

A havi csapadékmennyiség változása és hatása a Tisza vízhozamára a XXI. század második felében

Radvánszky Bertalan

*PTE, Földtudományok Doktori Iskola, H-7621 Pécs, Ifjúság u. 6.,
radberti@gamma.ttk.pte.hu*

Bevezetés

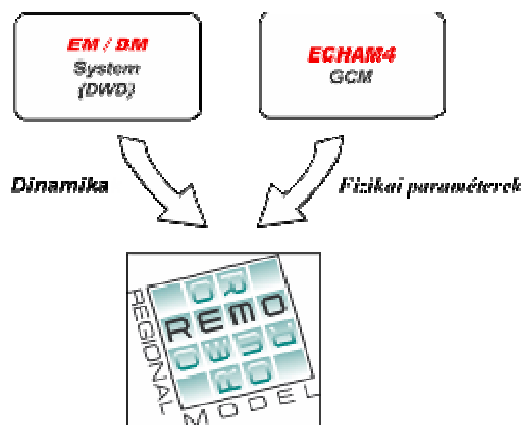
Az éghajlatváltozással foglalkozó tanulmányok száma az elmúlt évtizedben rohamosan megszorodott. Az extraterresztrikus és a terresztrikus hatásokon kívül napjainkban a légkör üvegházhatású gázainak mennyiségi változása is jelentős mértékben hozzájárul a globális éghajlatváltozáshoz. Az emberi tevékenység következtében a szén-dioxid (CO₂), a metán (CH₄) és a dinitrogén-oxid (N₂O) globális légköri koncentrációja jelentősen megnövekedett az ipari forradalom óta (IPCC 2007.). A Föld légkörének melegekedése a globális és a félgömbi hőmérsékleti adatokból vitathatatlanul kimutatható (Bartholy és Mika 1998). Nem teljesen egyértelmű azonban a szárazföldi felmelegedés regionális eloszlása, ugyanis nem csak számértékben figyelhetők meg különbségek, hanem annak előjelében is (Konecsny 2002). Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) jelentése alapján elmondható, hogy az éghajlatváltozás következményei a szélsőségesen magas hőmérsékletek gyakoriságában, az aszályok és az árvizek többszöri előfordulásában és intenzitásában mutatkoznak meg.

A közelmúltban bekövetkezett természeti és antropogén katasztrófák nyomán a Tisza és a vízgyűjtő területe is a különböző tudományok és nemzetközi kutatási projektek fókuszába került (Szlávik 2003; Gauzer és Bartha 1999; Illés és Konecsny 1999; Szalai 2003; Konecsny 2002; Dövényi 2005; Schweitzer 2001; Nováky 2000, 2003; CLAVIER Projekt). Meg kell említeni, hogy az eddig megjelent tanulmányok – történelmi okokból fakadóan – csak a folyó egyes részvízgyűjtő területeivel foglalkoznak. Saját kutatásaim célja a Tisza teljes, azaz a 157 200 km² kiterjedésű vízgyűjtője jövőben várható klímaváltozásának és hatásainak bemutatása. A változó éghajlati tényezők új feladatok elé állítják a vízgazdálkodást és az ezzel rokon tudományokat, mivel a hidrológiai adottságok szoros kapcsolatban vannak az éghajlati komponensekkel (Nováky 2000). E tanulmányban – a vízgazdálkodás szempontjából fontos éghajlati tényezőt – a csapadék éven belüli eloszlásának tér- és időbeli változásait mutatom be a Tisza vízgyűjtőjén, valamint ennek hatását a Tisza vízhozamának várható alakulására.

Módszer

Munkám alapjául az „ENSEMBLES” (<http://ensembles-eu.metoffice.com/>) területre lefuttatott regionális klímamodell (REMO) által produkált órás adatok szolgáltak. A vizsgált időszak hossza harminc év. A kontroll időszak az 1961-től 1990-ig terjedő időszak, a vizsgált jövőbeli időtartomány: 2061–2090 (éghajlati forgatókönyv).

A REMO mozaikszó, amely a „Regionales Klimamodell”-ből származik. Ez olyan háromdimenziós, regionális légköri cirkulációs modell, amelynek alapjául az ECHAM4 (globális cirkulációs modell) fizikai parametrizációja és a Német Meteorológiai Szolgálat időjárás-előrejelző modelljének (Europa Modell) dinamikája szolgált (Jacob 2001, Semmler és Jacob 2004) (1. ábra).



1. ábra. A regionális klímamodell (REMO) felépítése

A regionális klímamodellt az 1990-es években, a Max Planck Meteorológiai Intézetében, a Balti-tenger vízgyűjtő területének jobb megismerése érdekében fejlesztették ki. A REMO sajátos koordinátarendszert alkalmaz: pólusának kiválasztása úgy történik, hogy a képzeletbeli egyenlítő a kiválasztott terület közepén halad keresztül. A REMO vertikálisan egy hibrid koordinátarendszer, aminek az a lényege, hogy a földfelszínen felszínkövető, a légkörben nyomásérzékelő koordinátarendszerként működik, a kettő között pedig folyamatos átmenet van. A vertikális szintek száma 49 lehet. A modell különböző horizontális felbontással rendelkezik, a jelen tanulmányban felhasznált adatok $0,44^\circ$ (kb. $50 \times 50 \text{ km}^2$), az érvényességi futtatás adatai $0,167^\circ$ ($18 \times 18 \text{ km}^2$) horizontális felbontásúak. A REMO modell kezdeti és határfeltételeit a durva horizontális felbontású globális klímamodellek adatai szolgáltatják. A múlt éghajlatának a regionális klímamodell általi szimulálásához az ECMWF reanalízis¹ (ERA40) és az ECHAM5 globális klímamodell által létrehozott adatokat alkalmazzák. Az ECHAM5 modell adatai alkalmasak a REMO-val történő előrejelzések készítésére is. A prognózisokhoz szükséges a különböző üvegházhatású gázok kibocsátása mértékének figyelembevétele (IPCC SRES² A2, A1B vagy B1).

Munkámban az A1B³ szcenárióval számolt, jövőre vonatkozó adatokat használtam fel. A múlt éghajlatának modellezéséhez felhasznált ERA40 reanalízis-adatok alkalmazásakor (érvényességi futtatás) elért eredmények alkalmasak a mért adatok összehasonlítására, ezen keresztül vizsgálható a modell pontossága (Jacob et. al. 2001, 2007). A jövőbeni és a kontroll-időszakban történt szimuláció összehasonlításából az éghajlatváltozás nagyságára következtethetünk.

Az elemzett modell-adatok nagyság- és térbeli eloszlásának ábrákon történő bemutatása a GRADS (Grid Analysis & Display System) segítségével történt.

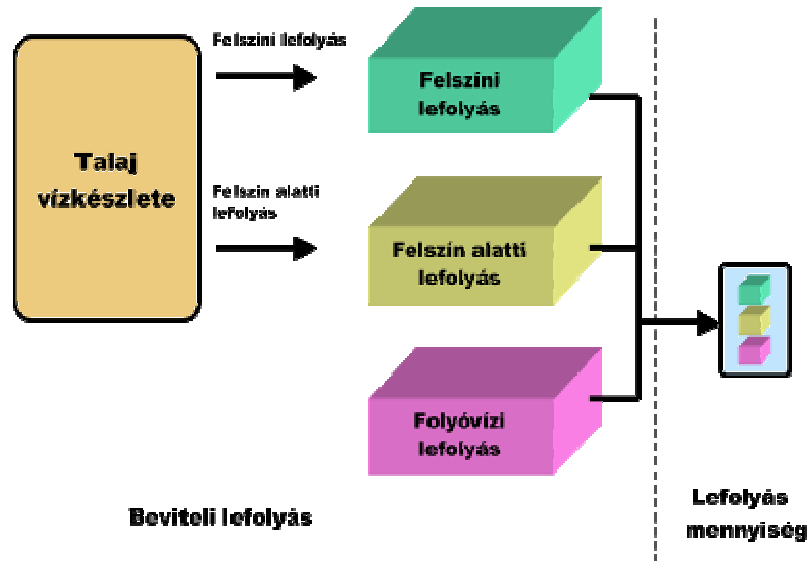
Kutatásom második részét a HD (Hydrological Discharge) modell alkalmazása és a Tisza jövőbeni vízhozam változás szignáljának meghatározása alkotta a zentai szelvényben. A Tisza vízhozamának vizsgálatakor a megfigyelt időszak húsz év, a kontroll időszak 1971-től 1990-ig tart, a modellezet jövőbeni időtartomány: 2071-2090. A HD modell a földfelszín egészén modellezi a

¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: a legfontosabb meteorológiai változókat állította elő, az egész földfelszínt lefedő 3-dimenziós rácsra vonatkozóan, az 1957–2002 időszakra, 6 órás felbontásban, a múltbeli mérési adat felhasználásával és a modellek előrejelzései segítségével.

² Klímaváltozási Nemzetközi Szakértői Bizottság (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], Special Report on Emissions Scenarios [SRES]), <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/089.htm>

³ Az A1 cselekmény és forgatókönyvcsalád egy olyan jövő világot ír le, amelyben nagyon gyors a gazdasági növekedés. A globális népesség, amely az évszázad közepén tetőzik, utána csökken. Gyors az új és hatékonyabb technológiák bevezetése. A legfőbb alaptémák a régiók közötti konvergencia, kapacitásépítés és növekvő kulturális és szociális kölcsönhatás, miközben csökkennek az egy főre jutó jövedelmek közötti regionális különbségek. Az A1 forgatókönyvcsalád három csoportba fejlődik, amelyek az energiatermelő rendszerek technológiai változásának alternatív irányait írják le. A három A1 csoportot az alábbi technológiai hangsúlyok különböztetik meg: erősen fosszilis (A1FI), illetve nem fosszilis energiaforrások (A1T), vagy egyensúly az összes forrás között (A1B).

felszíni laterális lefolyást. A napi felszíni és a felszín alatti lefolyási adatok szolgáltatják a modell számára az input adatokat. A HD modell horizontális felbontása 0,5°. Egy rácskocka lefolyási mennyisége három komponensből áll: felszíni lefolyás, a talajvízi lefolyás és a folyók lefolyásmennyisége (más rácskockából jövő vízhozam) (Hagemann 1998, Hagemann és Jacob 2007) (2. ábra). A lefolyás modell a légköri-óceáni ECHAM5 globális klímamodell (Atmosphäre-Ozean GCMs ECHAM5-MPI-OM; Latif et. al. 2003) egyik része. A REMO adatok alkalmazása érdekében Kotlarski, S. lehetővé tette a transzformálását a HD modell 0,5°-os felbontásához, így a regionális klímamodell adatait alkalmaztam a Tisza várható vízhozamának jövőbeni modellezéséhez.



2. ábra A lefolyás modell (HD) felépítése (Hagemann 1998)

A Tisza vízgyűjtő területe

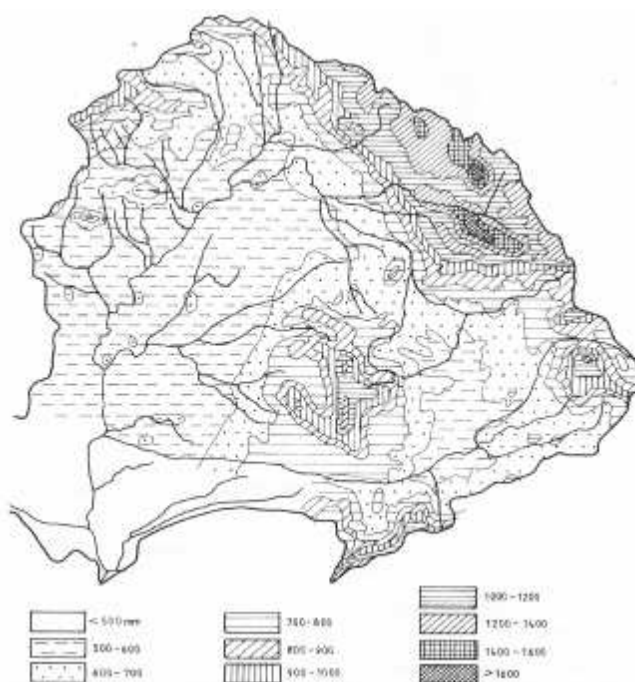
A Tisza 157 200 km² kiterjedésű vízgyűjtő területe Európában a tizedik legnagyobb vízgyűjtő (3. ábra). A folyó a Kárpát-medence K-i részének vizeit gyűjti össze. A Máramarosi-havasokban ered és 946 km megtétele után éri el Titelnél erózióbázisát, a Dunát. Legnagyobb mellékfolyói a Maros 30 332 km², a Szamos 15 882 km² és a Bodrog 13 579 km² kiterjedésű vízgyűjtő területtel.



3. ábra. A Tisza vízgyűjtő területe (www.grid.unep.ch/.../map/images/tisza_basinb.gif)

A vízgyűjtő terület 24 %-a hegyvidékhez, 34 %-a dombvidékhez és 42 %-a pedig síkvidékhez tartozik. Vízválasztója Ny és DNy felől elmosódik, így ezekből az irányokból nyitott. Az Erdélyi-

szigethegység két részre osztja: ettől Ny-ra síkság, K-re pedig a 200–500 m átlagos magasságú dombvidék. A domborzat szerepe a csapadék térbeli eloszlásában érvényesül jelentősen. Ebből a szempontból erősen érezteti hatását a Magas- és az Alacsony-Tátra „esőárnyékoló” hatása, és az Erdélyi-medence zártsága (Lászlóffy 1982). A vízgyűjtő területen többnyire a Ny-i és a DNy-i irányból érkező, páradús légtömegek uralkodnak. Ezeket az áramlatok irányára merőleges hegyvonulatok felemelkedésre kényszerítik, az ennek során fellépő adiabatikus lehűlés (Andó 2002) csapadéktartamuk egy részét kicsapódásra kényszeríti. A domborzati tényezők fokozzák az esőgyakoriságot, az uralkodó légáramlatoknak kitett lejtők csapadékban gazdagok, míg az ellenkező oldalak csapadékban szegények. A legnagyobb évi csapadékmennyiséget (1700 mm-t) a vízgyűjtő területen a Máramarosi-havasokban, a Sopurka-patak völgyében mérték. A mérések szerint a csapadék nem a hegytetőkön, hanem a hegyoldalakon éri el maximumát (Lászlóffy 1982). A sokéves évi csapadékmennyiség a Nagykunságban viszont csak 500 mm körüli: ez a vízgyűjtő csapadékban legszegényebb része (4. ábra).



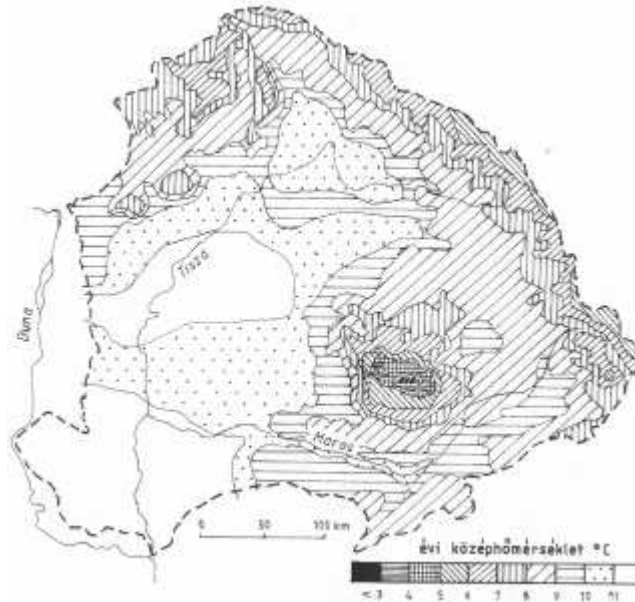
4. ábra. A Tisza vízgyűjtő területének átlagos évi csapadéka (mm) (Hajósy 1954)

A mérsékelt égövi kontinentális klímához tartozó vízgyűjtő területen nyári csapadékmaximum jellemző. Télen a szárazföld felett uralkodó magas légnyomás nem kedvez a nyugati légáramlatok Kárpát-medencébe való betörésének. Ősszel a mediterrán ciklonok hatása figyelhető meg, ezek október végén és november elején másod-csapadékmaximumot eredményeznek. Az Alföldön júniusban hull a legtöbb csapadék, míg a január és a február a legszárazabb. A hegyvidéken a csapadék térbeli eloszlásában a domborzat hatása érvényesül. Zártsága miatt az Erdélyi-medencében nem érzékelhető az őszi másod-csapadékmaximum. A tél rendkívül csapadékszegény, mert az uralkodó D-i és DNy-i légáramlatok már a Kárpátok koszorújának D-i oldalán elveszítik páratartalmuk nagy részét.

A téli csapadék általában hó formájában hull. A mérések alapján 100 m magasságban 65, 1000 m felett pedig már 150 napos hóborítottsággal lehet számolni. A felhalmozódott hó mennyisége nagy része májusra elolvad, ami tavaszi árhullámmal eredményez a Tiszán és a mellékfolyókon.

A Tisza vízgyűjtőjén a hőmérséklet D-ről É felé, ill. a magasság növekedésével csökken. A hőmérséklet térbeli eloszlásában az óceán szerepe is érzékelhető: nyáron Ny-ról K felé növekszik, télen Ny-ról K-re csökken. A legmagasabb évi középhőmérséklet az Alsó-Tiszánál figyelhető meg,

értéke eléri a 11 °C-ot. A Gyalui-havasok egyes részein az átlagos évi középhőmérséklet nem éri el az 5 °C-ot. A hőmérséklet évi eloszlását tekintve, a leghidegebb hónap a január, a legmelegebb a július (5. ábra). A párolgás évi mennyisége szoros összefüggésben van a hőmérséklet évi járásával. A legnagyobb átlagos páratartalom az Alföldön és az Erdélyi-medencében figyelhető meg, amely alatta marad a potenciális párolgásnak, így aszályos területek alakulhatnak ki.



5. ábra. Az évi középhőmérséklet megoszlása a Tisza vízgyűjtő területén (VITUKI 1959)

A vízgyűjtő terület jelenleg öt államhoz tartozik. Ukrajna 8,1%-kal (12 800 km²) részesedik a vízgyűjtőből, Románia erdélyi részére 45,4 % (71 300 km²) jut. Kelet-Szlovákiához 9,8 % (16 000 km²) tartozik, 47 ezer km² (29,4 %) Magyarország területének része. Szerbia részesedése a legkisebb: 6,5 % (10 100 km²).

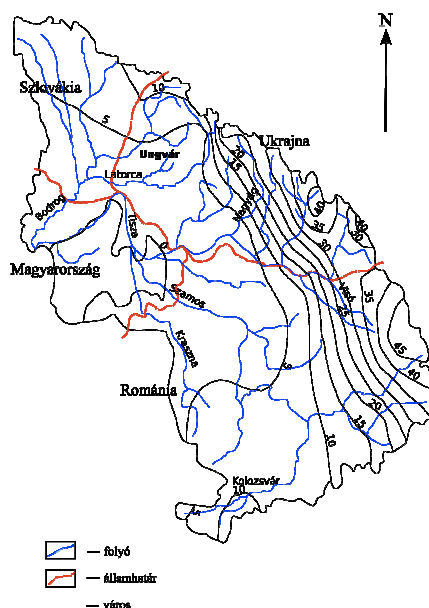
Eredmények

Napjainkig az 1,2–1,0 millió évvel ezelőtt kezdődött valódi jégkorszak hideg (glaciális) és meleg (interglaciális) időszakainak váltakozása figyelhető meg (Schweitzer 2004). Ma egy interglaciális időszakban vagyunk. A földtörténet során a klíma állandóan változott, így a Tisza vízgyűjtő területén is. Az Ős-Tisza hordalékkúpjának fedő üledékei trópusi, sztyepi és periglaciális klímáról tanúskodnak (Radvánszky és Izsák 2005). A jelenlegi felmelegedést természetes folyamatként kell kezelnünk, a kérdés csupán az, hogy a bolygónkon megfigyelhető globális felmelegedésben az emberi tevékenység milyen szerepet játszik. Az éghajlati változások következményeként fellépő jelenségek a társadalom szempontjából veszélyhelyzetet, természeti katasztrófát teremthetnek. A regionális és a globális klímamodellek által készíthető éghajlati scénáriók lehetőséget adnak az éghajlati változásokból fakadó veszélyekkel szembeni felkészülésre vagy azok megelőzésére.

Érvényességi futtatás

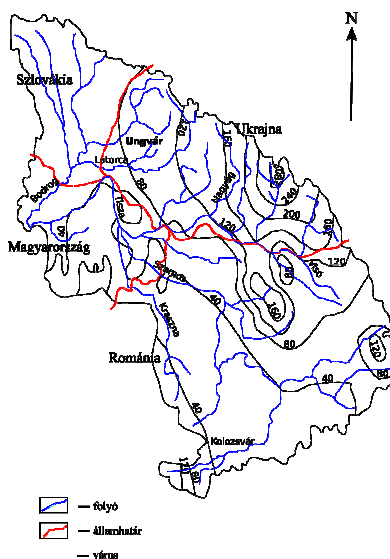
Első lépésben megvizsgáltam a REMO pontosságát a 2001. évi felső-tiszai árvízi esemény példáján. 2001. március elején katasztrófális természeti esemény következett be a Felső-Tiszán: Kárpátalja területén több helyen átszakította a töltést a víz. Magyarországon 1919 óta másodszor okozott töltésszakadást a 2001-ben levonuló ár (Szlávik és Fejér 1998; Vágás 1982). A magas vízállás kialakulásának nem voltak előre látható jelei. A Kárpátok ÉK-i részében a hőmennyiség a sokéves átlag alatt volt. Az év első két hónapját enyhe időjárás jellemezte, a csapadék eső formájában érte el a felszínt. Február 21–28. között volt jelentős havazás, de a hónap végére

kialakuló hómenyiségben tárolt vízkészlet ($2,1 \text{ km}^3$) elmaradt a sokévi átlagtól ($3,7 \text{ km}^3$) (Szlávik 2003). 1000 m feletti magasságban átlagosan 40 cm volt a hóvastagság és 70 mm-nyi hóvízkészlet halmozódott fel (6. ábra).



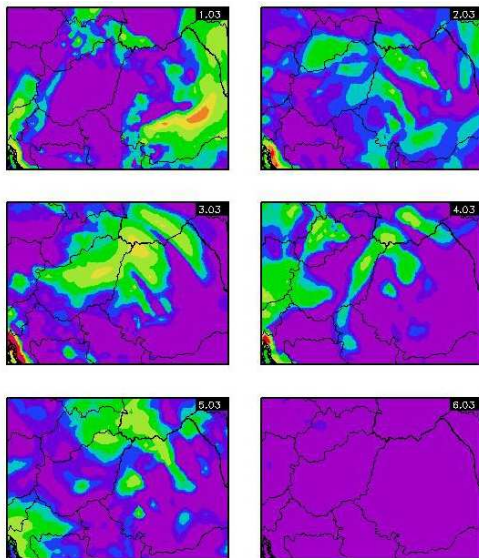
6. ábra. A hóvastagság a Felső-Tisza felett február 21–28. között (mm) (FETIVÍZIG 2004)

A 2001. március 3-án kezdődött ciklontevékenység hatására nagy mennyiségű csapadék hullott. Március 3–5. között a lehullott csapadék összegzett területi átlaga 132 mm volt, a lokális csapadékmennyiségek pedig a 250–300 mm-t is elérték (Körösmező 259 mm, Oroszmokra 296 mm). A három nap alatt lehullott csapadék területi eloszlását a 7. ábra mutatja be. A hőmérséklet ebben az időszakban 10°C fölé emelkedett és a 0°C -os izoterma már 2000 m felett volt. A Felső-Tisza vízgyűjtőjére hullott nagy mennyiségű csapadék és a hirtelen felmelegedés következtében kialakult olvadékvíznek csak kis hányada tározódott a talajban. A talaj telítve, a magasabb régiókban pedig fagyott volt, s a lombtalan vegetáció is a gyors lefolyást segítette elő. Március 4-én hajnalban a folyókon heves áradások kezdődtek.

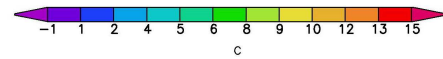
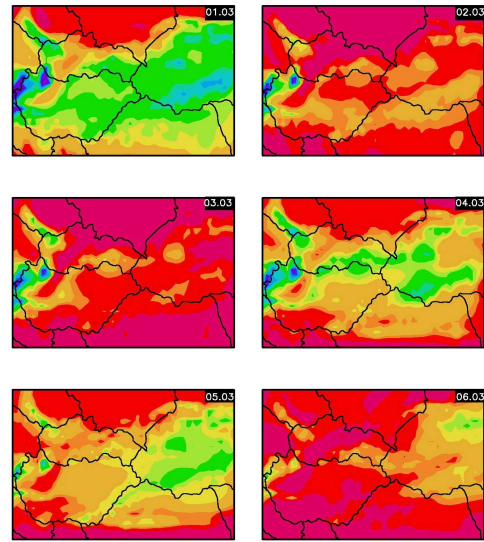


7. ábra. A lehullott csapadékmennyiség a Felső-Tisza felett március 3–5. között (mm) (FETIVÍZIG 2004)

A REMO érvényességi futtatás adatai alapján megvizsgáltam, hogy kimutatja-e az éghajlati szimuláció a fent leírt pusztító árvíz okát. (Az alkalmazott modell klíma-, nem pedig meteorológiai modell, ennél a vizsgálatnál ezt nem szabad figyelmen kívül hagyni.) Az eredmény: a vízgyűjtő területen lehullott napi csapadékmennyiségek maximuma 2001. március 1–5. között, az Északkeleti-Kárpátok területén figyelhető meg, a mért adatokkal egyezően, ami végül a Felső-Tiszán kialakult természeti katasztrófához vezetett (8. ábra). A modell 10–30 mm napi csapadékmennyiséget jelzett a folyó forrásvidékére a megfigyelt napokra és a hőmérséklet is a modell szerint 10 °C fölé emelkedett (9. ábra).



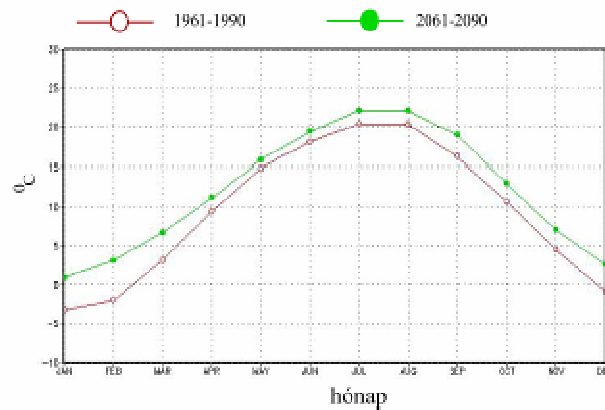
8. ábra. Napi csapadékmennyiség
 2001. március 1–6. között (mm)



9. ábra. Napi középhőmérséklet
 2001. március 1–6. között (°C)

A Tisza vízgyűjtő területének hőmérsékleti viszonyai

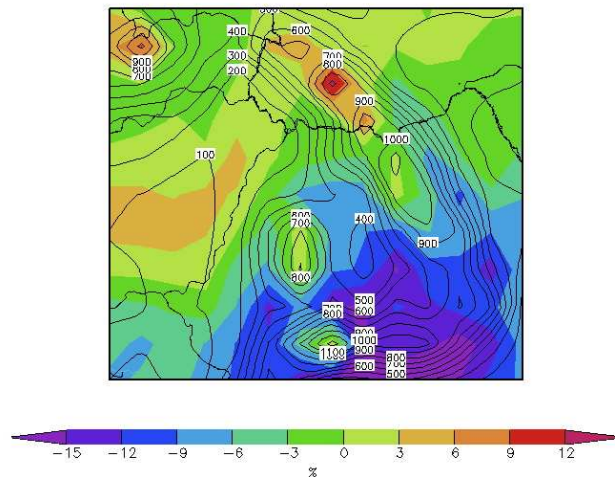
A hőmérséklet és a csapadék viszonyát vizsgálva, elmondhatjuk a Clausius-Clapeyron egyenlet alapján, hogy az átlagos hőmérséklet növekedése fokozza a globális vízkörzést (Grassl 2004), mely egyuttal hatással van az exogén erőkre. A hőmérséklet más éghajlati tényezők (párolgás, hőmennyiség) alakulását is meghatározza. A vízgyűjtő terület hőmérséklete júliusban éri el a maximumát, minimuma januárban van. A havi átlagos hőmérsékletek a jövőben (2061/2090–1961/1990) az év minden hónapjában, növekedni fognak (10. ábra).



10. ábra. Havi hőmérsékletváltozás a Tisza vízgyűjtő területén

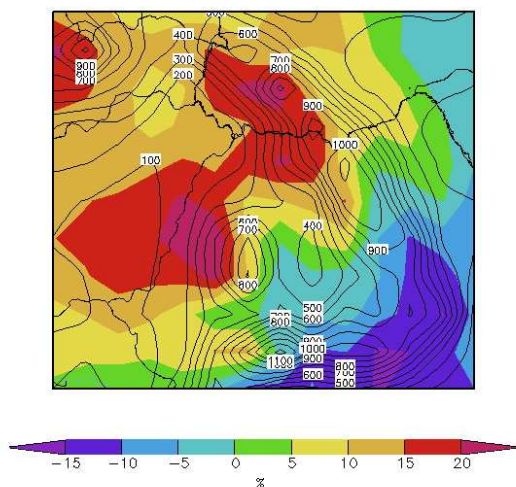
A vízgyűjtőterület csapadékviszonyai

A vizsgálat eredményei alapján megállapítható, hogy a csapadékmennyiség változásának nagysága 2061–2090-ben, az 1961–1990-es időszakhoz viszonyítva, térben és időben különböző lesz. A modell szerint azon évek száma, amelyekben az évi csapadékmennyiség 700 mm felett van, 31,25%-kal csökken, az 550 mm-nél kevesebb évi csapadékmennyiséggel jellemzett évek száma pedig háromszorosára nő. Éves csapadéknövekedés a Tisza-vízgyűjtő síksági részén (max. 6%) és az Északkeleti-Kárpátok területén (6–9%) várható. A legnagyobb csökkenést a jövőben az Erdélyi-medencében szenved el, a csökkenés mértéke 6–15% (11. ábra) (Radvánszky és Jacob 2008).



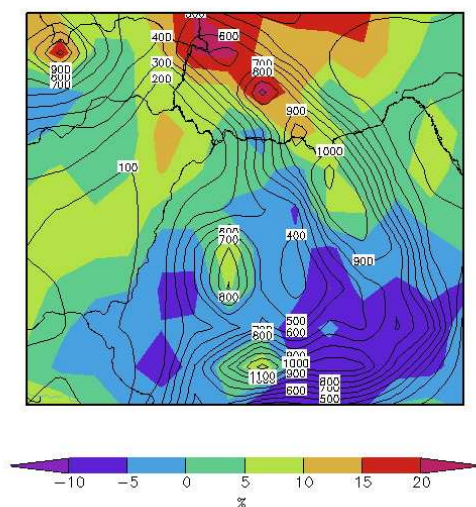
11. ábra. Relatív átlagos évi csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

A csapadék éven belüli várható eloszlása több gyakorlati fontosságú kérdés tisztázásához nyújt segítséget, úgy a vízgazdálkodásban, mint a mezőgazdaságban. Az éven belüli csapadékeloszlásnál megvizsgáltam az évszakos és a havi várható eloszlás nagyságát. A jövőbeni csapadék szezonális eloszlásában is változás következik be. Télen a csapadékmennyiség csökkenése figyelhető meg az Erdélyi-medencében. A csökkenés számított értéke 5%. A vízgyűjtő terület többi részén pedig téli csapadékmennyiség-növekedést jelez a modell. A legnagyobb növekedés (15–20%), az Ung, a Latorca, a Felső-Tisza és a Körösök vízgyűjtő területén várható (12. ábra).



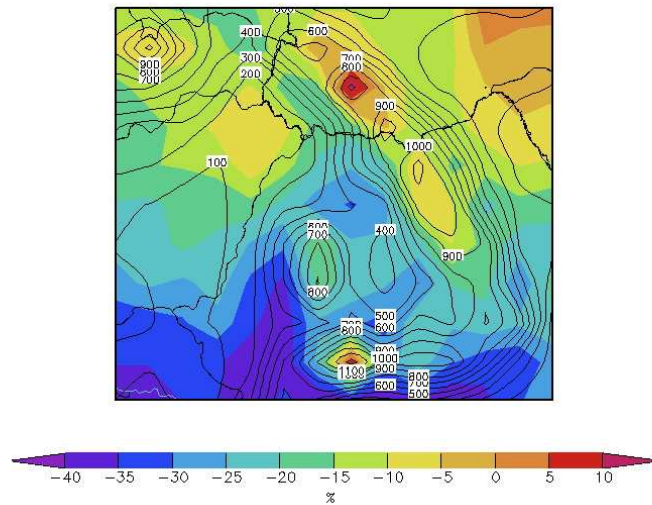
12. ábra. Relatív átlagos téli csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

Tavasszal a téli időszakhoz képest az Erdélyi-medencére prognosztizált csapadékmennyiség-csökkenés területe Ny és ÉNy felé növekszik. Relatív pozitív anomália figyelhető meg a Nyírség felett, amely nyáron is kialakul (13. ábra).

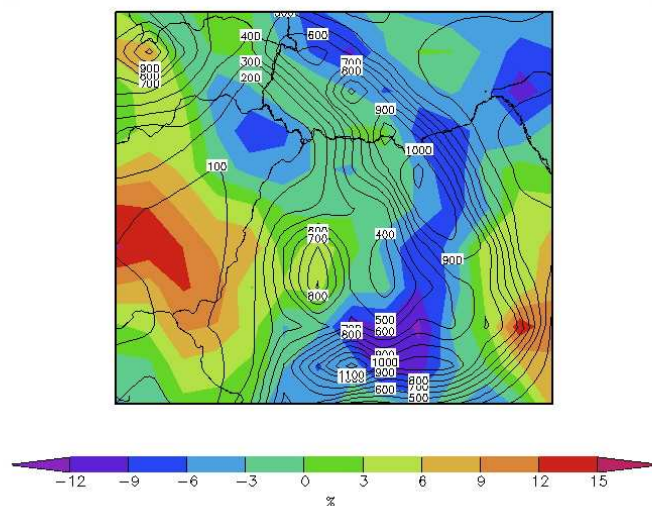


13. ábra. Relatív átlagos tavaszi csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

A nyári időszakban – a vizsgált jövőbeni harminc éves periódusban –, a kontroll-időszakhoz képest a teljes vízgyűjtő területen csak a Máramarosi-havasokban várható kb. 5–10%-os szezonális csapadékmennyiség növekedés (14. ábra). Ha a Nagy-Bihar (1849 m) és a Király-hegy (1948 m) között képzeletbeli tengelyt húzunk, akkor a tengelytől DNy-ra az őszi csapadékmennyiség változás pozitív, ÉK-re pedig negatív. A legnagyobb pozitív változás értéke (12–15%) a Közép-Tiszán várható (15. ábra).

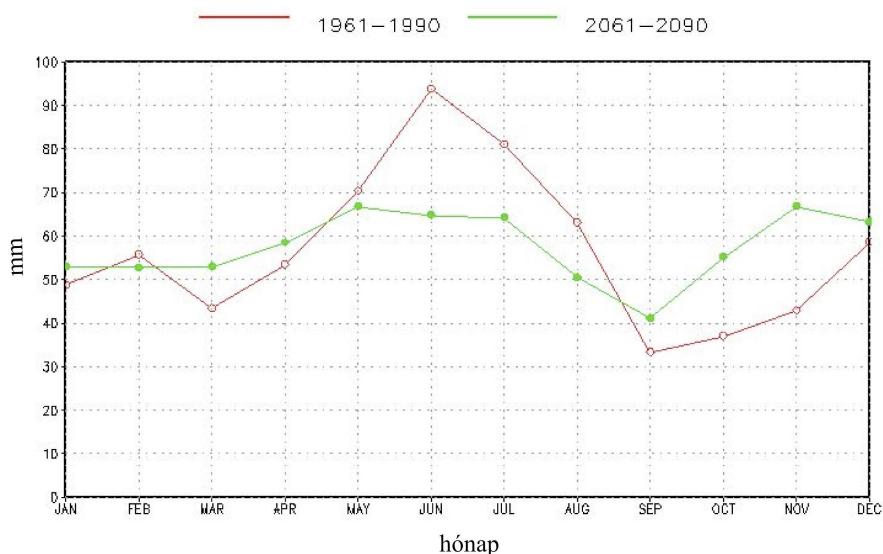


14. ábra. Relatív átlagos nyári csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)



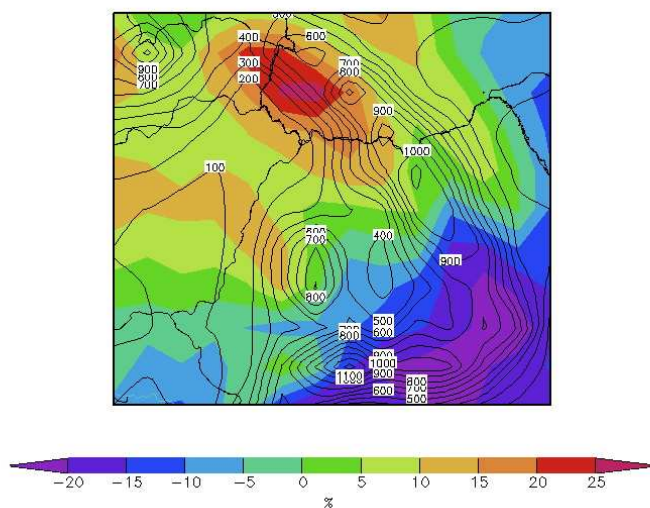
15. ábra. Relatív átlagos őszi csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

Az éven belüli csapadékeloszlást tekintve, a modell az átlagos havi csapadékmennyiség csökkenését jelzi februárban, májusban, júniusban, júliusban és augusztusban. Az év többi – főleg őszi – hónapjában növekedés várható. Az évi csapadékmennyiség nyár eleji első maximuma csökken, őszi másodmaximuma pedig növekszik. A mennyiségi változások egyenletesebbé teszik a csapadék éves járását a megfigyelt Szenárió-időszakban (16. ábra).



16. ábra. Havi csapadékmennyiség-változás a Tisza vízgyűjtő területén

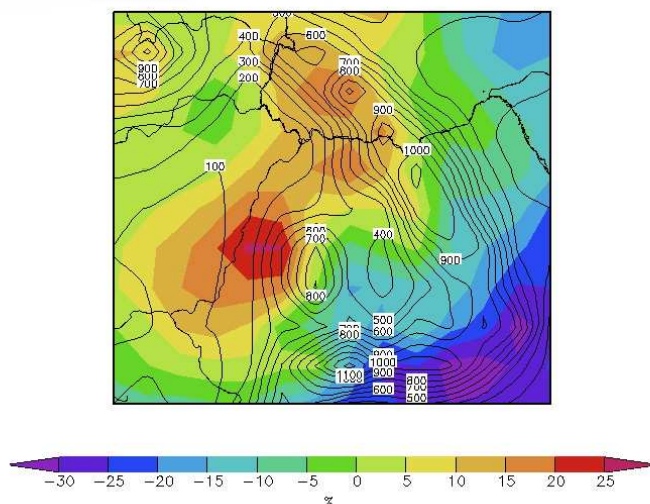
Januárban a Tisza vízgyűjtő területének jelentős részén növekvő csapadékmennyiséget prognosztizál a modell, kivétel az Erdélyi-medence. A legnagyobb pozitív változás, a scenárió-időszakban a kontroll-időszakhoz képest, a Latorca és a Borzsa vízgyűjtőjének forrásvidékén várható. Az előrejelzett havi csapadékmennyiség változás nagysága meghaladhatja a 25%-ot. A Mezőségtől délre a csökkenés értéke elérheti a 10%-ot (17. ábra).



17. ábra. Relatív átlagos januári csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%)

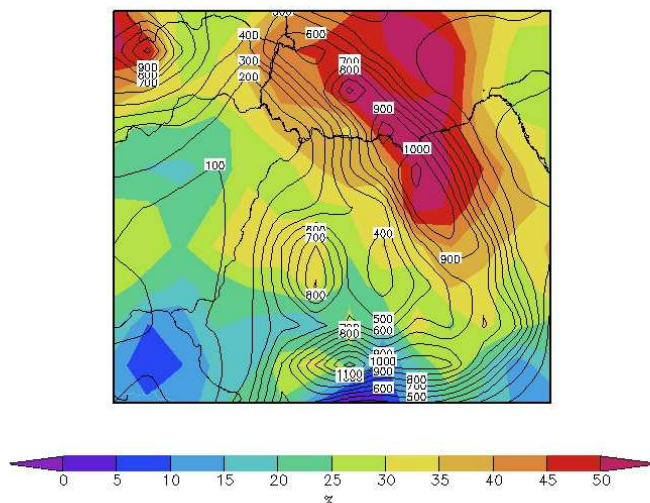
(A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

Januárt követően februárban az Északkeleti-Kárpátokban, az Erdélyi-szigethegység esőárnyékos oldalán és a Szamos vízgyűjtőjén várható havi csapadék növekedés. A legnagyobb pozitív változás a Bihar-hegység Ny-i oldalán lesz 20–25% meghaladóan. Ismét az Erdélyi-medence szenved el a legnagyobb csapadékmennyiség csökkenést (0–15%). Érdekes megemlíteni, hogy a Sajó és a Hernád vízgyűjtőjén egy relatív csökkenés figyelhető meg (0–5%), az Északi-Középhegység területén várható növekedéshez képest (18. ábra).



18. ábra. Relatív átlagos februári csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

A tavasz első hónapjában, a Tisza vízgyűjtőjének egész területén csapadék növekedést jelez a szcenárió-időszakban a regionális klímamodell. Különösen a Felső-Tisza vízgyűjtőjének legmagassabb régióiban várható a legnagyobb eltérés, mintegy 45–50%-os növekedés a kontroll-időszakhoz viszonyítva. Az Erdélyi-medence is 20–30%-os növekedésben részesül. A Tisza alsó szakaszán a növekedés nagysága 10%. A Sajó és a Hernád vízgyűjtőjének esőárnyékos területein nagyobb értékű klímaváltozási szignállal számolhatunk, mint a Tisza középső szakaszán (19. ábra).

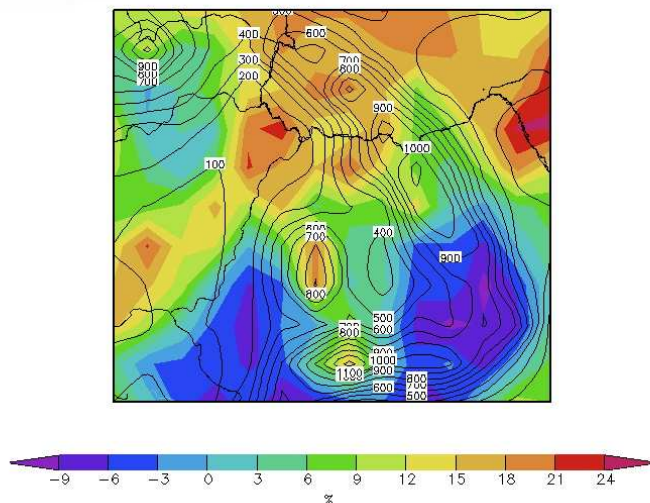


19. ábra. Relatív átlagos márciusi csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%)

(A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

Áprilisban a változások térbelisége igen differenciált és a növekedés várható nagysága jóval elmarad a márciusitól. Az előző hónaphoz hasonlóan a növekedést a folyó vízgyűjtőjének É-i területén jelzi a modell, valamint a Nyírség, Beregi-síkság és a Duna-Tisza köze között húzott tengely mentén és az Erdélyi-szigethegység tetőrégióiban. A legnagyobb, 21–24%-os pozitív változással a Beregi-síkság D-i és a Nyírség É-i területein számolhatunk. A legnagyobb negatív

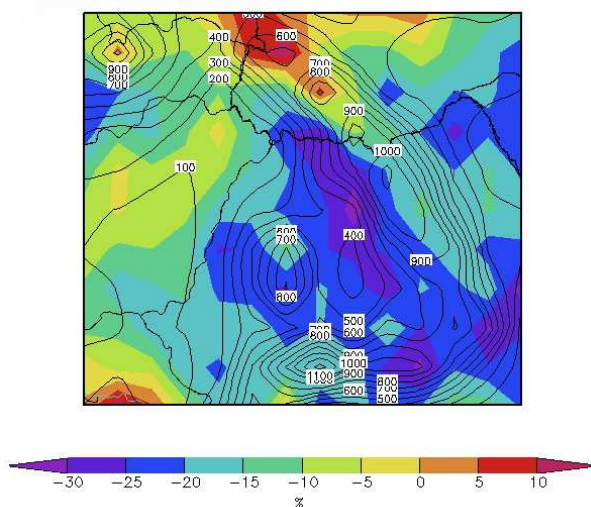
változás a Maros alsó szakaszán jelentkezik, melynek nagysága eléri 6–9%-ot. A Bükk és a Mátra területén is relatív csökkenés figyelhető meg (20. ábra).



20. ábra. Relatív átlagos áprilisi csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

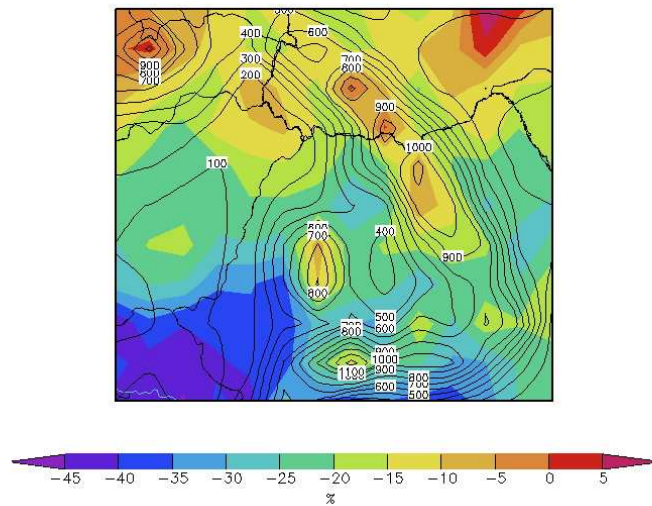
Az átlagos májusi csapadékváltozás előjele az össz-vízgyűjtőterületen negatív. A Keleti-Kárpátok területén várható a csökkenés legnagyobb értéke, főleg a Kelemen- és a Radnai-havasokban, több mint 30%. A Tisza alföldi szakaszán a változás értéke alacsonyabb mint -5%. A nyár eleji csapadékmáximum a kontroll-időszakban már májusban kezdődik, melyet egy relatíve kisebb csapadékmennyiségű június követ, és júliusban ismét növekszik a havi csapadékmennyiség. A jövőbeni időszakra a májusi csapadékmáximum júniusra tolódik (Radvánszky és Jacob 2008), ezzel a május – az eltolódásból fakadó – havi átlagos csapadékcsökkenést mutat (21. ábra).

A májusi havi csapadékmennyiség júniusra való eltolódása ellenére is a júniusi csapadékmennyiség változás értéke negatív a szenári-időszakban a kontroll-időszakhoz képest a Tisza vízgyűjtő területén.



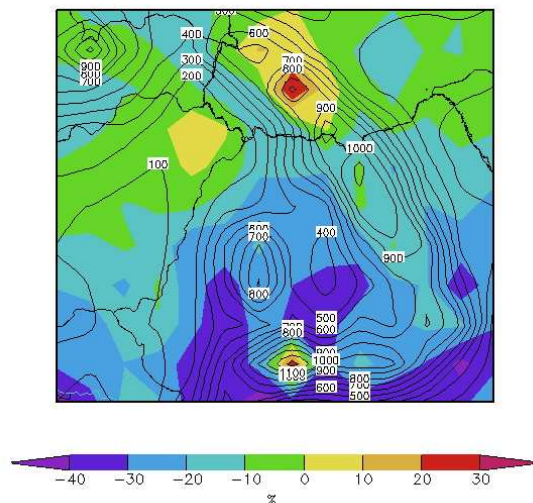
21. ábra. Relatív átlagos májusi csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

A legnagyobb, 35– 45%-os csökkenést a modell az Alsó-Tiszára és a Maros alsó szakaszára prognosztizálja. Legkisebb csökkenés a Máramarosi-havasokban és Latorca vízgyűjtőjének DNy-i területein várható (0– -10%) (22. ábra).



22. ábra. Relatív átlagos júniusi csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

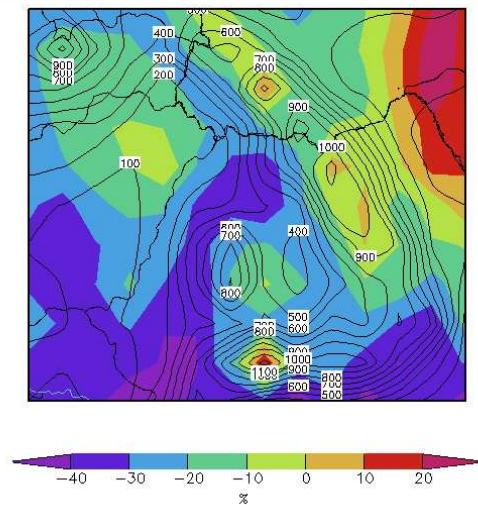
Júliusban a csapadékmennyiség növekedését az Északkeleti-Kárpátok és a Nyírség területén jelzi a modell a Szenario-időszakban. A pozitív változású területek élesen elkülönülnek a negatív változású területektől. A Máramarosi-havasok ÉNy-i részén 10–30%, a Nyírségben pedig 10–20%-os eltérést mutat a modell. Az Alföld északi területein a csökkenés értéke a 0–10% között van, délen pedig 10–30% körüli (23. ábra).



23. ábra. Relatív átlagos júliusi csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

Augusztusban a havi átlagos csapadékmennyiség negatív irányú elmozdulását jósolja a REMO a Tisza vízgyűjtőjén. Legnagyobb csökkenést, 30–40%-ot, a Közép-Tiszára, a Körösök- és a Szamos forrásvidékére jelez a modell. A Nyírség és az Erdélyi-medence Ny-i része relatíve kevesebb havi csapadékmennyiség csökkenést fog elszenvedni az előrejelzés alapján, mint a szomszédos területek.

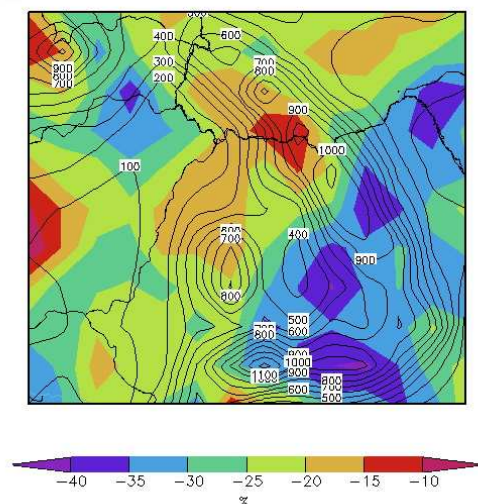
Pozitív változás (max. 10%), csak a Máramarosi-havasokban várható (24. ábra).



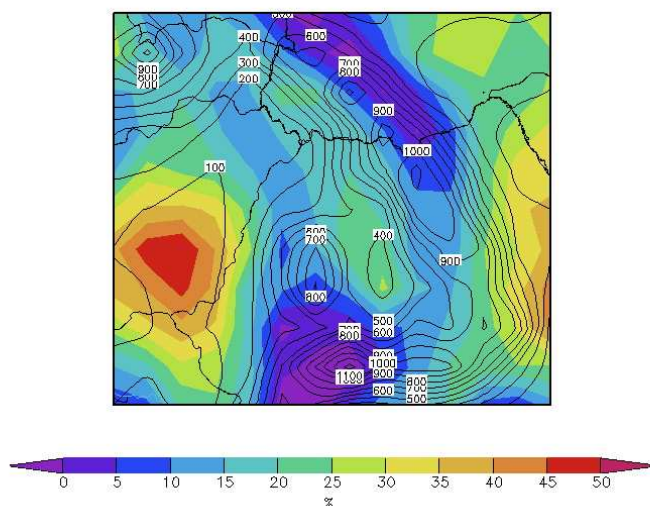
24. ábra. Relatív átlagos augusztusi csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

Az előrejelzés alapján szeptemberben is folytatódik a havi átlagos csapadékmennyiség csökkenése a 157 200 km² -en. A szeptemberi csökkenés értékeinek nagysága térben jobban elkülönül, mint augusztusban. A legkisebb csökkenés értéke 10–15%, a Visó, az Iza, a Tarac és a Fekete-Tisza vízgyűjtőjén és a Közép-Tisza Ny-i vízgyűjtő területén várható. Ettől nagyobb -20– -25%-os értékű változással kell számolni az Avas D-i és az Erdélyi-szigethegység É- és ÉNy-i előterében. A legnagyobb mértékű -35– -40%-os változást jelez a modell a jövőben a Sajó, Hernád és a Tisza vízgyűjtőterület DK-i részén (25. ábra).

Októberben a mediterrán ciklonok hatására egy másod-csapadékmaximum alakul ki a Tisza vízgyűjtő területén. Az október havi csapadékmennyiség növekedése, 2061–2090 között az 1961–1990-es időszakhoz képest DNy-ról ÉK-felé csökken az Alföldön, nagyságrendileg, 50%-tól 20%-ig. A Bodrogek és a Nyírség vonalán egy relative kisebb 10–15%-os csapadékmennyiség növekedés várható. Ettől É-ra és ÉK-re a növekedés értéke elérheti a modell alapján a 20–30%-os különbséget. A legkisebb növekedési értéket, 0–5%-ot, a modell az Erdőhát és a Ruszka-havasok területére prognosztizál (26. ábra).

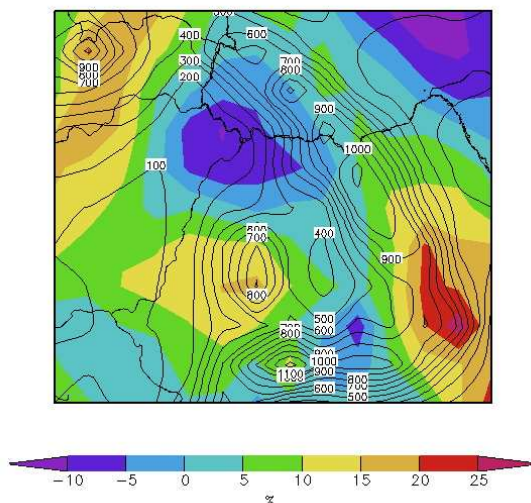


25. ábra. Relatív átlagos szeptemberi csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)



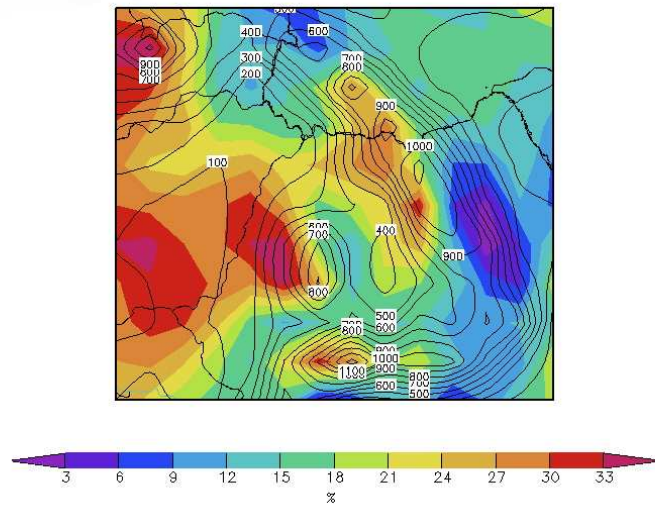
26. ábra. Relatív átlagos októberi csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

Novemberben, a vizsgált jövőbeni időszakban a kontroll-időszakhoz képest, a Tisza vízgyűjtőjének D-i és K-i területein havi átlagos csapadékmennyiség növekedéssel számolhatunk. Az Északkeleti-Kárpátok előterében, a Nyírségben és az Érmelléken pedig a csökkenés jellemző, melynek nagysága elérheti a 10%-ot (27. ábra).



27. ábra. Relatív átlagos novemberi csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

Decemberben növekedni fog az átlagos havi csapadékmennyiség a Szenário-időszakban az 1961–1990-es időszakhoz képest. A vízgyűjtőterületen a legnagyobb növekedést, 30–33%-ot, az Alsó- és a Középső-Tiszán, a Körösök vízgyűjtőjén jelzi a regionális klímamodell. A legkisebb növekedési érték, a Bodrog és az Erdélyi-szigethegység K-i, esőárnyékos részében várható (28. ábra).

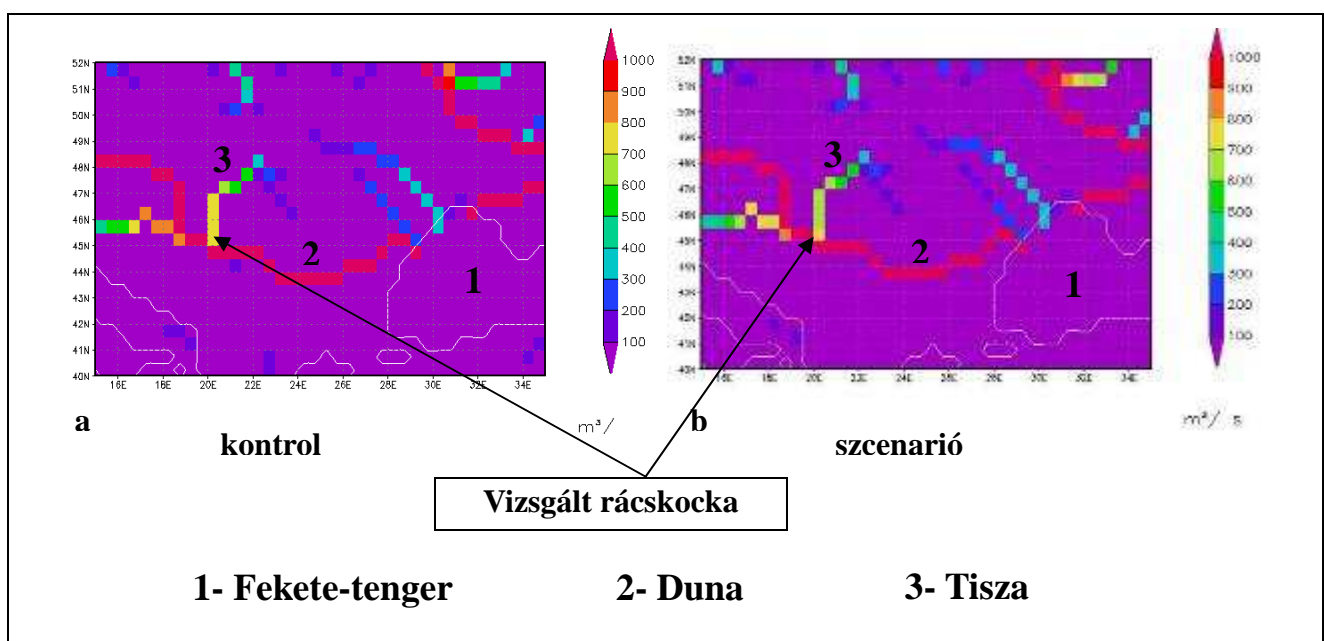


28. ábra. Relatív átlagos decemberi csapadékváltozás a Tisza vízgyűjtő területén, 2061–2090/1961–1990 (%) (A kontúrvonalon feltüntetett értékek a tszf-i magasságot jelzik)

A Tisza várható vízhozama

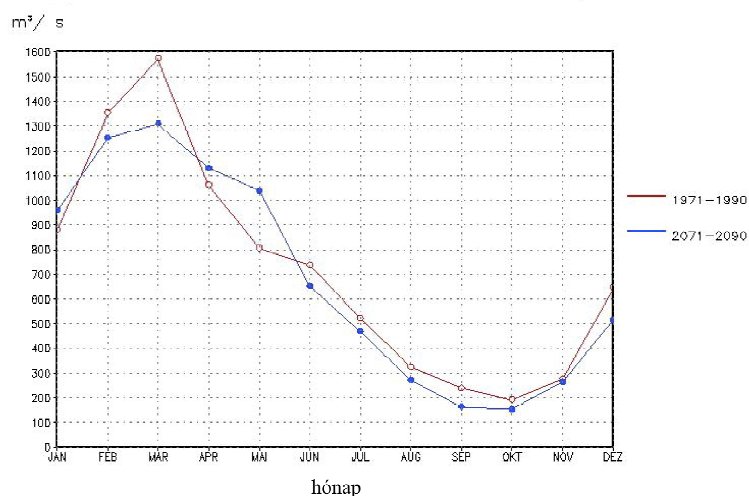
A klímaváltozás hatásai leghamarabb a folyók vízhozamában tükröződik. Szalay (2003) által végzett kutatások alapján a mért hőmérsékleti adatokat felhasználva a Tisza magyarországi vízgyűjtő területén 0,5 °C-kal nőtt az évi középhőmérséklet az elmúlt évszázadban. Egyes szelvényekre alkalmazott eseti vizsgálatok éves vízhozam csökkenést mutattak ki a XX. században (Nováky 2000). A tanulmány elején kitűzött célhoz híven, megvizsgáltuk a Tisza éven belüli vízhozam változásának nagyságát. A vizsgálat során HD modellt alkalmaztunk, bevitt adatként a REMO által produkált felszíni lefolyási adatokat használtuk. A felszíni lefolyás – szcenárió-időszak kontroll-időszakhoz viszonyított – változása, már publikálásra került (Radvánszky és Jacob 2008). Ebből kifolyólag nem térnek ki ezen részeredmények részletes ismertetésére.

A 46. északi szélességi körnél lévő Tisza rácskockájára (29. ábra) vonatkozó HD modell érvényességi futtatás adatait összehasonlítottuk a Szegednél mért lefolyási adatokkal, s ezzel a modell pontosságát teszteltük (Radvánszky és Jacob 2008).

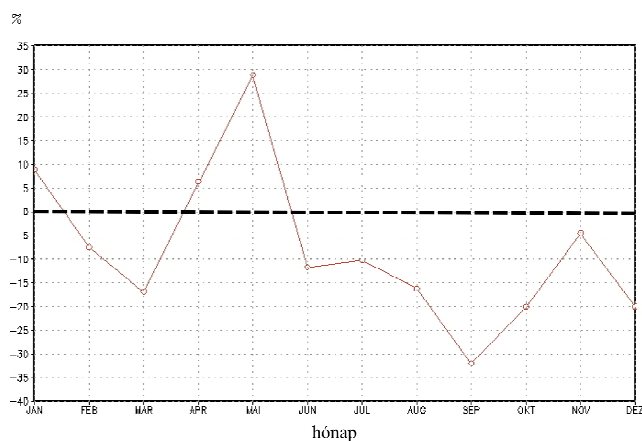


29. ábra Az átlagos évi tiszai vízhozam 1971—1990 (a) és 2071—2090 (b)

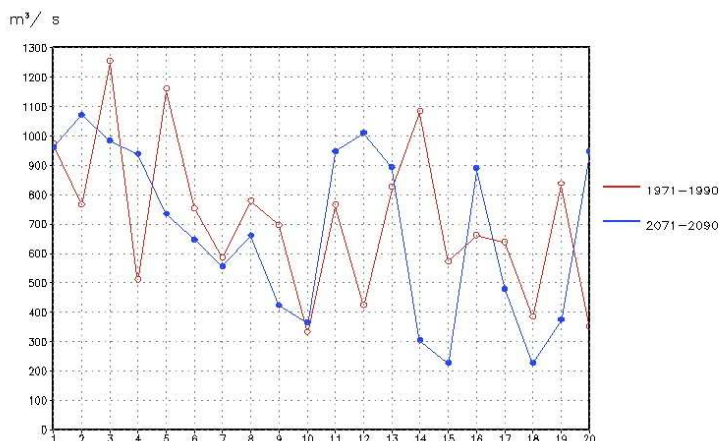
A két időszak összehasonlításának eredményeként megfigyelhető a havi lefolyás változásának szignálja, Zentánál (Senta) (30. ábra). A modell előrejelzése szerint a Tisza vízhozamában, februárban és márciusban átlagosan 12%-os csökkenés várható. Ezt követően áprilisban és májusban növekedés figyelhető meg, a Tisza torkolata előtt. Nyáron és ősszel a lefolyás mennyisége a jövőben csökkenni fog. A legnagyobb csökkenést (-31%), a modell szeptemberre jelzi (31. ábra). A kontroll- és a Szenárió-időszakban modellezett éves vízhozam mennyiség csökkenő tendenciát mutat (32. ábra).



30. ábra A közepes havi tiszai lefolyás Zentánál (m^3/s)



31. ábra Relatív havi lefolyásmennyiség változás a Tiszán Zentánál 2071—2090/1971—1990 (%)



32. ábra A közepes éves lefolyásmennyiség a Tiszán Zentánál (m^3/s)

Összegzés

A klíma folyamatos változása következtében napjainkban egy felmelegedési időszaknak vagyunk a tanúi, ennek következtében a XXI. század egyik legnagyobb kihívását a Kárpát-medencében az éghajlatváltozás jelenti.

Az átlagos havi hőmérsékletek 2061–2090 között a kontroll-időszakhoz képest növekedni fognak, ami befolyásolja a vízkörzést. Az éves csapadékmennyiség a jövőben csökkenni fog, de ez nem jelenti azt, hogy magas vízállások nem alakulhatnak ki a Tiszán és annak mellékfolyóin. A csapadékmennyiség csökkenés a hegyvidéki területeken várható. Télen és tavasz elején magas vízállás kialakulását eredményezheti a téli növekvő csapadékmennyiség a Felső-Tisza-, Szamos-, Körösök- és a Bodrog vízgyűjtőterületén, mely eső formájában fog lehullni a területre. A lehulló csapadék, ha fagyott talajra hull, akkor a talaj nem tudja késleltetni a lefolyás időtartamát, s így csökken a víz összegyűlekezési ideje. A hőmennyiség csökkenésének következtében (Radvánszky és Jacob 2008) az éves vízhozam első maximuma a Tiszán időben eltolódik. A márciusi és áprilisi átlagos csapadékmennyiség növekedése a két utolsó tavaszi hónapban nagy vízhozamot eredményezhet a Tisza torkolatánál. A nagy vízhozam következménye a magas vízállás, mely hatással van a mellékfolyók vízszint mozgására is. A problémát az okozhatja, ha a Dunán is árhullám vonul le egyidejűleg, és így a Tisza elveszítheti a hidrológiai önállóságát. Ebben az esetben hosszan elnyúló árvízi védekezésre kell majd készülni.

Csökkenni fog a nyár eleji első csapadékmaximum alkalmával lehulló csapadék abszolút mennyisége. Ebből kifolyólag várható az alacsonyabb vízhozammal levonuló zöldárak kialakulásának gyakorisága. A nyári hónapokra a modell átlagos csapadékmennyiség csökkenést prognosztizál. Növekszik ezáltal a hosszú nyári szárazságok előfordulásának esélye. A vízgyűjtőterületen kialakuló aszályos időszakok újabb kihívások elé állítják a mezőgazdaságot és az egészségügyet. A nyarat követően, októberben és novemberben az élenkülő mediterrán ciklonok hatására a másod-csapadékmaximum idején lehulló csapadék mennyisége növekszik, de így is elmaradnak az előrejelzés szerint a várható őszi havi átlagos vízhozamok a kontroll-időszakhoz képest. Az eredményekből kiderül, hogy a mediterrán ciklonok hatása nagyobb befolyással bír majd a Tisza vízgyűjtőjének éven belüli csapadékeloszlásban és a főfolyó vízhozamának alakulásában.

Bízom abban, hogy eredményeim a társadalom szempontjából a legjobb döntések meghozatalát segítik elő, hiszen a Tisza vízgyűjtő területén a XXI. század egyik legnagyobb kihívása az éghajlatváltozás lesz.

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt köszönettel tartozom a Deutsche Bundesstiftung Umwelt-nek (DBU), hogy a Max Planck Meteorológiai Intézetében végzett munkámat ösztöndíjikkal támogatták. Németországban végzett kutatásom témavezetője dr. Daniela Jacob volt, akinek szakmai irányításáért nagyon hálás vagyok. Köszönetet mondok az intézet Regionális Klímamodell csoportjának önzetlen segítségükért. Köszönöm dr. Schweitzer Ferenc doktori témavezetőm és dr. Tóth József professzor úr támogatását. Munkám eredményességéhez nagymértékben hozzájárult a Márton Áron Szakkollégium, s hálás vagyok a Kárpátaljai Felsőoktatási és Ösztöndíjbizottságnak, hogy ajánlásukkal doktori éveim során ösztöndíjban részesültem.

Irodalomjegyzék

- Alföldi L. – Schweitzer F. 2003. A Tisza vízrendszerének földrajzi és hidrológiai jellemzése. In: Teplán I. (szerk.) A Tisza vízrendszere (I. kötet). MTA Társadalomkutató Központ. Budapest, 41–51.
- Andó M. 2002. A Tisza vízrendszer hidrológiája. SZTE Természeti Földrajzi Tanszék, Szeged 168.
- Bartholy J. – Mika J. 1998. Éghajlatelőrejelzés, bizonyosságok, kételyek. Az éghajlatváltozás és következményei. Meteorológiai Tudományos Napok, 97. OMSZ, Budapest, 19–32.
- Bodnár G. – Fazekas L. – Illés L. – Kerti A. – Pesel A. 2004. Az árvíz hidrológiája. In: Bodnár G. – Fazekas L. – Illés L. – Kerti A. – Pesel A. (szerk.) A 2001. márciusi felső-tiszai árvíz. FETIVIZIG, Nyíregyháza, pp. 13-105.
- Domonkos P. – Tar K. 2003. Long-term changes in observed temperature and precipitation series 1901–1998 from Hungary and their relations to larger scale changes. Theor. Appl. Climatol. 75, 131–147.
- Dövényi Z. 2005: Az árvizek település- és településhálózat-formáló hatása a Felső-Tisza-vidéken. Földrajzi Értesítő 54, 85–109.
- Gálos B. – Lorenz P. – Jacob D.(?) Dramatic increase in dry events in Hungary possible? (in prep.)
- Gauzer B. – Bartha P. 1999: Az 1970. és 1998. évi felső-tiszai árhullámok összehasonlítása, árvízi szimulációs vizsgálatok. Vízügyi Közlemények 81/ 3. 354–387.
- Hagemann S. 1998. Entwicklung einer Parametrisierung des lateralan Abflusses für Landflächen auf der globalen Skala. Dissertation.
- Hagemann S. – Dümenil L. 1998: A parameterization of the lateral waterflow for the global scale. – Climate Dynamic 14/1. 17–31.
- Hagemann S. – Jacob D. 2007: Gradient in the climate change signal of European discharge predicted by a multi-model ensemble. Climatic Change 81. 309-327. DOI 10.1007/s10584-006-9225-0
- Hajósy F. 1954. Adatok a Tisza vízgyűjtőjének csapadékvizonyaihoz. Akadémiai Kiadó, Budapest. 113.
- Illés L. – Konecsny K. 2000: Az erdő hidrológiai hatása az árvizek kialakulására a Felső-Tisza vízgyűjtőjében. Vízügyi Közlemények 82/2. 167–197.
- 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. 61–73.
- Jacob D. – Van den Hurk B. J. J. M. – Andrae U. – Elgered G. – Fortelius C. – Graham L.P. – Jackson S. D. – Karstens U. – Koepken C. – Lindau R. – Podzun R. – Rockel B. – Rubel F. – Sass B. H. – Smith R. – Yang X. 2001: A Comprehensive Model Intercomparison Study Investigating the Water Budget During the PIDCAP Period. Meteorology and Atmospheric Physics 77/1-4. 19-44.
- Jacob D. – Bärring L. – Christensen O.B. – Christensen J. H. – de Castro M. – Deque M. – Giorgi F. – Hagemann S. – Hirschi M. – Jones R. – Kjellström E. – Lenderink G. – Rockel B. – Sanchez E. – Schär C. – Seneviratne S. – Somot S. – van Ulden A. – van den Hurk B. 2007: An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. Climatic Change 81, Supplement 1
- Konecsny K. 2002. A Felső-Tisza-vidék időjárési és vízjárési viszonyainak változása a XX. században. In: Frisnyák S. (szerk.): A Nyírség és a Felső-Tisza-vidék története földrajza. Nyíregyháza. 41–49.
- Lászlóffy-Böhm W. 1932: A Tiszavölgy, Vízrajzi leírás és a vízmunkálatok ismertetése. Különnyomat a Vízügyi Közlemények júliusi és decemberi számából. Budapest: Kir. Magy. Egyetemi Nyomda.
- Lászlóffy W. 1982. A Tisza. Akadémiai Kiadó, Budapest. 610.
- Latif M. – Roeckner E. – Botzet M. – Esch M. – Haak H. – Hagemann S. – Jungclaus J. – Legutke S. – Marsland S. – Mikolajewicz U. 2003: Reconstructing, Monitoring, and Predicting Decadal-Scale Changes in the North Atlantic Thermohaline Circulation with Sea Surface Temperature. Journal Climate, 17. 1605–1613.

- Nováky B. 2000: Az éghajlatváltozás vízgazdálkodási hatásai. *Vízügyi Közlemények*, 82/3–4. 418–448.
- Nováky B. 2003: Éghajlat és víz: bizonyságok és bizonytalanságok. *Vízügyi Közlemények*, 85/4. 536–546.
- Radvánszky B. – Izsák T. 2006: Az Ős-Tisza hordalékkúpja a Huszti-kapu előterében. *Acta Beregsasiensis*, 5/ 2. 135–149.
- Radvánszky B. – Daniela J. 2008: A Tisza vízgyűjtőterületének várható klímaváltozása és annak hatása a Tisza vízhozamára regionális klímamodell (REMO) és a lefolyási modell (HD) alkalmazásával. *Hidrológiai Közlemények* 88/3. 33–42.
- Schweitzer F. 2001a: A magyarországi folyószabályozások geomorfológiai vonatkozásai. Folyóink hullámterei fejlődése, kapcsolatuk az árvizekkel és az árvízvédelmi töltésekkel. *Földrajzi Értesítő* 50. 9–31.
- Schweitzer F. 2001b: Gátépítés vagy hullámtér-bővítés. In: *Társadalom és Környezet*. Eger–Debrecen. 95–103.
- Schweitzer F. 2004: On the possibility of cyclic recurrence of ice ages during the Neogen. *Földrajzi Értesítő* 53. 5–11.
- Semmler T. – Jacob D. 2004: Modeling extreme precipitation events – a climate change simulation for Europe. *Special Issue in Planetary and Global Change*, 44. 119–127.
- Somogyi S. 2003. A Tisza vízgyűjtőjének földrajzi helyzete. In: Teplán I. (szerk.): *A Tisza vízrendszere* (I. kötet). MTA Társadalomkutató Központ, Budapest. 17–27.
- Szalai S. 2003. A folyó vízgyűjtőjének éghajlati viszonyai. In: Teplán I. (szerk.): *A Tisza vízrendszere* (I. kötet). MTA Társadalomkutató Központ, Budapest. 53–66.
- Szinell C. S. – Bussay A. – Szentimrey T. 1998: Drought tendencies in Hungary. *Int. J. Climat.* 18. 1479–1491.
- Szlávik L. – Fejér L. 1998: Töltésszakadások a Felső-Tiszán 1947 szilveszterén. *Vízügyi Közl.* 80/2. 286–318.
- Szlávik L. 2003a: A 2001. évi Felső-Tiszai árvizek kialakulása és hidrológiai sajátosságai. *Vízügyi Közlemények* 85/3. 12–34.
- Szlávik L. 2003b: Az ezredforduló árvizeinek és belvizeinek hidrológiai jellemzése. – *Vízügyi Közlemények*, 85/4. 545–569.
- Vágás I. 1982. *A Tisza árvizei*. VÍZDOK, Budapest.
- Vágás I. 2001. Az ezredforduló árhullámai a Tiszán. *Magyar Tudomány*, 2001/08.
- <http://www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/modelle/model-distribution.html>
- <http://www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/ueberblick/atmosphaere-im-erdsystem/regionale-klimamodellierung/the-remo-model/the-regional-model-remo.html>
- <http://www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/ueberblick/atmosphaere-im-erdsystem/regionale-klimamodellierung/the-remo-model/remo-model-characteristics.html>
- <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/089.htm>
- <http://www.ipcc.ch/>
- <http://www.ipcc.ch/graphics/index.htm>
- <http://www.ipcc.ch/ipccreports/index.htm>
- <http://www.clavier-eu.org/>
- <http://www.vahava.hu/kutatasieredmenyek.html>
- <http://ensembles-eu.metoffice.com/>