt; jelentős hőmérsékletemelkedés, gyors hóolvadás) egybeesésével magyarázható (Konecsny, 2003) – ez is mutatja, hogy egy különösen összetett problémával állunk szemben. Ugyanakkor 2015-ben egy rendkívül száraz időszak okozott gondot a területen: február és április között az átlagosnál kevesebb csapadék hullott és a talajvíz utánpótlás sem volt jelentős a 2013 óta tartó hófelhalmozódás hiánya miatt (Némethné Tóth, 2016). Jelen vizsgálataink céletterülete, a Felső-Tisza vízgyűjtője változatos domborzattal rendelkezik (1. ábra); az átlagos magassága 800–900 m, legmagasabb csúcsa a Nagy-Pietrosz (2303 m). A hegyoldalak igen meredek, így a hegyi patakok nagy esésűek (80–200 m/km), gyorsan elérik a folyó völgyet (Andó, 2002). Tiszabecsnél (ahol a folyó belép Magyarországra) az átlagos vízhozam 217 m³/s, de nagyobb árhullámok idején ennek több mint tízszeresét, akár a 3000–4000 m³/s-t is elérheti (Konecsny, 2003). A csapadékeloszlás, illetve a márciusi-áprilisi hóolvadás – amely nagyobb kiterjedésű térséget érint, nem csupán egy-egy gócpontot, ahogyan a nyári záporok – miatt a legnagyobb árvizek télen és tavasszal jelentkeznek a vízgyűjtőn.

Adatok. Tanulmányunkban az éghajlati és hidrológiai szimulációk két 30 éves időszakát vizsgáljuk (1971–2000 és 2069–2098) részletesebben. A klimatológiai jellemzéshez a RegCM4 regionális klímamodell (Elguindi et al., 2011) szimuláció idősorait használtuk fel, amely 2005-ig az üvegházhatású gázok mért értékeit tekinti, majd a pesszimista RCP8.5 forgatókönyvet (van Vuuren et al., 2011) alkalmazza a jövőben várható éghajlati kényszerek becslésére. A múltra vonatkozóan referencia-ként az állomási mérések alapján összeállított CARPATCLIM rácpontokra interpolált adatbázist (Spinoni et al., 2015) vettük figyelembe. Validációs vizsgálatok (Piecza et al., 2017) azt mutatták, hogy a RegCM4-szimulációk gyakran alul-, illetve felülbecslik a Kárpát-medencére jellemző hőmérsékleti- és csapadékvisszonyokat. Ezeket a szisztematikus hibákat percentilis-alapú korrekciós eljárással (Kis et al., 2017) elimináltuk és az elemzések során mind a nyers, mind a korrigált mezőket felhasználtuk. A hidrológiai szimulációkat a fizikai alapú DIWA modell (Szabó, 2007) szolgáltatta. A

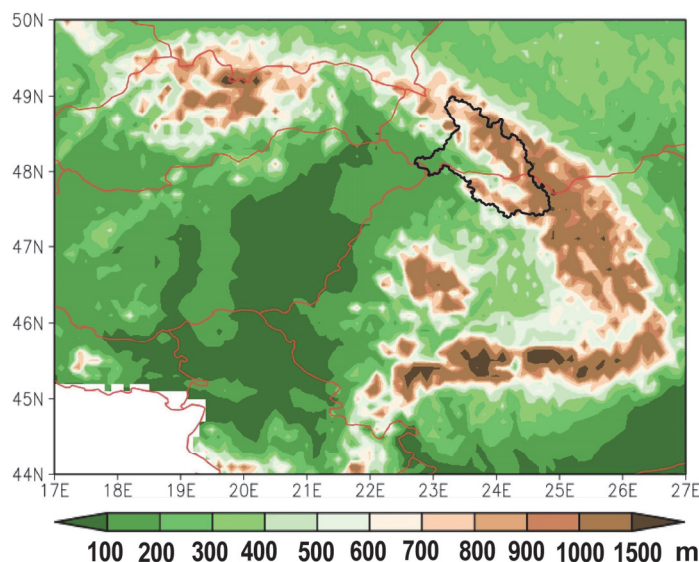
DIWA a hidrológiai ciklus minden lényeges részfolyamatát leírja, amihez elengedhetetlenek a bemeneti meteorológiai idősorok – ezeket az éghajlati vizsgálatnál is alkalmazott CARPATCLIM, illetve RegCM4 szimulált mezői biztosították esetünkben.

Eredmények. Elsőként a Felső-Tisza vízgyűjtő éghajlati jellemzőit tekintjük át a fent említett adatokból számított értékek alapján. Az 1971–2000 időszakra vonatkozó CARPATCLIM átlagait tekintve a középhőmérséklet évi menete Magyarországhoz hasonló görbét ír le nyári maximumokkal és téli minimumokkal, valamint lassabb tavaszi felmelegedéssel és gyorsabb őszi lehűléssel (2. ábra). Fagyponthoz alatti átlagos középhőmérsékletek csak a téli hónapokban fordulnak elő, 10 °C feletti pedig a májustól szeptemberig tartó időszakban. A legmelegebb hónap a július (átlagosan 15,7 °C), a leghidegebb a január (átlagosan -4,4 °C). A RegCM4 nyers szimulációja kismértékben alulbecsli a referenciának tekintett CARPATCLIM adatokat szeptember és április között, a nyári hónapokban pedig egy jelentősebb felülbecslés tapasztalható; ám összességében az évi menetet jól reprodukálja a modellszimuláció. Az alkalmazott percentilis-alapú korrekció hatására ezek a hibák eltűnnek. A XXI. század végére a nyers és a hibakorrigált szimuláció egyaránt az átlagos középhőmérséklet emelkedését valószínűsíti minden hónapban. A legnagyobb mértékű melegedésre június és szeptember között, illetve márciusban számíthatunk; ez utóbbinak fontos szerepe van a hóolvasásban és így közvetve az árvizek kialakulásában is. A középhőmérsékleti görbe évi menete nem változik

lényegesen a XXI. század során, de fontos megjegyezni, hogy a melegedés következtében a jövőben enyhébb telek (legtöbbször fagymentes decemberrel) és forróbb nyarak (átlagosan 20 °C feletti középhőmérséklettel júniusban, júliusban és augusztusban is) várhatóak majd. A CARPATCLIM havi átlagos csapadékösszegeit tekintve megállapíthatjuk (3. ábra), hogy az 1971–2000 időszakban a Felső-Tisza vízgyűjtőjén a legcsapadékosabb hónap a június és a július (130 mm/hó), a legszárazabb pedig a február (53 mm/hó) volt. A csapadék időbeli eloszlása nagy hasonlóságot mutat a magyarországi átlagokkal, azonban a Felső-Tisza vízgyűjtőn magasabb értékek fordulnak elő, amely egyértelműen a domborzat hatásával magyarázható. A vízgyűjtőterület tehát Magyarországhoz képest csapadékosabb: az éves összeg átlagosan 1060 mm, s az év több mint felében 80 mm feletti az átlagos havi csapadékösszeg. A RegCM4 szimuláció nyers csapadék idősorai láthatóan nem képesek

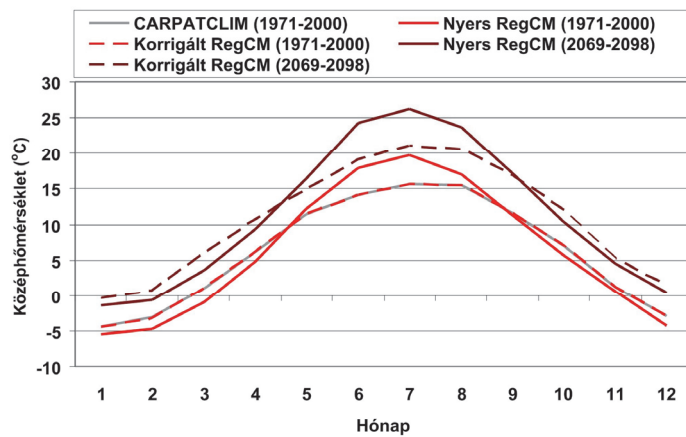
a csapadék éves menetét helyesen reprodukálni: a valós éghajlati viszonyokkal ellentétben téli maximumok és nyárvégi minimumok jelentek meg. A hibakorrekció alkalmazásával azonban ezek az eltérések kiküszöbölhetők, s a valós évi menet rekonstruálható. A jövőre vonatkozó becslések szerint a csapadékmennyiség időbeli eloszlásának eltolódása várható: a legcsapadékosabb a korrigált idősorok alapján április-május lesz; a legszárazabb az augusztus (amely a referencia időszakban még a negyedik legcsapadékosabb hónap volt a térségben). Az átlagos évi csapadékösszeg, illetve az átlagos évi középhőmérséklet térbeli szerkezetét a 4. ábrán láthatjuk. Szembetűnő, hogy a korrekció hatására sokkal részletesebb képet kapunk a régió éghajlati viszonyairól, de a területi különbségek és átlagértékek hasonlóak a nyers szimuláció alapján kapott eredményekkel. Jól látható, hogy a két kiválasztott meteorológiai változó értékeit jelentősen befolyásolja a domborzat. Az évi átlagos csapadékösszeg a magasabban fekvő térszíneken akár 1400 mm feletti is lehet és az átlagos középhőmérséklet jellemzően nem haladja meg a 6 °C-ot, míg a sík területeken átlagosan 500–800 mm mennyiség hullhat egy évben, a középhőmérséklet pedig elérheti a 10 °C-ot. A csapadék esetén a két időszakra vonatkozó térkép (4. ábra) összevetésével megállapíthatjuk, hogy az éves átlagot tekintve csupán egy kismértékű csökkenés várható a területen. Évszakos, illetve havi skálán vizsgálódva azonban jelentősebb változások valószínűsíthetők a becslések szerint (3. ábra).

A középhőmérséklet évi átlaga a XXI. század végére a régió minden pontjában legalább 3 °C-kal magasabb lesz a szimulációk szerint (4. ábra). Az Északkeleti-Kárpátokban a referencia időszakban jellemző -1 és +5 °C közötti átlagok helyett +4 és +9 °C közötti a becsült átlagos érték, a hegységtől keletre fekvő területeken mintegy 5 °C-os növekedés valószínűsíthető, míg a vízgyűjtő nyugati felén 10 °C-ról akár 14 °C-ra is emelkedhet az átlagos évi középhőmérséklet. Összességében tehát a Felső-Tisza vízgyűjtő szárazodása és melegedése valószínűsíthető a XXI. század során. A következőkben áttérünk a Felső-Tisza vízgyűjtő hidrológiai vizsgálatára, a RegCM4 szimuláció nyers idősorait felhasználó DIWA szimulációk alapján. Fontos megjegyezni, hogy a RegCM4 az év nagy részében felülbecsli a csapadékot, ezért a hidrológiai szimuláció eredményeként kapott vízhozamokban is nyilvánvalóan megjelenik majd ez a felülbecslés. Éppen ezért az elemzések során a kapott konkrét értékeket nem, csak a várható változások irányát emeljük ki, amely a nyers modelleredmények alapján is releváns információt szolgáltat. A referencia

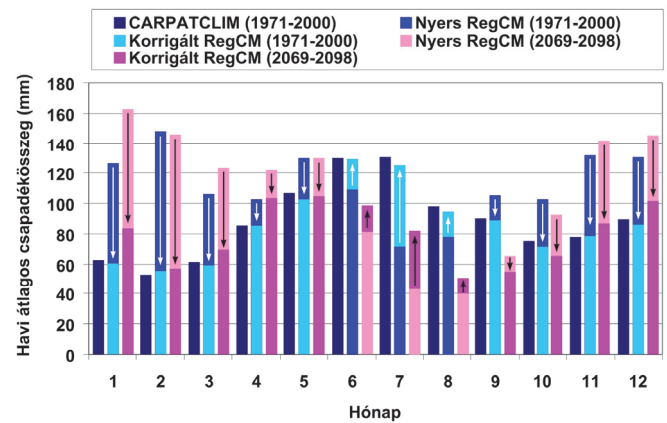


1. ábra: Domborzati térkép a CARPATCLIM adatbázis alapján. A fekete kontúrvonal a Felső-Tisza vízgyűjtőterületét jelöli.

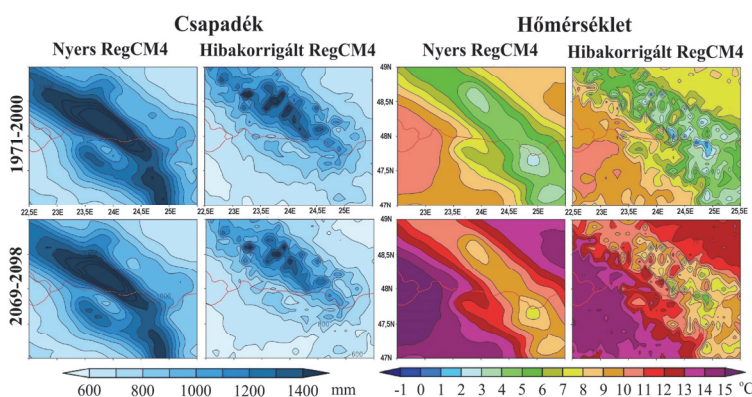
Északkeleti-Kárpátokban a referencia időszakban jellemző -1 és +5 °C közötti átlagok helyett +4 és +9 °C közötti a becsült átlagos érték, a hegységtől keletre fekvő területeken mintegy 5 °C-os növekedés valószínűsíthető, míg a vízgyűjtő nyugati felén 10 °C-ról akár 14 °C-ra is emelkedhet az átlagos évi középhőmérséklet. Összességében tehát a Felső-Tisza vízgyűjtő szárazodása és melegedése valószínűsíthető a XXI. század során. A következőkben áttérünk a Felső-Tisza vízgyűjtő hidrológiai vizsgálatára, a RegCM4 szimuláció nyers idősorait felhasználó DIWA szimulációk alapján. Fontos megjegyezni, hogy a RegCM4 az év nagy részében felülbecsli a csapadékot, ezért a hidrológiai szimuláció eredményeként kapott vízhozamokban is nyilvánvalóan megjelenik majd ez a felülbecslés. Éppen ezért az elemzések során a kapott konkrét értékeket nem, csak a várható változások irányát emeljük ki, amely a nyers modelleredmények alapján is releváns információt szolgáltat. A referencia



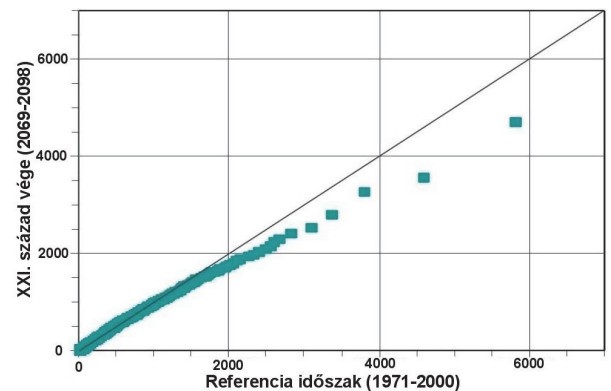
2. ábra: Az átlagos középhőmérséklet évi menete a Felső-Tisza vízgyűjtőn 1971–2000-ra és 2069–2098-ra vonatkozóan a CARPATCLIM, valamint a RegCM4 nyers és hibakorrigált idősorai alapján.



3. ábra: Havi átlagos csapadékösszegek a Felső-Tisza vízgyűjtőn 1971–2000-ra és 2069–2098-ra vonatkozóan a CARPATCLIM, valamint a RegCM4 nyers és hibakorrigált idősorai alapján. A nyilak a korrekció irányát jelölik (felfele/lefele mutató nyíl: alulbecslés/felülbecslés korrigálása).



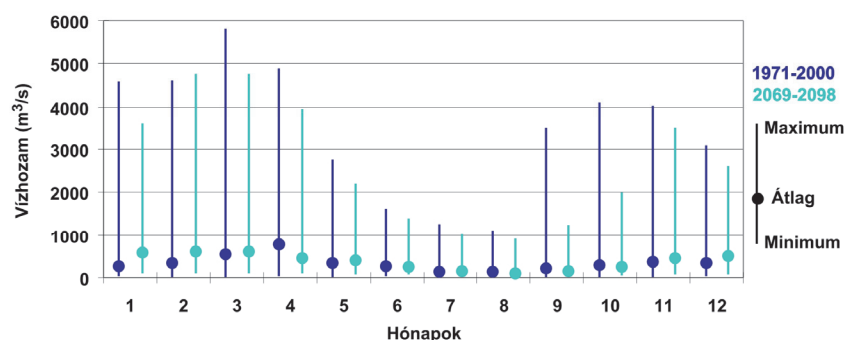
4. ábra: Átlagos évi csapadékösszeg és átlagos évi középhőmérséklet a Felső-Tisza vízgyűjtőn 1971–2000-re, illetve 2069–2098-ra vonatkozóan a RegCM4 nyers és hibakorrigált idősorai alapján.



5. ábra: A Q-Q plot Tiszabecsre vonatkozóan a RegCM4 szimuláció nyers meteorológiai idősorait felhasználó DIWA szimuláció alapján mutatja a napi középvízhozamokat, m^3s^{-1} .

időszakra és a XXI. század végére vonatkozó napi középvízhozamok eloszlásfüggvényei által meghatározott ún. Q–Q ploton (5. ábra) jól látszik, hogy a jövőben várhatóan kisebb napi átlagos lefolyással kell számolnunk. A legnagyobb eltérés a magasabb vízhozam értékek esetén valószínűsíthető. A napi közepes vízhozamok alsó kvartilisénél kisebb értékek előfordulása mintegy 30%-kal növekedni fog a becslések szerint, a felső kvartilisénél nagyobb értékek szinte változatlan gyakoriságúak lesznek, ám a 99. percentilis feletti értékek 50%-os csökkenése várható a jövőben. Ez is azt mutatja, hogy a XXI. század végére elsősorban az extrém magas napi közepes vízhozam értékek csökkenésére számíthatunk. A napi középvízhozamok maximumai tehát a szimulációink szerint minden hónapban csökkenni fognak, ám az átlagos vízhozamok esetén már különböző

irányú változásokat figyelhetünk meg az egyes hónapokban (6. ábra). Télen (novembertől februárig) növekedés várható, amely az erre az évszakra (amely jelenleg a legszárazabb) becsült átlagos csapadékösszeg emelkedésével magyarázható. Fontos tényező még, hogy a magasabb középhőmérsékletek miatt hó helyett jellemzően eső formájában hullik majd a csapadék, így az nem felhalmozódik, hanem rögtön a lefolyás folyamatának részévé válik, és a szokásosnál magasabb vízhozamokat eredményez. A legjelentősebb csökkenés áprilisban valószínűsíthető: általában ebben a hónapban a legintenzívebb a hóolvasás, amely aztán áradásokat okozhat. A XXI. század végén azonban a becslések szerint a magasabb középhőmérsékletek miatt télen kevesebb hó halmozódik majd fel, így az olvasás kisebb gyakorisággal okoz majd jelentősebb lefolyástöbbletet.



6. ábra: A 30 éves idősorok (1971–2000 és 2069–2098) napi vízhozamainak havi maximuma, minimuma és átlaga Tiszabecsre vonatkozóan a RegCM4 szimuláció nyers meteorológiai idősorait felhasználó DIWA szimuláció alapján.

Nyáron már a referencia időszakban is a napi vízhozam alacsony átlagértéke volt tapasztalható, amely a jövőben még hangsúlyosabb lesz – a csökkenés összhangban van a terület XXI. század végére becsült nyári szárazodásával.

Összegzés. Napjainkban az egyik legfontosabb, tudományosan is megalapozottan megválaszolandó kérdés, hogy adott területen a lefolyás statisztikus megváltozása hogyan befolyásolja az ott kialakult társadalmi-gazdasági életet, valamint hogy a vízkészletek szélsőséges, illetve elégséges értékeinek gyakoriságai miként hatnak a természetes élőhelyek megszokott egyensúlyára. Ezért kiemelten fontos, hogy minél részletesebb és megbízhatóbb becsléseket készítsünk a jövőben várható hidrológiai változásokra vonatkozóan. Tanulmányunkban a Felső-Tisza vízgyűjtőjét elemeztük éghajlati és hidrológiai szimulációk alapján az 1971–2000 és a 2069–2098 időszakokra vonatkozóan. A vizsgálatokat a DIWA hidrológiai modell és a RegCM4 klímamodell, valamint a CARPATCLIM referencia adatbázis felhasználásával végeztük el. Becsléseink szerint a jövőben minden hónapban magasabb átlagos középhőmérséklet várható a területen, de a tér- és időbeli eloszlásban nem valószínűsíthető jelentős változás. Ezzel szemben a csapadékszimuláció XXI. század végére vonatkozó eredményei az évi átlagos összegeket és a térbeli eloszlást tekintve is szinte megegyezik a referencia időszyakkal. Markáns változások a csapadék éven belüli eloszlásában várhatók: a tél csapadékosabb, a nyár – különösen az augusztus – szárazabb lesz a számításaink alapján. A Tisza napi vízhozamának éven belüli eloszlása megváltozik a modell-futtatások szerint; a magasabb (99. percentilist meghaladó) értékek esetén csökkenés valószínűsíthető. A legnagyobb csökkenés áprilisban várható a kisebb mértékű hóolvadás miatt, míg télen a becsült csapadéknövekedés következtében az átlagos vízhozamok növekedése valószínűsíthető. Más modellek (REMO, HD, PRECIS) és más szcenárió (A1B) alkalmazásával készültek már hasonló vizsgálatok a területre (Radvánszky and Jacob, 2008; HYDROInform Bt., 2012): ezek eredményei összhangban vannak az újabb adatbázisok alapján tett fenti megállapításainkkal.

Köszönetnyilvánítás. Kutatásainkat támogatta az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programja, az AGRÁRKLIMA2 projekt (VKSZ_12-1-2013-0034), az OTKA K-120605 számú projektje, valamint a Széchenyi 2020 program az AgroMo kutatási projekt (GINOP-2.3.2-15-2016-00028) keretében. Továbbá köszönet az adatokért: CARPATCLIM Database©European Commission – JRC, 2013.

Irodalom

Andó, M., 2002: A Felső-Tisza vízrendszer hidrogeográfiai adottságai. *Hidrológiai Közöny* 82(3), 129–141.
Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Car-

rara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A.D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J.F., Sanz, M.J., Schulze, E.D., Vesala, T., Valentini, R., 2005: Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437, 529–533.
Elguindi, N., Bi, X., Giorgi, F., Nagarajan, B., Pal, J., Solmon, F., Rauscher, S., Zakey, A., Giuliani, G., 2011: Regional climatic model RegCM – User manual. Version 4.3. ICTP, Italy, 1–32.
Faragó, T., Láng, I. and Csete, L., 2010: Climate change and Hungary: mitigating the hazard and preparing for the impacts. *VAHAVA Report*. MTA, Budapest.
HYDROInform Bt., 2012: „Az árvízvédelmi információs rendszer fejlesztése a Felső-Tisza vízgyűjtőjén” című, SH/2/1 reg. sz. projekt keretében „Az árvízi lefolyás elemzése” részteama kapcsán készített összefoglaló tanulmány. A tanulmány megrendelője: Felső-Tisza-vidéki Vízügyi Igazgatóság (FETIVIZIG), Nyíregyháza. A projekt támogatója: Swiss Hungarian Cooperation Programme.
Kis, A., Pongrácz, R. and Bartholy, J., 2017: Multi-model analysis of regional dry and wet conditions for the Carpathian Region. *International Journal of Climatology* 37, 4543–4560. doi: 10.1002/joc.5104
Konecsny, K., 2003: A Felső-Tisza 1998–2001. évi árvizeinek hidrológiai értékelése. *Hidrológiai Közöny* 83(2), 75–86.
Konecsny, K., 2006: A hóviszonyok jellemzői és vízjárás befolyásoló hatása a Felső-Tiszán. *Hidrológiai Közöny* 86(1), 45–63.
Kundzewicz, Z. W., Ulbrich, U., Brücher, T., Graczyk, D., Krüger, A., Leckebusch, G. C., Menzel, L., Pinskiwar, I., Radziejewski, M. and Szwed, M., 2005: Summer Floods in Central Europe – Climate Change Track? *Natural Hazards* 36, 165–189.
Némethné Tóth, K., 2016: Vízhány és annak kezelési lehetőségei a Felső-Tisza vidékén. MHT XXXIV. Országos Vándorgyűlés, Debrecen. pp. 20
Piecška, I., Pongrácz, R., André, K. S., Kelemen, F. D., Bartholy, J., 2017: Sensitivity analysis of different parameterization schemes using RegCM4.3 for the Carpathian region. *Theoretical and Applied Climatology* 130, 1175–1188. doi 10.1007/s00704-016-1941-4
Radvánszky, B. és Jacob, D., 2008: A Tisza vízgyűjtőterületének várható klímaváltozása és annak hatása a Tisza vízhozamára regionális klímamodell (REMO) és a lefolyási modell (HD) alkalmazásával. *Hidrológiai Közöny* 88(3), 33–42.
Spinoni, J. and the CARPATCLIM project team (39 authors). 2015: Climate of the Carpathian Region in 1961–2010: Climatologies and Trends of Ten Variables. *International Journal of Climatology* 35, 1322–1341.
Szabó, J.A., 2007: Decision Supporting Hydrological Model for River Basin Flood Control. In: *Digital Terrain Modeling: Development and Applications in a Policy Support Environment*, szerk: Peckham, R.J. and Jordan, Gy., Springer-Verlag, Germany, 145–182.
van Vuuren, D.P., Edmonds, J.A., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A.M., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S., 2011: The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109, 5–31.