

## KÜLÖNBÖZŐ HIBAKORREKCIÓS MÓDSZEREK HIDROLÓGIAI SZIMULÁCIÓKRA GYAKOROLT HATÁSÁNAK ÖSSZEHASONLÍTÓ ELEMZÉSE

**Kis Anna<sup>1</sup>, Pongrácz Rita<sup>1,2</sup>, Bartholy Judit<sup>1,2</sup>, Szabó János Adolf<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék,  
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A*

*e-mail: kisanna@nimbus.elte.hu, prita@nimbus.elte.hu, bartholy@caesar.elte.hu*

*<sup>2</sup>ELTE TTK Kiválósági Tudásközpont, 2462 Martonvásár, Brunszvik u. 2.*

*<sup>3</sup>HYDROInform Bt., 1021 Budapest, Hűvösvölgyi út 54.*

*e-mail: janos.szabo@hydroinform.hu*

A kutatás célja, hogy megállapítsuk, mely hibakorrekciós módszerek a legmegfelelőbbek a hatásmodellek bemeneti idősorait szolgáltató klímamodell-szimulációk szisztematikus hibáinak kiküszöbölésére. Többféle eljárást teszteltünk, amelyeket egy múltbeli időszakra validáltunk a CARPATCLIM adatbázis felhasználásával, a Felső-Tisza vízgyűjtőre.

**Kulcsszavak:** hibakorrekció, DIWA hidrológiai modell, RegCM4, CARPATCLIM

### Bevezetés

Tapasztalhatjuk, hogy a jelenleg zajló, elsősorban antropogén eredetű klímaváltozás nem csak a magasabb hőmérsékleti értékek, vagy az intenzívebb esőzések gyakoribbá válása miatt okozhat gondot, hanem az általuk eredményezett veszteségek is komolyabb problémákat jelenthetnek. A potenciális természeti-, környezeti- és gazdasági károk mérséklésének érdekében fontos, hogy megfelelő adaptációs stratégiákat dolgozzunk ki, amelyekhez elengedhetetlen a jövőben várható változások megbízható becslése. Éppen ezért napjainkban már nem csupán az éghajlatváltozás tanulmányozása, hanem a kapcsolódó hatásvizsgálatok is kiemelten fontos kutatási területek (Anwar et al. 2013; Gosling et al. 2013; Dobor 2016; Nik 2016; Kovács et al. 2017).

Kutatásunkban a lefolyásra fókuszáltunk, amely a hidrológiai ciklus elemei közül az egyik legfontosabb tényező, mivel a víz túlzott többlete (árvíz, ún. flash flood – azaz villámárvíz) és hiánya (aszály) egyaránt problémát jelent. Magyarországon például a 2010-es kiadós esőzések okozta árvizek a Bodrog, Sajó, Hernád és Bódva folyókon több mint 10 milliárd forintos védekezési és helyreállítási költséggel jártak (KSH 2011). A 2012-es hazai aszály pedig a mezőgazdaságra hatott kedvezőtlenül: a KSH (2013) éves összesítése szerint az átlagosnál 24%-kal volt kevesebb a gabonatermés, és 20%-kal volt kevesebb a napraforgó-, illetve szőlő-termelés.

### Adatok és módszerek

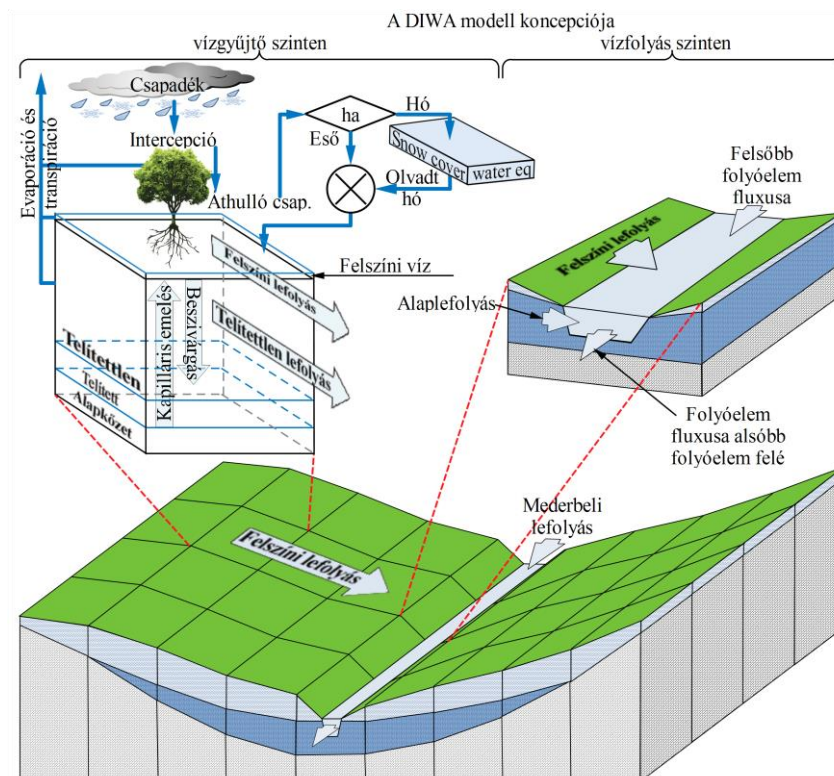
Elemzéseinket egy múltbeli (1972–2001) és két jövőbeli időszakra (2021–2050, 2069–2098) vonatkozóan végeztük el. A referencia időszakra rendelkezésre állnak méréseken alapuló adatbázisok; a XXI. századra vonatkozó vizsgálatokhoz pedig éghajlati modellszimulációkat használhatunk, amelyek azonban gyakran hibával terheltek. Mivel a hatásvizsgálatoknál különösen fontos, hogy a lehető legpontosabb adatokkal dolgozhassunk, a nyers klímamodell-outputokra hibakorrekciós eljárásokat alkalmaztunk. A kutatás célja, hogy megállapítsuk, mely korrekciós módszerek a legmegfelelőbbek a hatásmodellek bemeneti idősorait szolgáltató klímamodell-szimulációk szisztematikus hibáinak kiküszöbölésére.

## A felhasznált adatok és modellek

Kutatásunkban referenciaként az állomási mérések alapján összeállított, homogenizált és szabályos rácsra interpolált (Bihari és Szentimrey 2013) CARPATCLIM adatbázist tekintettük (Spinoni et al. 2015). A CARPATCLIM az 1961–2010 időszakot fedi le napi léptékben, 0,1°-os felbontással az é. sz. 44°–50°; k. h. 17°–27° térségre (Bosznia-Hercegovina kivételével) vonatkozóan.

A jövőbeli időszakok vizsgálatához a RegCM4 regionális klímamodellt (Elguindi et al. 2011) alkalmaztuk. A szimuláció az 1970–2099 időszakra áll rendelkezésre, napi bontásban, Közép-Kelet Európa térségére (é. sz. 43,8°–50,6°; k. h. 6°–29°), 0,11°-os felbontással. A futtatáshoz szükséges kezdeti- és peremfeltételeket az 50 km-es felbontású szimuláció biztosította, amelyet a HadGEM globális modell vezérelt (Collins et al. 2011). A XXI. század során várható sugárzási kényszert az RCP8.5 forgatókönyv (van Vuuren et al. 2011) alapján vette figyelembe a modell, amely egy meglehetősen pesszimista scenárió.

A hidrológiai szimulációkhoz a fizikai alapú, osztott DIWA (DIstributed WATershed) modellt (Szabó 2007) használtuk. A DIWA figyelembe veszi a hidrológiai egyenlet minden lényeges részfolyamatát, úgymint a csapadékot, evapotranszpirációt, beszivárgást, intercepciót, felszíni és felszín alatti lefolyást (1. ábra). A hőmérséklet értékének függvényében a modell szétválasztva esőként vagy hóként kezeli a csapadékot, és a hó felhalmozódására, illetve olvadására is tekintettel van. A DIWA továbbá a domborzatot és annak különböző derivátumait is figyelembe veszi a számítások során, akár csak a felszínborítottságot, valamint az intercepció és transzspiráció szempontjából lényeges havi LAI értékeket is.



1. ábra. A DIWA hidrológiai modell felépítése a legfontosabb folyamatok feltűntetésével.

### *Az alkalmazott hibakorrekciós eljárások*

Vizsgálataink során három különböző hibakorrekciós módszert alkalmaztunk a RegCM4-szimuláció nyers outputjaira, amelyeket a következő bekezdésekben ismertetünk. Az eljárásokat rácspontonként és havi bontásban végeztük el. A képletek az alábbi jelöléseket, rövidítéseket használják:  $T$  a hőmérséklet,  $R$  a csapadék,  $i$  a hónap,  $rs$  a nyers szimuláció,  $cs$  a korrigált szimuláció,  $r$  a referencia,  $h$  a historikus időszak és  $f$  a jövőbeli időszak.

A legegyszerűbbnek tekinthető delta-módszer (Hawkins et al. 2013) a jövőre és a múltra vonatkozó modellszimuláció időbeli átlagának különbségét (arányát) tekinti a hőmérséklet (csapadék) esetén.

$$T(i)_{cs,f} = T(i)_{r,h} + \overline{(T(i)_{rs,f} - T(i)_{rs,h})}$$
$$R(i)_{cs,f} = R(i)_{r,h} \cdot \frac{\overline{R(i)_{rs,f}}}{\overline{R(i)_{rs,h}}}$$

Az átlagos értékek figyelembe vétele mellett a teljes előfordulási intervallumot tekintő percentilis-alapú módszer (Wang et al. 2016; Kis et al. 2017) a tapasztalati eloszlásfüggvények illesztésén alapul, a hőmérséklet (csapadék) esetén additív (multiplikatív) korrekciós faktorok alkalmazásának segítségével.

$$T(i)_{cs} = T(i)_{rs} + (F_r^{-1}(y) - F_{rs,h}^{-1}(y))$$
$$R(i)_{cs} = R(i)_{rs} \cdot \frac{F_r^{-1}(y)}{F_{rs,h}^{-1}(y)}$$

A statisztikai tulajdonságokat még pontosabban leíró, időjárás-generátor használatán alapuló módszer korrigált átlag és szórás értékeket használ, amelyeket az elterjedten alkalmazott szinusz-görbe (hőmérséklet esetén), illetve a Gamma-eloszlás (csapadék és száraz/nedves tartamok esetén) paramétereinek megfelelő illesztésével határoztunk meg.

$$f(T) = a \cdot \sin \left[ (T - b) \cdot \frac{2\pi}{365} \right] + c$$
$$f(R) = \frac{\lambda^\kappa R^{\kappa-1} e^{-\lambda R}}{\Gamma(\kappa)}$$

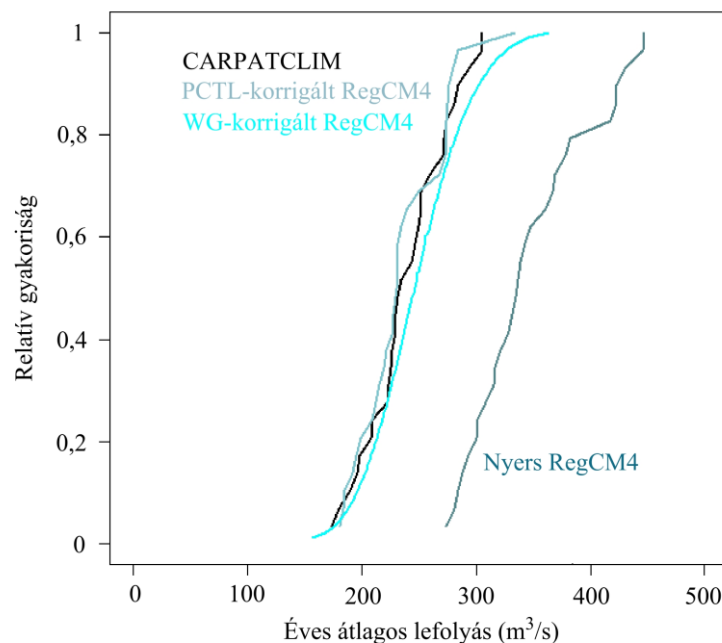
A különböző korrekciós eljárások eredményeként kapott meteorológiai idősorok mindegyikével meghajtottuk a DIWA hidrológiai modellt. Annak érdekében, hogy a bizonytalanságról is képet kapjunk, Monte-Carlo ciklusba ágyazott futtatásokat is végeztünk. Ily módon több lehetséges, azonos valószínűséggel bekövetkező scenárió is rendelkezésünkre állt, annak ellenére, hogy csupán egy-egy modellel dolgoztunk kutatásunk során.

## Eredmények

A módszerek teszteléséhez a Felső-Tisza vízgyűjtőre, a múltra vonatkozóan validáltuk eredményeinket, amelyhez a CARPATCLIM által vezérelt DIWA-szimuláció szolgált referenciaként. A jövőbeli futtatások elemzése pedig arról szolgáltat információt, hogy a korrekciós módszer megválasztása milyen mértékben befolyásolja a hidrológiai modell kimenetét és mennyire növeli a becslések bizonytalanságát.

### Validáció

Eredményeink közül először a historikus időszakra vonatkozó, különböző meteorológiai idősorokkal meghajtott hidrológiai szimulációkat hasonlítjuk össze (2. ábra). Jól látható, hogy az éves átlagos lefolyást jelentősen felülbecslik a nyers RegCM4 idősoraival vezérelt DIWA-outputok, amely a klímamodell általános csapadék-túlbecsléséből eredeztethető. A delta-módszert nem lehet a múltbeli időszakra alkalmazni, ezért csak a percentilis- és az időjárás-generátoron alapuló eljárások hatását tudjuk elemezni. Mindkét korrekciós módszer esetén sikerült kiküszöbölni a referenciához viszonyított markáns felülbecslést. Így a valósághoz közelebb álló értékeket kaptunk, habár az eloszlásfüggvények alakjának egyezése nem tökéletes. (Az időjárás-generátoron alapuló korrekció esetén a Monte-Carlo ciklusba ágyazott futtatások átlagát jelenítettük meg, ezért tapasztalhatjuk a simítottabb görbét.)



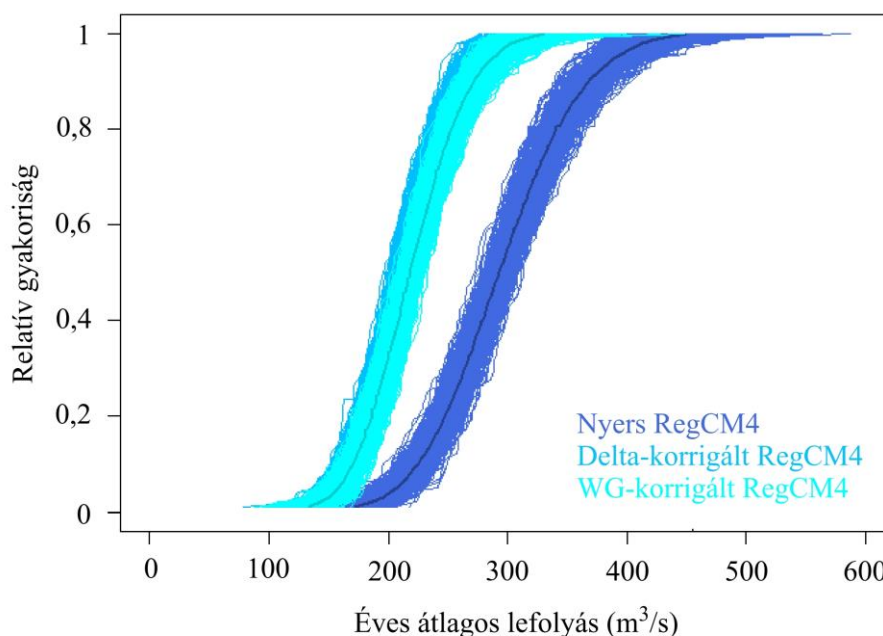
2. ábra. Éves átlagos lefolyás Tiszabecsen az 1972–2001 időszakra vonatkozóan a DIWA hidrológiai modell különböző meteorológiai idősorokkal vezérelt szimulációi alapján.

### A jövőre vonatkozó becslések

A 3. ábrán a Monte-Carlo ciklusba ágyazott DIWA-szimulációkat tüntettük fel a közelebbi jövőre vonatkozóan. A nyers RegCM4 által vezérelt hidrológiai szimuláció ezúttal is magasabb értékeket becsül, mint a delta-módszerrel vagy az időjárás-generátor használatával kapott meteorológiai idősorokkal meghajtott esetben. A két különböző korrekció hatására az éves átlagos lefolyás értékek hasonló mértékben csökkentek a nyers esethez képest.

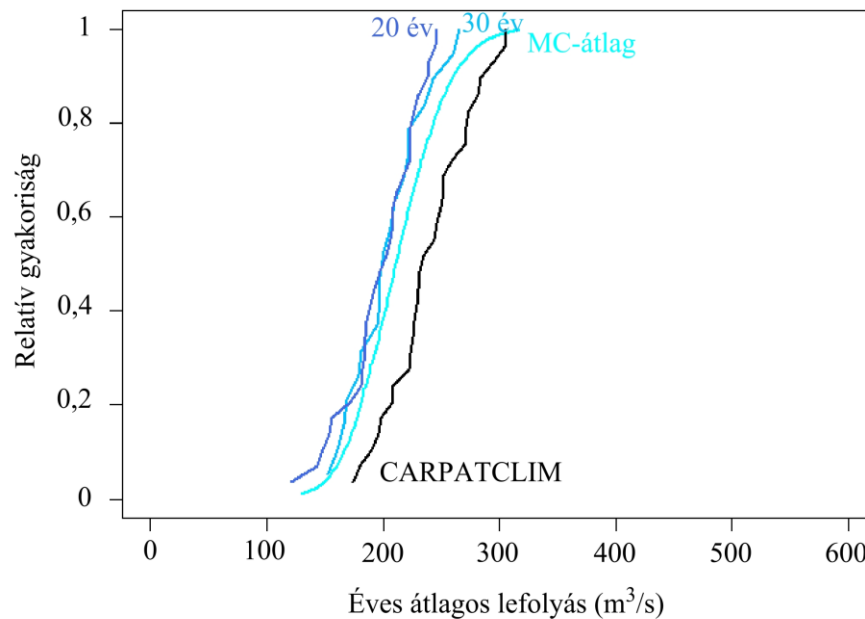
Észrevehető továbbá, hogy az egyes szimulációk közötti szórás, azaz a becslés bizonytalansága is kisebb lett a korrekció hatására. Habár az éves lefolyás átlagos mennyiségében jelentős változásokat eredményeztek az alkalmazott hibakorrekciós eljárások, a változások irányában nem tapasztalhatunk módosulást.

Kutatásaink során arra is kíváncsiak voltunk, hogy a korrekcióhoz használt referencia időszak (tanulási időszak) hossza befolyásolja-e eredményeinket. A 4. ábrán csak a delta-korrekció alapján kapott eredményeinket mutatjuk be: sötétkékkel jelöltük azt az esetet, amikor csak 20 évet tekintettünk a hibakorrekció során; a világoskék a 30 évet figyelembevevő eljárás kimenetét mutatja, míg a neonkék a Monte-Carlo szimulációba ágyazott futtatások átlagát jelöli, amikor szintén a 30 év statisztikai tulajdonságaival dolgoztunk. A fekete vonal a historikus időszakra vonatkozó, CARPATCLIM felhasználásával számított éves átlagos lefolyások eloszlását mutatja. Látható, hogy még egyetlen kiválasztott korrekciós módszer alkalmazásának esetén is eltérő eredményeket kaphatunk. Érdekes például, hogy a sötétkék görbe tulajdonképpen a Monte-Carlo ciklus eredményének egy tagja – csupán egy lehetséges scenárió. Ezzel szemben a Monte-Carlo ciklusba ágyazott futtatások átlaga megbízhatóbb becslésnek tekinthető, hiszen itt a bizonytalanságot is figyelembe vettük, és a diagramon ennek átlaga szerepel. A korrekció során referenciaként tekintett időszak hossza is hatással van a hidrológiai szimuláció eredményére: nem mindegy, hogy a kiválasztott időperiódusban mely évek szerepelnek. Például egy kivételesen csapadékos év kihagyása/belefoglalása ebbe a tanulási időszakba módosíthatja a korrigált idősorokat, ezért célszerű lehet minél hosszabb periódust választani, hogy jobban közelíthessük az éghajlat valós statisztikai tulajdonságait. Az eredmények azonban olyan szempontból egyértelműen konzisztensek, hogy a historikus időszakhoz képesti változások iránya ugyanaz maradt mindhárom esetben.



3. ábra. Éves átlagos lefolyás Tiszabecsen a közelebbi jövőre vonatkozóan a DIWA hidrológiai modell különböző meteorológiai idősorokkal vezérelt MC- szimulációi alapján.





4. ábra. Éves átlagos lefolyás Tiszabecsen a közelebbi jövőre vonatkozóan a DIWA hidrológiai modell különböző meteorológiai idősorokkal vezérelt szimulációi alapján.

## Összefoglalás

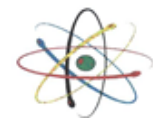
A dolgozatban egy kisebb vízgyűjtő területre futtatott hidrológiai modellszimuláció eredményeit mutattuk be. A szükséges bemeneti meteorológiai idősorokat a referencia adatbázis mellett a nyers klímamodell-outputok, és az egyes hibakorrekciós eljárások alkalmazásával kapott idősorok szolgáltatták. A validációs vizsgálatok során megállapíthattuk, hogy mindenképpen szükséges valamilyen korrekció alkalmazása, hiszen a nyers RegCM4-outputokkal vezérelt DIWA-szimuláció jelentős felülbecsléseket mutat az éves átlagos lefolyás értékeiben. A jövőre vonatkozó becslések esetén a különböző korrekciós eljárások, vagy a különböző hosszúságú referencia időszakok egyaránt eltérő eredményeket okozhatnak. Meglátásaink szerint célszerű minél hosszabb referencia időszakot választani a korrekcióhoz, valamint Monte-Carlo ciklusba ágyazott futtatásokat végezni a megbízhatóbb eredmények és a bizonytalanság számszerűsítésének érdekében.

## 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. Köszönet az adatokért: CARPATCLIM Database©European Commission – JRC, 2013.*

## Felhasznált irodalom

1. Anwar, M.R., Liu, D.L., Macadam, I., Kelly, G. (2013): Adapting agriculture to climate change: a review. *Theor Appl Climatol*, 133. évf., pp. 225–245.
2. Bihari, Z., Szentimrey, T. (2013): Description of MASH and MISH algorithms. CARPATCLIM Deliverable D2.10. Annex 3. 100p.



3. Collins, W.J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C.D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., Woodward, S. (2011): Development and evaluation of an Earth-system model – HadGEM2. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 4. évf., pp. 997–1062.
4. Dobor, L. (2016): Possible impacts of climate change on the productivity and carbon balance of Hungarian croplands PhD disszertáció, ELTE, Budapest. 147p.
5. 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, Trieste, Italy. 32p.
6. Gosling, S.N., Arnell, N.W. (2013): A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change*, 134. évf., pp. 371–385.
7. Hawkins, E., Osborne, T.M, Ho, C.K., Challinor, A.J (2013): Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: An idealised case study over Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170. évf., pp.19–31.
8. Kis, A., Pongrácz, R., Bartholy, J. (2017): Multi-model analysis of regional dry and wet conditions for the Carpathian Region. *Int J Climat*, 37. évf., pp. 4543–4560.
9. Kovács, A., Németh, Á., Unger, J., Kántor, N. (2017): Tourism climatic conditions of Hungary – present situation and assessment of future changes. *Időjárás*, 121. évf., pp. 79–99.
10. KSH (2011): A 2010. évi árvíz Borsod-Abaúj-Zemplén megyében. (szerk. Szalainé H.A.) Központi Statisztikai Hivatal Miskolci Igazgatósága. ISBN 978-963-235-328-9
11. KSH (2013): Output of Hungary's agriculture in 2012 (Economic accounts for agriculture, 2012). *Statistical Reflections*, 48. évf./7. sz., p. 5.
12. Nik, V.M., (2016): Making energy simulation easier for future climate – Synthesizing typical and extreme weather data sets out of regional climate models (RCMs). *Applied Energy*, 177. évf., pp. 204–226.
13. Spinoni, J. and the CARPATCLIM project team (39 authors) (2015): Climate of the Carpathian Region in 1961–2010: Climatologies and Trends of Ten Variables. *Int J Climatol*, 35 évf., pp. 1322–1341.
14. Szabó, J.A. (2007): Decision Supporting Hydrological Model for River Basin Flood Control. Eds.: Peckham R.J. and Jordan Gy. In: *Digital Terrain Modelling: Development and Applications in a Policy Support Environment*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 145–182.
15. 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. évf., pp. 5–31.
16. Wang, L., Ranasinghe, R., Maskey, S., van Gelder, P.H.A.J.M., Vrijling, K. (2016): Comparison of empirical statistical methods for downscaling daily climate projections from CMIP5 GCMs: a case study of the Huai River Basin, China. *Int J Climatol*, 36. évf., pp. 145–164.