

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
Természettudományi és Informatikai Kar
Geoinformatikai, Természet- és Környezetföldrajzi Tanszék
Földtudományok Doktori Iskola

**KISVÍZGYŰJTŐK VÍZMÉRLEGÉNEK VÁLTOZÁSA
A VÁRHATÓ KLÍMAVÁLTOZÁS KÖVETKEZTÉBEN
AZ ALFÖLDÖN**

Doktori (PhD) értekezés tézisei

TRAN QUANG HOP

Témavezetők:

Dr. Rakonczai János
Emeritus professzor

Dr. Kozák Péter
Egyetemi docens

Szeged
2023

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Az ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testülete (IPCC) szerint a klímaváltozás következtében Közép-Európa, így Magyarország is szélsőséges éghajlati jelenségekkel néz szembe, amelyekben a hőmérséklet emelkedése kedvezőtlenül befolyásolja a természetes vízmérleget és a vízigényeket (NÉS-2, 2018; IPCC, 2021). A korlátozottan rendelkezésre álló vízkészletek miatt könnyen a fenntartható fejlődés tényezői (társadalmi, gazdasági és környezeti) közötti összeegyeztethetlenséghez vezethet, ami regionális és lokális szinten vízkonfliktusok kialakulását eredményezheti. A vízkészletek megőrzése érdekében az Európai Unió Víz Keretirányelve számos javaslatot fogalmaz meg. Többek között nagy hangsúlyt kap a vízmérlegek számítása, kidolgozása, a vízháztartás jelenlegi helyzetének meghatározása, és ezek alapján a hatékony vízfelhasználás elősegítése. Magyarország harmadik Vízyűjtő-gazdálkodási Terve a klímakockázat értékelésére és a vízkészletek hatékonyabb felhasználására szolgáló adaptációs intézkedéseket taglaló moduljai közül elsőként az érzékenységi vizsgálat modul került említésre.

Az éghajlatváltozás várható negatív hatásait a vízgazdálkodás területén egyértelműen és konkrétan – területi és időbeli felbontásban egyaránt – azonosítani szükséges, hogy ezáltal hatékony adaptációs stratégiákat alakíthassunk ki a társadalmi, gazdasági igényekkel és a víztől függő természetes ökoszisztémákkal kapcsolatos kockázatok minimalizálása érdekében. Mára a technológiai és informatikai fejlődésnek köszönhetően a különféle matematikai, fizikai és kémiai alapú modellezésekkel a természetben lezajló folyamatokat a valósághoz közelítően tudjuk szimulálni. A számos hidrológiai modell közül kiemelkedik a MIKE SHE integrált modellje, amelynek a kimeneti eredményei sokoldalúan és átfogóan írják le a természetes vízkörforgást, és alkalmazása hatékony eszköz lehet a vízgazdálkodás fontos stratégiai kérdéseink megválaszolása során.

Az értekezés az egymástól eltérő természeti adottságú Dong-ér kisvízyűjtő és a Berettyó részvízyűjtő hidrológiai és vízmérlegi változásait vizsgálja a klímaváltozásra visszavezethető hatások és a modell beállítási hatótényezőinek tükrében. A dolgozat – a földtudomány széles spektrumát felhasználva és a hidrológiai modellek által nyújtott lehetőségekkel – az alábbi módszertani és gyakorlati eredményeket taglalja:

- 1) Céлом ezért a hidrológiai analógia alapján, a rendelkezésre álló hidrológiai és hidrodinamikai modellek összedolgozásával kiegészítő hidrológiai adatok (például a kisvízfolyások vízállása, vízhozama) leképezése, ami hatékonyan alkalmazható módszert nyújthat az adathiányos területek vízyűjtőszintű modelljeinek kalibrációja során.

Ezáltal elvégezhető a hidrológiai körforgás elemzése és szélesebb spektrumú értékelése. Ehhez kapcsolódva a kidolgozott eljárások alkalmazhatóságát két mintaterületen (Dong-ér kisvízgyűjtőn és Berettyó részvízgyűjtőn) a modellezett és a statisztikai módon levezetett (hagyományos) vízmérleg eredmények összehasonlításával igyekeztem igazolni.

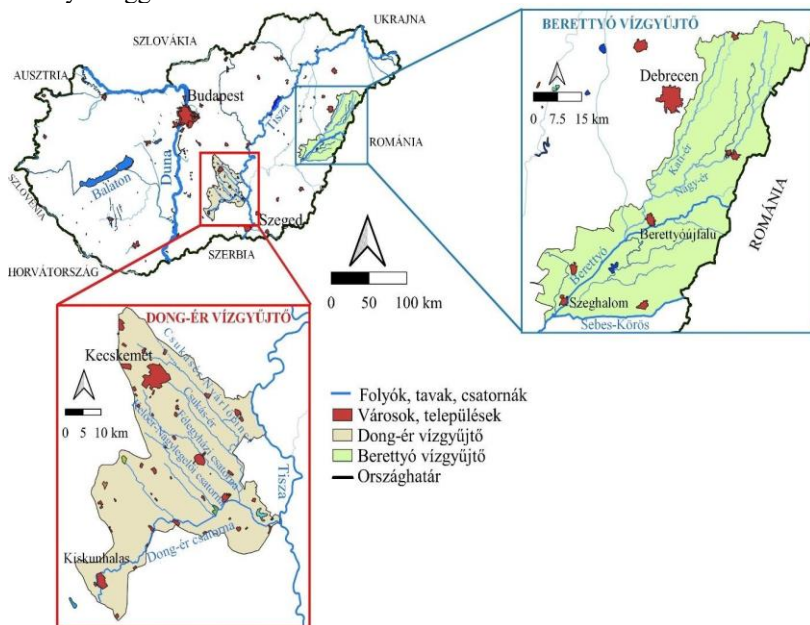
- 2) A gyakorlati központú kutatómunkában vizsgáltam a változó klimatikus hatások és a különböző részletességű adatok (talajjellemzők, digitális domborzatmodell felbontása, vízfolyások keresztmetszvény-sűrűsége) a modell beállításokban milyen változást eredményeznek a területi hidrológia és vízmérleg egyes elemeiben. Az ilyen érzékenységi alapú vizsgálatok módszertani fejlesztést igényeltek. A dolgozatban bemutattam az általam kifejlesztett érzékenységi vizsgálat új (*integrált one-at-time*) módszerét, amely az *one-at-time* módszer különféle hátrányainak kiküszöbölésére törekszik.
- 3) Az általam kidolgozott eljárások alkalmazhatóságát a modellezett és a statisztikai módon levezetett (hagyományos) vízmérleg eredmények összehasonlításával értékeltem.
- 4) Gyakorlati szempontból a Berettyó részvízgyűjtő eltérő természeti adottságú részeit külön-külön is értékeltem. A kutatás célja a területi vízmérleg mellett az egyes hidrológiai összetevők meghatározása, amely alapján a modell alkalmazhatósága alátámasztható, és a kiterjeszhetőségének vizsgálata a további síkvidéki vízgyűjtőkön.
- 5) Az elmúlt időszak szélsőséges csapadékú és emelkedő hőmérsékletű éveit alapján vizsgáltam a mintaterületek hidrológiai és vízmérlegi összetevőinek alakulását. A Berettyó részvízgyűjtőre szimulált tíz éves időszak alapján vizsgáltam a hazai gyakorlatban széles körben alkalmazott Pálfai-féle aszályindex és a hidrológiai jellemzők (kiemelten a vízmérleg) közötti kapcsolatot. Ennek alapján értelmeztem az aszályindex felhasználhatóságát a klimatikus hatásokra bekövetkező vízkészlet-változások hozzávetőleges becsülésében.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. A vizsgált mintaterületek

Az értekezésben az Alföld két mintaterületét vizsgáltam. Az egyik a Duna–Tisza közén található Dong-ér kisvízgyűjtő, a másik az Alföld keleti részén fekvő Berettyó részvízgyűjtő (1. ábra). A két vizsgált vízgyűjtő természeti (hidrometeorológiai, domborzati, talajtani stb.) adottságai eltérőek, továbbá a rendelkezésre álló alapadatok tekintetében is nagy eltérés mutatkozik. A Dong-ér kisvízgyűjtő, mint Magyarország számos olyan kisvízgyűjtőinek egyike, ahol nincs kiépítve felszíni víz monitoring rendszer, így nincs

lehetőség ténylegesen mért adatokkal dolgozni (de korábban történt részleges hidrológiai modellezés (Nagy et al., 2019)). A Berettyó részvízgyűjtőben számos felszíni víz mérőállomás adataira áll rendelkezésre, ezáltal a hidrodinamikai modell jóval nagyobb bizonyossággal kalibrálható.



1. ábra. A Dong-ér kisvízgyűjtő és a Berettyó részvízgyűjtő

2.2. Az alkalmazott módszerek bemutatása

2.2.1. Az alkalmazott hidrológiai modellek

Kutatásom első fázisában tizenöt, manapság széles körben alkalmazott hidrológiai modell műszaki hátterét, a bemeneti adatok követelményeit, a modellek kalibrálásának lehetőségeit és a kimeneti adatok felhasználhatóságát vizsgáltam a vízmérlegszámítás szempontjából. A modellek áttekintése alapján megállapítottam, hogy kizárólag a MIKE SHE modell rendelkezik a vízmérleg számítására alkalmas modullal (Tran és Fehér, 2022). Így a vízmérleg-központú dolgozatban a MIKE szoftverek kerülnek alkalmazásra.

A MIKE NAM csapadék-lefolyás modell a Fehértó-majszai kisvízgyűjtő lefolyás számításában kapott szerepet. Ezt követően a hidrológia analógiára hivatkozva az adathiányos Dong-ér kisvízgyűjtő lefolyási paramétereinek meghatározását szolgálta (Wagener et al., 2004).

A MIKE Hydro River hidrodinamikai modell feladata egyrészt az egyes vízfolyások dinamikájának meghatározása és az egyes folyóágak kapcsolódása és definiálása. Másrészt a folyóágak hidrodinamikai összekapcsolása a MIKE SHE integrált hidrológiai modellel.

A MIKE SHE integrált hidrológiai modell számos megközelítést kínál a víz mozgásának leírására, beleértve a felszíni áramlásokat, a folyók és tavak áramlását, a telítetlen és telített áramlásokat, valamint az evapotranszpirációt (DHI, 2019). A MIKE SHE vízmérleg kalkulátor modulja az egyes részfolyamatok vízmérlegét képes lokálisan és a teljes vízgyűjtőre vonatkoztatva, bármilyen időintervallumban meghatározni. A fentiek alapján a *MIKE SHE modellt alkalmaztam* a Dong-ér kisvízgyűjtő és a Berettyó részvízgyűjtő hidrológiai paramétereinek és vízmérlegi komponenseinek meghatározására a klímaváltozás szempontjából.

2.2.2. A felszíni adatok becslése a hidrológiai modellek alkalmazásával

Azokon a területeken, vízgyűjtőkön, ahol nincs vagy nem megbízhatóak a mért felszíni vízállás és vízhozam adatok, ott nem vagy nagyon nehezen kalibrálhatók illetve validálhatók a hidrológiai modellek. A vizsgálataim során a Tobler (1970) első törvényére építve és a hidrológiai analógia logikáját követve a Fehértó–majsai kisvízgyűjtő szatymazi mérőállomásán mért felszíni adatokból kiindulva – a csapadék–lefolyás (MIKE NAM) és a hidrodinamikai (MIKE Hydro River) modellek összedolgozásával – vizsgáltam a Dong-ér kisvízgyűjtő modelljének validitását a vízgyűjtőre eső Csukás-éri-főcsatorna torkolati szelvényének vízállás adatai alapján. A két modellel szimulált vízhozam adatainak összehasonlítását a hidrológiában leggyakrabban alkalmazott statisztikai együtthatókkal (NSE, RMSE, r és MAE) értékelem (Paudel és Benjankar, 2022). A kidolgozott eljárást az adathiányos Dong-ér kisvízgyűjtő hidrodinamikai modelljének kalibrálására használtam fel.

2.2.3. A hidrológiai modellek havi vízmérlegének összehasonlítása a statisztikai alapú vízkészlet-gazdálkodási vízmérlegekkel

A Dong-ér kisvízgyűjtő és a Berettyó részvízgyűjtő havi adatainak felhasználásával összehasonlítottam a ténylegesen mért adatokból statisztikai és hidrológiai számítással készült hagyományos (VIZITERV Environ Kft. által számított vízkészlet-gazdálkodási mérleg) vízmérleget a MIKE NAM és a MIKE Hydro River modellekkel számított eredményekkel. A kidolgozott összehasonlítás arra a kérdésre adott választ, hogy a csapadék–lefolyás (MIKE NAM) és a hidrodinamikai (MIKE Hydro River) modellekkel számított vízhozam értékek hogyan illeszkednek a valósághoz és a statisztikai módszerrel számított értékekhez, ezzel alátámasztva a módszer alkalmazhatóságát és hatékonyságát.

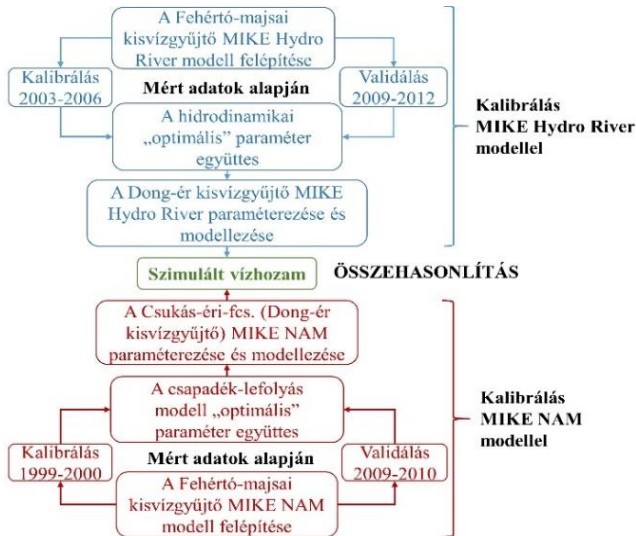
2.2.4. A modell paraméter-érzékenységi vizsgálatának módszertani fejlesztése

A nemzetközi szakirodalomban számos érzékenység elemzési módszer megtalálható. Minden érzékenységi vizsgálati módszernek megvannak a maga előnyei és hátrányai, ezért nem tudunk objektívan dönteni a különféle megközelítések jóságáról (Mai et al., 2020). Wang és Solomatine (2019) nyomán a megfelelő módszer megválasztása során fontos szempont a módszer hatékonysága, egyszerű használhatósága és a hidrológiai modell képességeinek figyelembe vétele is. Ezt figyelembevéve a dolgozatban az *one-at-time* érzékenységi vizsgálatot a MIKE SHE integrált hidrológiai modell (a modell karakterisztikájának és az alkalmazási lehetőségek figyelembevételével) környezetében alkalmaztam. Az *one-at-time* a legegyszerűbb érzékenységi vizsgálat, azonban csak lokálisan, egy bizonyos kiválasztott pont érzékenységét vizsgálja (Hamby, 1994). Disszertációmban rámutattam, hogy a MIKE SHE modell térbeli és időbeli léptékű rugalmas szimulációs keretrendszerével az *one-at-time* módszer hátránya javítható.

3. EREDMÉNYEK

3.1. A hidrológiai és hidrodinamikai modellek alkalmazása a felszíni adatok becslésére a hidrológiai analógia felhasználásával

A Dong-ér kisvízgyűjtőn a részletes területi adatok hiánya miatt a szomszédos hasonló területi adottságokkal jellemezhető Fehértó-majsi kisvízgyűjtő szatymazi mérőállomásán mért felszíni adatokból kiindulva meghatároztam a csapadék-lefolyás kapcsolatot (MIKE NAM) és hidrodinamikai (MIKE Hydro River) modellekhez a számított átlagos vízhozamot (2. ábra).



2. ábra. A hidrológia analógia módszer folyamatábrája

A két megközelítéssel számított átlagos vízhozamok csak nagyon minimális eltérést mutatnak. A statisztikai hibamutatók, különösen az NSE érték alapján (Lin et al., 2017) a két modell eredményei között nagyon jó (NSE = 0,80) illeszkedés mutatkozik (1. táblázat).

1. táblázat. A MIKE NAM és a MIKE Hydro River modellel szimulált adatok összehasonlítása a Csukás-ér kifolyási szelvényében

Érték [m ³ /s]	MIKE NAM	MIKE Hydro River	Eltérés	NSE	RMSE	r	MAE
Átlagos vízhozam	0,46	0,46	0	0,80	0,17	0,90	0,14

3.2. A modell paraméterek érzékenységi vizsgálatának módszertani fejlesztése és eredményei

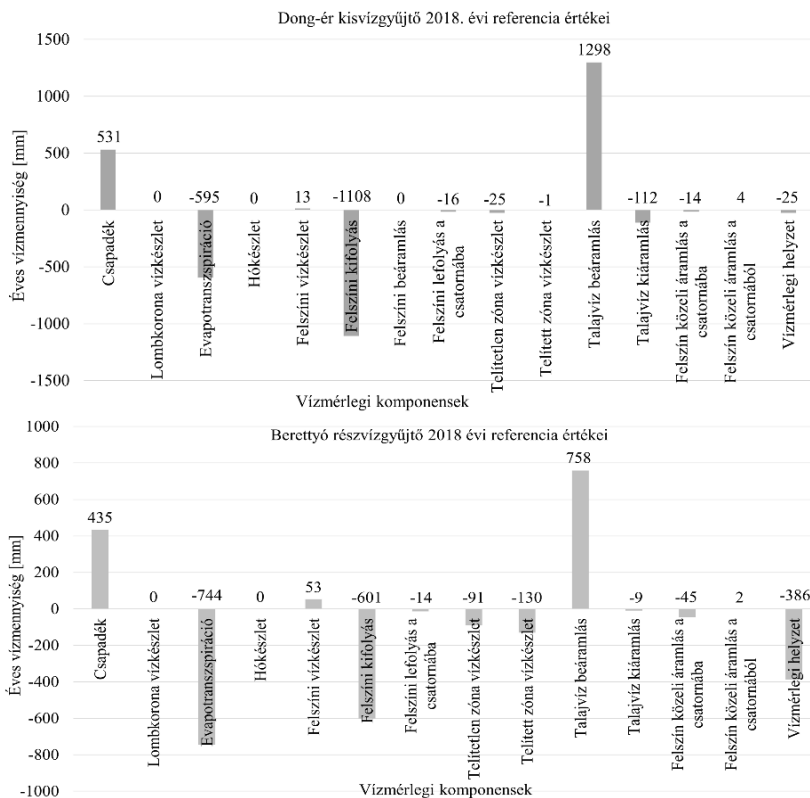
A nemzetközi szakirodalomban számos, különféle matematikai megközelítésen alapuló érzékenység elemzési módszer megtalálható. Ezek áttekintése után az *one-at-time* módszer és a hidrológiai modellek összegző értékelése alapján a MIKE SHE integrált hidrológiai modell együttműködésével egy újszerű paraméter-érzékenységi vizsgálatot – *integrált one-at-time* (iOAT) – dolgoztam ki. Az általam alkalmazott iOAT eljárással az *one-at-time* módszer hátránya javítható, miközben az előnyei megtarthatóak.

3.3. A hidrodinamikai és csapadék-lefolyás modellek havi vízmérlegének összehasonlítása a hagyományos és a statisztikai alapú vízkészlet-gazdálkodási vízmérlegekkel

A statisztikai alapú vízmérleg-számítás és a MIKE Hydro River modell által számított, továbbadott vízkészlet (szimulált vízhozam és a vízkivételek, vízbevezetések) értékeit hasonlítottam össze. A Dong-ér kisvízgyűjtő esetében lényeges eltérés mutatkozik a két módszer eredményei között (a statisztikai módszerrel számított továbbadott vízkészlet 0,31 m³/s-mal kevesebb). Valószínűleg ennek az az oka, hogy a statisztikai módszerrel történő számítás során a hidrológiai analógiaként felvett Kígyós-főcsatorna vízjárása nem reprezentálja kellőképp a Dong-éri-főcsatorna vízjárását a változatos természeti – talaj, domborzat stb. – adottságok miatt.

A Berettyó részvízgyűjtő területén a statisztikai módszerrel számolt havi eredmények és a MIKE Hydro River modellből számított, továbbadott havi vízkészlet között nagyon jó az illeszkedés (NSE = 0,979). Ezzel az eredménnyel gyakorlatilag kalibráltam a Dong-ér kisvízgyűjtőre és a Berettyó részvízgyűjtőre felépített MIKE SHE modellt, amellyel a 2018 referencia-évet szimuláltam (3. ábra¹).

¹ A mm-ben megadott vízmennyiség az egy területegységre jutó vízoszlop magasságát jelenti a következőkben.



3. ábra. A 2018-as referencia-év vízmérlegi komponenseinek szimulált értékei a Dong-ér kisvízgyűjtőn és a Berettyó részvízgyűjtőn

3.4. Az egyenletes és a részletes térbeli eloszlás talajjellemzőkkel felépített modellek összehasonlítása

Tapasztalataim szerint hazánkban az eddig végzett modellezési vizsgálatokban általában kevesebb figyelem irányult a részletesebb talajtani adatgyűjtésre. Az egyenletes (egységes) és részletesebb talajadatokkal felépített modelleket vízmérlegi szempontból összehasonlítva nagy változás tapasztalható az evapotranspirációban, a talajvíz beáramlásban, a felszíni kifolyásban, és a felszín alatti (telítetlen és telített zóna) vízkészletben is. A Dong-ér kisvízgyűjtőben a vízmérlegek különbsége 191 mm, ami közel 400 millió m³ vízmennyiségnek felel meg (4. ábra). Tehát megállapítható, hogy a talajtani információk részletessége lényeges hatással van a vízmérleg számítás pontosságára, ezáltal a vízkormányzási döntések bizonytalanságára. A Berettyó részvízgyűjtőre jellemző talaj inhomogenitás miatt még

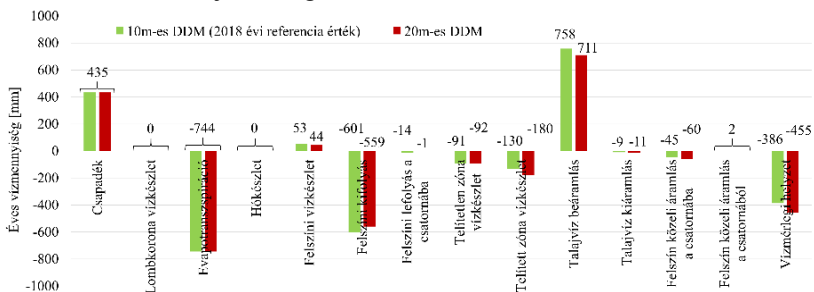
számottevőbb a különbség az egyenletes és térbeli eloszlású talajjellemzővel felépített modell eredmények közötti hidrológiai paraméterekben és a vízmérlegi komponensekben egyaránt.



4. ábra. Dong-ér kisvízgyűjtő egyenletes és térbeli eloszlású talajjellemzőkkel való szimulációjának vízmérlegi eredményei 2018-ban

3.5. A MIKE SHE hidrológiai modell érzékenysége különféle felbontású digitális domborzatmodellek használata és az eltérő gyakoriságú meder-keresztmetszvények esetén

A különböző felbontású digitális domborzatmodellekkel (10, 20 m) végzett vízmérleg-számítások eredményei alapján a 20 m felbontású digitális domborzati modellel futtatott szimulációban számottevő változást tapasztalhatunk a felszíni vízkészlet, a felszíni lefolyás, a telített zóna vízkészlet komponensekre, és a talajvíz beáramlásra, illetve a felszín közeli áramlásra (csatornába) értékekben. A vízháztartás mérlegre körülbelül 18%-kal alacsonyabb értéket kapunk a 10 m-es felbontáshoz képest (5. ábra). Tapasztalataim alapján a domborzatmodell felbontás növelésével olyan mértékben emelkedett a modell tárterület-, és számításgénye, hogy az 5 m felbontású topográfiai adattal már az általam vizsgált méretű kisvízgyűjtők is csak nagy teljesítményű számítógéppel modellezhetők, ezért jelen dolgozat során ettől el kellett tekintenem.



5. ábra. A 10 és 20 m-es felbontású digitális domborzatmodellek alapján meghatározott területi vízmérlegek a Berettyó részvízgyűjtőjén 2018-ban

A kutatások átfogó területi kiterjeszhetősége érdekében értékeltem a modell érzékenységét a vízfolyások keresztshelvényeinek sűrűsége (0,5 km-es és 1 km-es sűrűséggel) alapján is. Az 1 km-es sűrűségű keresztshelvényekkel szimulált vízmérleg, mintegy 17 mm-rel alacsonyabb területi értéket eredményez, mint amit az 500 méterenkénti kereszt-shelvényekkel kapunk. A vizsgált terület egészére ez mintegy 47 millió m³ vízkészlet-különbséget jelent.

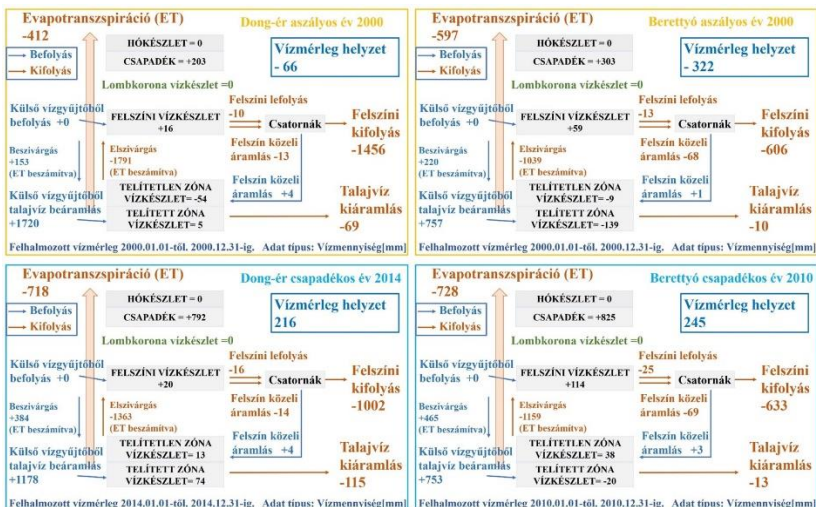
3.6. Berettyó részvízgyűjtő eltérő adottságú részeinek vizsgálat eredménye

Miután egy kisvízgyűjtő is különböző természeti adottságú tájrészletekből áll, ha lehetőségünk van rá célszerű részletesebb felbontású vizsgálatot is végeznünk. A Berettyó esetében a délnyugati, agyagosabb felszínű (Kálló-ér részvízgyűjtő) és az északkeleti homokos öszszletekből felépülő részét külön is modelleztem. A délnyugati területre 274 mm-rel nagyobb evapotranszspirációt kaptam, és a felszíni alatti (telítetlen és telített zóna) vízkészlete kisebb, mint az északkeleti vízgyűjtőn. Az északkeleti részébe 534 mm a talajvíz beáramlás, ennek egy része tovább táplálja a délnyugati rész talajvíz beáramlását (984 mm). A délnyugati területen a vízmérleg 349 mm-es vízhiányt jelez, amíg az északkeleti (nagyobb esésű) részen 432 mm-t.

3.7. A vízmérlegi komponensek alakulása szélsőséges csapadékviszonyok esetén

A Dong-ér kisvízgyűjtőn az aszályos 2000-es év szimulált eredményeit a 2014-es csapadékos időszakhoz (ekkor itt kiemelkedően nagy, 792 mm volt az évi csapadékösszeg) tartozó hidrológiai és vízmérlegi eredményekkel hasonlítottam össze. A Berettyó részvízgyűjtőn a hidrológiai paraméterek és a vízmérlegi komponensek változását vizsgáltam a közelmúlt két kifejezetten szélsőséges időszakának (2000, 2010) szimulált értékeivel.

A Dong-ér kisvízgyűjtőből 2000-ben 1456 mm és 2014-ben 1002 mm mennyiségű felszíni víz kiáramlás úton hagyta el a vízrendszert, ami meghaladja a csapadékösszeget és az evapotranszspirációt. A 6. ábrán látható eredmények alapján erősödik az a megállapítás, hogy egyrészt a vizsgált évek vízháztartása nagyban függ a megelőző évi csapadékviszonyoktól, másrészt a vizsgált területen a felszíni vizek forrása elsődlegesen nem a vízgyűjtőn lehullott csapadék, és nem a felszíni vizek befolyása, hanem inkább a külső vízgyűjtők talajvíz beáramlása (2000-ben 1720 mm, 2014-ben 1178 mm volt). A Dong-ér kisvízgyűjtőn az aszályos 2000-ben 66 mm-es vízhiány, a csapadékos 2014-es évben 216 mm-es vízmérleg feltöltődés volt tapasztalható.



6. ábra. A szélsőséges időjárású évek (2010, 2010 és 2014) szimulált vízmérlegi értékeinek összehasonlítása a Dong-ér kisvízgyűjtőjén és a Berettyó részvízgyűjtőjén

A Berettyó részvízgyűjtő aszályos időszakában (2000 év) az evapotranszpiráció értéke közel kétszerese a csapadék mennyiségnek. A száraz éghajlati viszonyok ellenére a 2000-es év felszíni kifolyása (-606 mm) alig változott a 2018-as referencia évhez (-601 mm) képest. Ennek oka itt is, hogy a 2000. év vízmérleg jelentősen függ a megelőző 1998–1999-es jelentősebb csapadéku és alacsonyabb évi középhőmérsékletű időszaktól, így az aszályos 2000-es év vízmérlege (-322 mm) elég közel áll az „átlagos” referencia évhez (-386 mm). Ez hozzávetőlegesen körülbelül 880 millió m³ deficitet eredményez (6. ábra).

A Berettyó részvízgyűjtőn a közelmúlt kifejezetten csapadékos időszakának (2010) szimulált értékei alapján a telítetlen zóna vízkészlete (38 mm) magasabb, mint a 2018-ban (-91 mm). Hasonló tendenciákat mutat a telített zóna vízkészlet is. A 2010. évi bőséges csapadék következtében 245 mm-es víztöbblet jelentkezett a rendszer vízmérlegében, ami mindegy 670 millió m³ vízmennyiséget jelent.

3.8. Hőmérséklet-emelkedések hatására megváltozó vízmérlegek szimulációja

A jövőre prognosztizált hőmérsékletemelkedés hatását négy fokozatban (0,3 – 0,5 – 0,7 és 1,5 °C-os növekedés) modelleztem a két kisvízgyűjtőn. A szimulált eredmények alapján az evapotranszpiráció (ET) paraméterei (referencia ET, aktuális ET, aktuális párologtatás, aktuális talaj párologás) a hőmérséklet-emelkedésekkel egyenes arányban, fokozatosan emelkednek

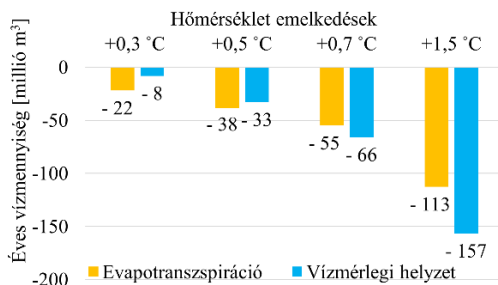
mindkét vízgyűjtő esetében. Következésképpen nagymértékben csökkenni fog a nyílt felszínű befogadó medrek irányába történő áramlás, illetve szivárgás mértéke. A hőmérséklet emelkedések hatására a Dong-ér kisvízgyűjtő esetében 1273–1298 mm, a Berettyó részvízgyűjtőn 756–758 mm között ingadozik a talajvíz beáramlás, ami stabilnak mondható. A 2. táblázatban bemutatott eredmények alapján prognosztizálható, hogy a Dong-ér kisvízgyűjtőn a hőmérséklet emelkedések hatására 11–43 mm-rel (24–92 millió m³ vízmennyiséggel) romlik a vízháztartási mérleg a 2018-as referencia állapothoz viszonyítva. Eredményeim összhangban állnak Fehér és Rakonczai (2019) korábbi kutatásaival, amelyek a Duna–Tisza közén jelzett súlyosbodó vízhiányos tendenciákra hívták fel a figyelmet.

2. táblázat. A Dong-ér kisvízgyűjtőn a +0,3°C-os, +0,5°C-os, +0,7°C-os és +1,5°C hőmérséklet-változások következtében a vízmérlegi komponensek változása a referencia értékhez képest

Paraméterek [mm]	2018	+0,3°C	+0,5°C	+0,7°C	+1,5°C
Csapadék	531	531	531	531	531
Evapotranszpiráció (ET)	-595	-600	-608	-613	-635
Felszíni befolyás	0	0	0	0	0
Felszíni kifolyás	-1108	-1103	-1096	-1093	-1083
Lombkorona vízkészlet	0	0	0	0	0
Hókérszet	0	0	0	0	0
Felszíni lefolyás a csatornába	-16	-12	-12	-12	-11
Felszíni vízkészlet	13	14	14	13	13
Telítetlen zóna vízkészlet	-25	-22	-25	-27	-29
Telített zóna vízkészlet	-1	9	8	3	-5
Felszín közeli áramlás a csatornába	-14	-15	-15	-14	-14
Felszín közeli áramlás a csatornából	4	5	5	5	5
Talajvíz beáramlás	1298	1273	1273	1273	1273
Talajvíz kiáramlás	-112	-116	-115	-115	-113
Beszivárgás (ET beszámítva)	298	348	343	336	316
Elszivárgás (ET beszámítva)	-1475	-1485	-1482	-1481	-1469
Vízmérlegi helyzet	-25	-36	-40	-49	-68

A Berettyó részvízgyűjtőn +0,3°C és +0,5°C hőmérséklet emelkedések hatására a talajban még „van miből” párologtatni (22–38 millió m³ vízmennyiség) és a vízmérlegi helyzete is csak kisebb mértékben (8–33 millió m³ vízmennyiséggel) változik. Az intenzívebb hőmérséklet emelkedések következményeként viszont már egyre romlik a vízmérlegi helyzet (66–157 millió m³ vízmennyiség) (7. ábra). A hőmérsékletek emelkedése következtében az evapotranszpirációban és a vízmérlegben lineáris jellegű változások tapasztalhatók. Ezek alapján erősödik az a

megállapítás, hogy az evapotranszpiráció meghatározó súllyal van a rendszer vízmérlegére.



7. ábra. Az evapotranszpiráció- és a vízmérlegváltozás mértéke a hőmérséklet emelkedések következtében Berettyó részvízgyűjtőn

4. A KUTATÁS LEGFONTOSABB MEGÁLLAPÍTÁSAI (Tézisek)

- 1) Miután kisvízgyűjtőink zöme jelentős adathiánnyal küzd a hidrológiai modellezéshez, ezért az általam kidolgozott módszerrel egy adathiányos vízgyűjtőn a felszíni vízállás és vízhozam adatokat MIKE NAM csapadék-lefolyás és MIKE Hydro River hidrodinamikai modellekkel generáltam. A megfelelő modell paramétereiket hidrológiai analógia alapján, kettős kalibrációs eljárással határoztam meg. A kifejlesztett eljárást hatékonyan alkalmaztam adathiányos területek vízgyűjtő-szintű modelljeinek felépítése során, lehetővé téve ezáltal a hidrológiai körforgás elemzését és szélesebb spektrumú értékelését.
- 2) A MIKE Hydro River hidrodinamikai modell alkalmazásával meghatároztam a vizsgált kisvízgyűjtők vízhozam adatait, majd ezt összehasonlítottam a hagyományos, statisztikai alapú vízkészlet-gazdálkodási vízmérlegek kiszámolt eredményeivel. Megállapítottam, hogy a mért- és a MIKE NAM csapadék-lefolyás modell által generált felszíni adatokra kalibrált MIKE Hydro River hidrodinamikai modell képes a valósághoz közeli hidrodinamikát generálni. Rávilágítottam, hogy a statisztikai módon kiszámított eredményt tekinthetjük egy olyan referencia értéknek, amelyhez a vizsgálgató modell kalibrálható. Mindazonáltal a modellek eredményei is kiegészíthetik a statisztikai módszerrel számított eredményeket, még az adathiányok ellenére is.
- 3) A MIKE SHE integrált hidrológiai modellezéssel az one-at-time érzékenységi vizsgálatot végeztem. Megállapítottam, hogy a MIKE SHE modell térbeli és időbeli léptékű rugalmas szimulációs keretrendszerével az one-at-time eljárás hátránya javítható, miközben az előnyei megtarthatóak. Ezzel egy egyszerű, ám hatékony integrált érzékenységvizsgálati módszert kaptam. Az integrált hidrológiai modellezéssel

kombinált *one-at-time* érzékenységi vizsgálatot *integrált one-at-time* (iOAT) módszertannak nevezem.

- 4) A Dong-ér kisvízgyűjtőn végzett *különböző részletességű talajjellemzőkkel felépített modellek eredménye és a két kisvízgyűjtőn végzett szélsőséges csapadéku évek vizsgálata alapján megállapítottam, hogy a homokos talajokon a szélsőséges csapadék események és a felszíni lefolyás, és felszíni vízkészlet között nem mutatható ki szoros kapcsolatot. A Berettyó részvízgyűjtő délnyugati részén lévő gyengébb víznyelőképességű talajok esetén a felszíni lefolyás és a szélsőséges csapadék események között szoros korreláció mutatkozik. A területi vizsgálatok alapján rámutattam, hogy a feltalaj adottságainak fontos szerepe van a felszíni lefolyásban, de a talaj mélyebben lévő részeinek összetétele, típusa nagyban befolyásolja a telítetlen- és telített zóna vízáramlásait egyaránt. A kapott eredmények alapján a részletesebb talajjellemzőkkel felépített modelleket hatékonyabbnak tartom.*
- 5) Kutatásom során a modell területi adatsűrűsége való érzékenységét a különböző felbontású digitális domborzatmodellek (10, 20 m) felhasználásával végeztem el. A hidrológiai aspektusból megállapítottam, hogy *az eltérő részletességű domborzatmodellek alkalmazása nem befolyásolhatja érdemi mértékben a vizsgált vízgyűjtő evapotranszpirációját, a telítetlen zóna vízkészletét, a talajvíz kiáramlást, a felszín közeli áramlásra a csatornából komponenst. Azonban a vízmérlegi szempontból rámutattam, hogy az eltérő részletességű domborzatmodellek alkalmazása érdemi mértékben befolyásolhatja a vizsgált vízgyűjtő vízmérlegének becsült értékeit, így jelentős kockázati tényezőnek tekinthető a helyes környezeti beavatkozások szakmai alapú értékelése során.*
- 6) A modell építése során az egymástól nagyobb távolságra elhelyezkedő keresztshelvények interpolációval mesterségesen „besűrűthetők”. Az interpoláció a természetes meder-keresztshelvények esetében biztosan nem a valóságot fogja tükrözni, azonban a szabvány szerint kialakított medrek esetében az interpolációval közelíthetjük a meder-keresztshelvények valóságos geometriáját (például a Berettyó keresztshelvénye). A hidrológiai és vízmérlegi aspektusból arra a következtetésre jutottam, hogy a *méretezett meder-geometriával, illetve a 0,5 és 1 km keresztshelvény sűrűséggel futtatott hidrológiai és vízmérlegi szimulációk eredményei között nem tapasztalható érdemi változás* (a teljes értékhez viszonyítva), ami – a költséghatékonyságot figyelembe véve – nem feltétlenül támasztja alá a részletesebb keresztshelvény-felmérések felhasználásának igényét. *A természetes medrű vízfolyások esetében – például a Dong-ér-főcsatorna – minél*

ritkábbak a felmérések, valójában annál bizonytalanabbak a bemenő adatok, ami lényegesen csökkent a szimuláció pontosságát. A valóságghűbb szimulációs eredményekre való törekvés érdekében a természet által kialakított medrekben javaslom a minél részletesebb – amennyiben rendelkezésre állnak az erőforrások – keresztaszelvény-sűrűséggel a modell beállítását.

Berettyó részvízgyűjtő eltérő adottságú részeinek vizsgálati eredményei alapján rámutattam, hogy a délnyugati területen a földfelszín jobban felmelegszik, következésképpen fokozottabban növekszik az evapotranszspiráció, mint az északkeleti erdőterületeken, ahol a lombkorona árnyékoló hatása érvényesül. Az északkeleti, homokos részt jelentősebb vízhiány (432 mm) sújtja, aminek egyik oka, hogy a Nyírség izolált geomorfológiája miatt minimális a felszín alatti vízkészletek külső vízgyűjtőkből történő pótlódása. A délnyugati területen a vízmérlegi mutató 349 mm-es vízhiányt jelez, ami jelentős evapotranszspirációra és felszín alatti kifolyásra utalhat, ugyanakkor a talajvíz beáramlás nem elegendő arra, hogy a hidrológiai rezsím vízmérlegét kompenzálja.

- 7) A szimulációk eredményei alapján az Alföld két vizsgált kisvízgyűjtőjének vízmérlegében a magasabban fekvő, külső vízgyűjtőkről származó talajvíz beáramlás, a felszíni vízkiramlás, az evapotranszspiráció és a csapadék események a leginkább meghatározók. Valószínűsíthető, hogy a Kárpát-medencében lévő többi vízgyűjtő vízmérlegét is ez a négy komponens határozza meg, amennyiben a domborzati és a hidrogeológiai adottságok hasonlóak. A vizsgálatok eredménye alapján megállapítható, hogy az Alföldön a kisvízgyűjtők vízmérlegből a legnagyobb kiadási tényező az evapotranszspiráció.
- 8) A kutatásaim alapján megállapítottam, hogy a vizsgált két kisvízgyűjtőn a vízkészletek jövőbeli változásai leginkább a hőmérséklettől függenek. Az eredmények alapján prognosztizálható, hogy a Dong-ér kisvízgyűjtőn +1,5°C-os hőmérséklet emelkedés hatására súlyosabb vízhiány fog kialakulni, mint amit 2000-ben a rendkívüli aszály következtében megfigyelhettünk. Hasonló hőmérséklet emelkedés esetén a Berettyó részvízgyűjtőn kisebb mértékű vízhiánnyal számolhatunk a 2012. évhez képest, de nagyobb deficit jelentkezik, mint a 2000. évben tapasztalt. A hőmérséklet emelkedések hatására a vízmérlegben lineáris jellegű változás tapasztalható. A vízmérlegi komponensek +1,5°C hőmérséklet-emelkedésre való érzékenysége csökkenő sorrendben a következő: a beszivárgás, a vízmérleg változás, felszín alatti víztárolás, a felszíni lefolyás és a párolgás.
- 9) Kutatásaim fontos gyakorlati jelentősége, hogy kistáji szinten megbecsüli a várható klímaváltozás következményeként kialakuló vízhiány mértékét

és összetevőit. Ez alapján megállapítottam, hogy ha a szárazodási tendencia folytatódik, a már most is *helyenként tapasztalható vízhiányt (annak mértéke miatt) nem lesz elegendő lokális vízpótlásokkal kiegyensúlyozni.*

Kutatásaim eredményei arra utalnak, hogy *a Pálfai-féle aszályindex nem alkalmas a vízkészletek változásának egyszerűsített becslésére.* Ennek oka, hogy a Pálfai indexben kiemelt szerepe van a csapadék éven belüli eloszlásának, ugyanakkor nem tudja figyelembe venni a felszínalatti vízmozgások szerepét.

A klímaváltozásra visszavezethető kedvezőtlen vízkészlet-csökkenést a helyben képződő csapadékok hatékonyabb visszatartásával (beszivárgás és a talajok víztartóképségének növelésével, a lefolyás és az evapotranszpiráció csökkentésével) javíthatjuk, de figyelmet kell fordítanunk a felszín alatti vízkészlet mozgásokra is.

DISSZERTÁCIÓBAN FELHASZNÁLT KÖZLEMÉNYEIM

Tran, Q. H. (2021): Sensitivity analysis for effect of changes in input data on hydrological parameters and water balance components in the catchment area of Hungarian Lowland. *Journal of Environmental Geography* 14 (3–4). 1–13. MTMT azonosítószám: 32513766. DOI: [10.2478/jengeo-2021-0007](https://doi.org/10.2478/jengeo-2021-0007).

Tran, Q. H., Fehér, Z. Z. (2022): Water balance calculation capability of hydrological models. *Acta Agraria Kaposváriensis* 26 (1). 37–53. MTMT azonosítószám: 33040566. DOI: [10.31914/aak.2877](https://doi.org/10.31914/aak.2877).

Tran, Q. H., Fehér, Z. Z., Túri, N., Rakonczai, J. (2022): Climate Change as an Environmental Threat on the Central Plains of the Carpathian Basin Based on Regional Water Balances. *Geographica Pannonica* 18 (4). 567–599. MTMT azonosítószám: 33157194. Scopus: 85141332752. Impact Factor: 1,93. DOI: [10.5937/gp26-37271](https://doi.org/10.5937/gp26-37271).

Tran, Q. H., Fehér, Z. Z. (2022): Estimation of the water regime under different climate scenarios and the importance of the thoroughness of the soil as input layer in a small watershed in Central-Hungary. *Vietnam Journal of Hydrometeorology* 12. 39–56. MTMT azonosítószám: 33144457. DOI: [10.36335/VNJHM.2022\(12\).39-56](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2022(12).39-56).

Tran Q. H., Fehér Z. Z., Rakonczai J. (2023): A hidrológiai és hidrodinamikai modellek alkalmazása a felszíni vízállás adatok becslésére adathiányos vízgyűjtőkön. A Magyar Hidrológiai Társaság által rendezett XL. Országos Vándorgyűlés dolgozata. Győr. ISBN: 978-963-8172-45-7. MTMT azonosítószám: 34191341.

https://hidrologia.hu/vandorgyules/40/word/0621_tran_quang_hop.pdf.

Tran Q. H. (2023): A két alföldi kisvízgyűjtő éves vízmérlegének meghatározása mért és modellezett adatok alapján. Hidrológiai Közlöny 103 (3). 54–63. MTMT azonosítószám: 34191161.

http://www.hidrologia.hu/mht/letoltes/HK2023_03.pdf.

KONFERENCIÁK, ABSZTRAKTOK

Tran, Q. H. (2021): Modelling water balance with MIKE SHE using MODIS land cover type as model input data in Dong-ér catchment, Hungary. XII. Debreceni Egyetem Térinformatikai Konferencia és Szakkiállítás. Poszter. ISBN: 978-963-318-977-1. Konferencia kötet 359. oldal. MTMT azonosítószám: 32491691.

https://giskonferencia.unideb.hu/arch/GIS_Konf_kotet_2021.pdf.

Tran, Q. H. (2021): Impacts of climate change on hydrological parameters and water balance components in Dong-ér catchment, Hungary. webGeoMATES '21 International Young Scientist Congress on Geomathematics in Earth- & Environmental Sciences. ISBN: 978-963-8221-85-8. Konferencia kötet 6. oldal. MTMT azonosítószám: 32383766.

Tran, Q. H., Fehér, Z. Z. (2022): Effects of aridification scenarios and soil layer detailedness on water balance forecast in a small catchment of Hungary. International Conference. Technology in natural disaster prevention and risk reduction. Hanoi University of Natural Resources and Environment. 45–62. http://en.hunre.edu.vn/hunre-en/vn/upload/info/attach/16826545758801_Proceedings_of_International_Conference_1st_2022.pdf.

Tran Q. H., Rakonczi J., Pásztor D., Fehér Z. Z. (2022): A változó klíma hatására megváltozó hidrológiai rendszer modellezése a Berettyó vízgyűjtőjén. XIII. Debreceni Egyetem Térinformatikai Konferencia és Szakkiállítás. ISBN: 978-963-615-039-6. 301–309. MTMT azonosítószám: 33205988. https://giskonferencia.unideb.hu/arch/GIS_Konf_kotet_2022.pdf.

Rakonczi J., **Tran Q. H.,** Fehér Z. Z. (2023): Vízkészleteink és a változó klíma – Ne csak ötleteljünk, számoljunk is! XVIII. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia. Szeged. ISBN: 978-963-306-937-0. Konferencia kötet 83–84. MTMT azonosítószám: 33830668. <https://geosci.u-szeged.hu/gisgeo/program/abstract-fuzet-online>.

Tran, Q. H., Fehér, Z. Z., Rakonczi, J. (2023): The application of hydrological and hydrodynamic models for estimating surface water level data in data deficient catchments. XIV. Debreceni Egyetem Térinformatikai Konferencia és Szakkiállítás. Poszter. ISBN: 978-963-615-084-6. Konferencia kötet 366. oldal. MTMT azonosítószám: 33947239.

https://giskonferencia.unideb.hu/arch/GIS_Konf_kotet_2023.pdf.

SUMMARY

To assess the increasingly unpredictable future effects of climate change, it is important to look into the past evolution of environmental factors from different perspectives. Afterwards, these experiences can be used to reduce the risk of damaging and irreversible environmental or hydrological interventions.

The research was carried out in two distinct sample areas, namely the Dong-ér catchment and the Hungarian portion of the Berettyó catchment, both located in the Hungarian lowlands. These areas exhibit contrasting environmental characteristics. The objective of this study was to assess the suitability of the MIKE SHE model for predicting the effects of climate change on water resources and their hydrological components. The ultimate goal was to utilize this model in a forthcoming national assessment. By quantifying the magnitude of each consequence, the findings can assist in the strategic development and execution of tangible water management initiatives. Another crucial objective was to examine the possibility of streamlining the input data of the model, with the aim of minimizing it, and assess the impact on the precision of the outcomes in order to extend the studies to a wider area.

My results can be divided into two groups. On the one hand, I made methodological developments and ran different simulation scenarios; on the other hand, based on the results, I assessed the earth science, water balance and hydrological processes.

Adverse water stress due to climate change can be ameliorated by more efficient retention of locally generated precipitation (infiltration and increasing soil water holding capacity, reducing runoff and evapotranspiration), but attention must also be paid to groundwater resource movements.