



**GEOINFORMATIKAI ALAPÚ HIDROLÓGIAI
MODELLEZÉS A TARNA VÍZGYŰJTŐJÉN A KÁRPÁT-
MEDENCE KLIMATIKUS TENDENCIÁI
FÜGGVÉNYÉBEN**

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

Szopos Noémi Mária

Témavezető: Prof. Dr. Szabó Szilárd, egyetemi tanár

DEBRECENI EGYETEM

Természettudományi és Műszaki Tudományi Doktori Tanács

Földtudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2025

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi és Műszaki Tudományi Doktori Tanács, Földtudományok Doktori Iskola „A lito- és hidroszféra természetes és antropogén folyamatai” programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem természettudományi doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.

Nyilatkozom arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Debrecen, 2025.

.....
a jelölt aláírása

Tanúsítom, hogy Szopos Noémi Mária doktorjelölt 2018-2022. között a fent megnevezett Doktori Iskola „A lito- és hidroszféra természetes és antropogén folyamatai” programjának keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Nyilatkozom továbbá arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Az értekezés elfogadását javaslom.

Debrecen, 2025.

.....
a témavezető aláírása

**GEOINFORMATIKAI ALAPÚ HIDROLÓGIAI MODELLEZÉS A
TARNA VÍZGYŰJTŐJÉN A KÁRPÁT-MEDENCE KLIMATIKUS
TENDENCIÁI FÜGGVÉNYÉBEN**

Értekezés a doktori (Ph.D.) fokozat megszerzése érdekében a
Földtudományok tudományágában

Írta: **Szopos Noémi Mária**, okleveles geográfus

Készült a Debreceni Egyetem Földtudományok Doktori Iskolája

(A lito- és hidroszféra természetes és antropogén folyamatai programja)
keretében

Témavezető: **Prof. Dr. Szabó Szilárd**, egyetemi tanár

Az értekezés bírálói:

Dr.

Dr.

A bírálóbizottság:

elnök:

Dr.

tagok:

Dr.

Dr.

Dr.

Dr.

Az értekezés védésének időpontja: 2025.

Tartalomjegyzék

Rövidítések jegyzéke	9
1. Bevezetés, célkitűzések.....	11
2. Szakirodalmi áttekintés	14
2.1. A globális klímaváltozás hatásainak vizsgálata.....	14
2.2. Klímaváltozás hatásai a Kárpát-medence és Magyarország területén.	17
2.3. A vízgyűjtők karakterisztikájának vizsgálata, vízgyűjtő vízlevezetési sajátosságai	20
2.4. Árvizek és villámárvizek	22
2.5. Hidrológiai modellek kiválasztása és alkalmazása.....	25
2.6. A hidrológiai modellek célja, megalkotásának nehézségei és pontosságának vizsgálata.....	27
3. A mintaterületek bemutatása.....	30
3.1. A Kárpát-medence éghajlati adottságainak bemutatása	30
3.2. A Tarna-folyó és vízgyűjtő területének bemutatása	31
3.2.1. A mintaterület lehatárolása.....	31
3.2.2. Felszínborítás, talajtani jellemzők.....	34
3.2.3. Domborzati adottságok és klimatikus viszonyok.....	35
3.2.4. A Tarna vízjárásának és hidrológiai változóinak alakulása	36
4. Anyag és módszer.....	38
4.1. Adatok	38
4.1.1. Terepi adatgyűjtés	38
4.1.2. CarpatClim adatbázis	39
4.1.3. E-OBS meteorológiai adatbázis	41
4.1.4. AGROTOPO, NÖSZTÉP és CLC adatbázisok.....	42
4.1.5. Topográfiai adatok	42

4.1.6.	Vízszint és vízhozam adatok 1990-2020 között.....	44
4.2.	Módszerek	45
4.2.1.	A CarpatClim adatainak előkészítése és feldolgozása	45
4.2.2.	Az E-OBS adatok felhasználása.....	46
4.2.3.	Az eseményalapú modellek adatainak kiválasztása és előkészítése.....	47
4.2.4.	A HEC-RAS modellek felépítése és előkészítése	48
4.2.5.	HEC-RAS hidrológiai modellek alkalmazhatósága, megalkotása és futtatása	51
4.2.6.	A hidrológiai modellek validálása és kalibrálása	53
4.2.7.	Statisztikai módszerek.....	54
5.	Eredmények és értékelésük.....	57
5.1.	A csapadék és a hőmérsékleti tendenciák változásának kimutatása a Kárpát-medencében 50 éves periódus alapján	57
5.2.	A csapadék és a hőmérsékleti tendenciák változása a Kárpát-medencében 50 éves időintervallum alapján történő vizsgálatának értékelései	66
5.3.	Az E-OBS adatbázis időbeli és térbeli csapadék adatainak vizsgálata 1960-2020 között a Tarna vízgyűjtő területén.....	69
5.4.	Hidrológiai modellek alkalmazhatóságának lehetőségei kisvízgyűjtő területén	72
5.5.	A hidrológiai modellek pontosságvizsgálata a választott árvízi események alapján.....	74
5.6.	A hidrológiai modellek alkalmazhatóságának értékelése.....	79
5.7.	Az időbeli változások követése a hidrológiai adatok alapján.....	82
6.	Összefoglalás.....	84
7.	Summary.....	88
	Köszönetnyilvánítás	92
8.	Irodalomjegyzék.....	94
9.	Mellékletek.....	119

Rövidítések jegyzéke

AGROTOPO	Agro-Topográfiai adatbázis
C	Teljes szakasz
C3S	<i>Copernicus Climate Change Service</i>
CC	<i>CarpatClim</i>
CLC	<i>Corine Land Cover</i>
DEM	Digitális domborzatmodell (<i>Digital Elevation Model</i>)
ÉMVIKIZIG	Észak-Magyarországi Vízügyi Igazgatóság
E-OBS	<i>European Observational gridded dataset</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
J-T	Jonckheere-Terpstra teszt
KGE	Kling-Gupta hatékonyság (<i>Kling-Gupta Efficiency</i>)
K-W	Kruskal-Wallis teszt
LKV	Legkisebb vízállás
LNV	Legnagyobb vízállás
MASH	<i>Multiple Analysis of Series for Homogenization</i>
MISH	<i>Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis</i>
NKFP	Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Programok
NÖSZTÉP	Nemzeti ökoszisztéma-szolgáltatások térképezése és értékelése
NRMSE	Normalizált négyzetes középhiba (<i>Normalized Root Mean Square Error</i>)
NSE	Nash-Sutcliffe hatékonyság (<i>Nash-Sutcliffe Efficiency</i>)
OVF	Országos Vízügyi Főigazgatóság
PET	potenciális evapotranspiráció (<i>potential evapotranspiration</i>)
PREC	havi csapadék (<i>monthly precipitation</i>)
RMSE	Négyzetes középhiba (<i>Root Mean Square Error</i>)
SD	Standard eltérés
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TA	havi átlagos hőmérséklet (<i>monthly average temperature</i>)
TMAX	havi maximális hőmérséklet (<i>monthly maximum temperature</i>)
TMS	Tarnaméra szakasz (<i>Tarnaméra Section</i>)
TOS	Tarnaörs szakasz (<i>Tarnaörs Section</i>)

ubRMSE	Elfogulatlan négyzetes középhiba (<i>Unbiased Root Mean Square Error</i>)
VGT	Vízgyűjtő-gazdálkodási Terv
VS	Verpelét szakasz (<i>Verpelét Section</i>)
WMO	Meteorológiai Világszervezet (<i>World Meteorological Organization</i>)

1. Bevezetés, célkitűzések

Az elmúlt évtizedekben a természeti jelenségek, mint például a heves esőzések, árvizek, hóhullámok és aszályok intenzitásának gyors változása volt megfigyelhető. A klímaváltozás hatására bekövetkező folyamatok és szélsőséges időjárási viszonyok egyre nagyobb hatással vannak környezetünkre, amelyek már nemcsak globálisan, hanem regionális és lokális szinten is érzékelhetők, kimutathatók. Ilyenek például az egyre gyakoribb ár- és belvizek, valamint az aszályos időszakok intenzív váltakozása, amelyek egyre nagyobb problémát jelentenek az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás során. A Kárpát-medencében is bekövetkező szélsőséges időjárási viszonyok egyaránt hatást gyakorolnak a természeti, gazdasági, politikai és társadalmi környezetre. A kapcsolódó problémákat azonosítani kell, és a hatásaik mérséklésének lehetőségeire kell összpontosítanunk. Meg kell tanulnunk alkalmazkodni, különböző scenáriókat felépíteni, hogy a körülményekhez képest felkészülten tudjunk reagálni a hirtelen kialakuló eseményekre.

A klíma változásának hatására kialakuló problémák napjaink egyik legfontosabb és meghatározó kérdései, melyek a legmeghatározóbb mozgatórugóját képezik a disszertációm elkészítésének. Témaválasztásom ugyanakkor személyes indíttatású is, mivel szülőfalum, Csíkszenttamás (Románia) esetében megtapasztalhattam az Olt folyón hirtelen kialakuló árvíz hatását és a klímaváltozás hatásának következményeit. Munkámmal szerettem volna hozzájárulni a hasonló helyzetek mérsékléséhez. Kutatásom egy tágabb nézőpontból, a Kárpát-medence területén megjelenő klímaváltozás jelenségeitől halad egészen a kisebb vízgyűjtő szinten bekövetkező hatások vizsgálatáig. Mintaterületem, a Tarna vízgyűjtője sok hasonlóságot mutat, az Olt felső szakaszának területét illetően, amely a későbbiekben újabb kutatási kérdések megválaszolására és vizsgálatokra nyújthat lehetőséget. Továbbá azért esett a választásom a Tarnára, mivel változatos domborzat jellemzi, ugyanakkor gyakran kialakulnak a területen gyors lefolyású árvizek, villámárvizek, illetve magyarországi szintjén reprezentatívnak mondható a kisvízfolyások tekintetében.

Kutatásom során, két szintjén különböző módszerekkel vizsgálom a klímaváltozás hatásait, kiemelt figyelemmel a csapadékviszonyok változására és azok hidrológiai következményeire. A vízgyűjtő szintű vizsgálatok lehetőséget biztosítanak a környezet és a csapadéklefolyás kapcsolatának

vizsgálatára. Ez a fajta megközelítés a vízfolyások szerepét egy tágabb nézőpontból vizsgálja, ugyanakkor komplexebb összefüggésrendszer kibontakozására ad lehetőséget. Sokszor nehézséget okoz az adathiányos környezetben történő vizsgálatok és előrejelzések megalkotása, viszont több paraméter együttes alkalmazása egy interdiszciplináris közeget alakít ki a válaszok megfogalmazása során.

A kutatás egyik jelentős része volt elsajátítani a hidrológiai modellek használatának lehetőségét és a modellépítés folyamatát, valamint a szükséges bemeneti adatok előkészítésének lépéseit, mivel az egyetemi oktatás jelenleg ezt nem tartalmazza.

A választott téma nagy spektrumot fed le, ugyanakkor részletes információkat ad a Kárpát-medence klimatológiai változásának alakulására. Mindemellett a területspecifikus, kisebb vízgyűjtőre gyakorolt hatások és változások, árvízhelyzetek során alkalmazható hidrológiai modellek esetében is fontos eredményeket fogalmaz meg.

A klímaváltozás egy rendkívül széleskörű és összetett téma, amely számos tudományterület témakörében megjelenik. Dolgozatom megírása során egy integrált szemléletű nézőpontot választottam, amely a természeti elemek kapcsolódási rendszerének együttesét és azok összefüggéseit vizsgálja a nagyobb tájegységtől egészen az egyedi, specifikus mintaterületig.

Az általam megfogalmazott eredmények segítséget nyújthatnak a Tarnán kialakuló árvizekkel szembeni lehetséges felkészülési stratégiák kidolgozásában, mivel a modellek reprodukálhatják egy esetlegesen bekövetkező árvíz levonulásának hidrológiai körülményeit. Továbbá segítséget nyújthat az önkormányzatok, döntéshozók és tervezők számára az árvízhelyzetekre való felkészülés problémaközpontú következtetéseinek megfogalmazásában.

Kutatásom során az alábbi kérdésekre kerestem a választ:

1. Hogyan változtak a hőmérsékleti, párolgási és csapadéktendenciák a Kárpát-medencében a CarpatClim adatbázis alapján 1960 és 2010 közötti időszakban? Megfigyelhető-e változás a területi eloszlás tekintetében?
2. Meghatározható-e az éghajlatváltozásra érzékeny területek elhelyezkedése a Kárpát-medencében az éghajlati változók összességének függvényében?
3. Kimutatható-e szignifikáns időbeli és térbeli változás az E-OBS adatbázis csapadékadatában a Tarna vízgyűjtőjén az 1960 és 2020 közötti időszakban?
4. Milyen eredményességgel alkalmazható a HEC-RAS 5.0.7 hidrológiai és hidrodinamikai szoftver modellje egy kisvízfolyás árvízi eseményeinek modellezésére adathiányos környezetben, korlátozott számú hidrológiai adat elérhetősége esetén?
5. Mely előtési modellezési megközelítés ad pontosabb és megbízhatóbb eredményeket a Tarna esetében: a teljes terület egyetlen egységként történő modellezése, vagy a külön szakaszokra bontott területi modell alkalmazása?
6. Milyen mértékben és milyen módon befolyásolja a hidrológiai modellek pontosságát és hatékonyságát az árvízi események időtartama és nagysága a Tarna példáján? Mekkora mértékű eltérés figyelhető meg a mért és modellezett eredmények között?

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. A globális klímaváltozás hatásainak vizsgálata

Az elmúlt évtizedek egyik legnagyobb környezeti változása és egyben befolyásoló tényezője a klímaváltozás (Tollefson 2022; Kovács et al. 2024). A Föld átlaghőmérsékletének emelkedésével számos változás következik be, amelyeknek többnyire negatív következményeit tapasztalhatjuk. A változások mértékével nő a következmények súlyossága is. Az éghajlatváltozás hatásának következtében eltolódnak az átlaghőmérsékleti értékek, időjárási szélsőségek, anomáliák alakulnak ki és egyre gyakoribbá válnak az extrém időjárási események. Ennek következményeként társadalmi és gazdasági változások következnek be (Meehl et al. 2000; Bartholy and Pongrácz 2007; Collins et al. 2019; Salmaso et al. 2021).

A Copernicus Climate Change Service és a World Meteorological Organization (WMO) jelentései alapján a 2022 év volt a második legmelegebb év Európában, ezt követte a 2024-es év, amely során megközelítőleg 1,55 °C fokkal haladta meg az 1850-1900 évek közötti szintet a globális átlaghőmérséklet. A Berkeley Earth kaliforniai kutatószervezet elemzése szerint 2024 volt a legmelegebb az 1850-es évek óta, viszont ez az érték akár tovább növekedhet (Copernicus Climate Change Service [C3S] 2024; WMO 2024; Rohde 2025).

Változások figyelhetők meg a csapadékos időszakok és a száraz időszakok hosszúságában és mértékében. Ye (2018) eredményei szerint a száraz időszakok átlagos és szélsőséges időtartama a hőmérséklet emelkedésével párhuzamosan megközelítően 7,0%-kal (0,24 nap/°C), illetve 7,7%-kal (0,86 nap/°C) növekszik. Ugyanakkor a nyári csapadékos időszakok időtartama, a vizsgált oroszországi térség egészére vonatkozóan átlagosan 1,3%-kal (-0,02 nap/°C), és 2,2%-kal (-0,10 nap/°C) csökken. Kutatások során az éves középhőmérséklet változásának tendenciáit is definiálták és javaslatokat fogalmaztak meg az éghajlati megfigyelések, statisztikák és trendek koherens struktúrájának a kidolgozására (Meehl et al. 2007; Gubler et al. 2023; Scherrer et al. 2024).

Az éghajlatváltozás kérdését számos megközelítésben vizsgálják, mivel a hatása globális és regionális szinten egyaránt számottevően érzékelhető. Az éghajlatváltozás a környezet komplex rendszereinek átalakulásához vezethet, ezért szélesebb körű megközelítést és különböző módszerek kombinálását igényli (Garamhegyi et al. 2018; Simpson et al.

2021; Lee et al. 2023). Hatást gyakorol az ökoszisztémák változására és állapotára, a biodiverzitás változására és a gazdasági terméshozamok csökkenésére. Számos körülményt és változást kell figyelembe vennünk ahhoz, hogy a biodiverzitás megőrzését elő tudjuk segíteni, mivel a természetközeli helyek területe egyre inkább csökkenő tendenciát mutat (Hufnagel et al. 2008; Schlaepfer és Lawler 2023; Wang et al. 2024). A hatások egyre súlyosabb természeti változásként mutatkoznak meg, mint például a szárazság időbeni és területi megnövekedése, az aszályok, erdőtüzek gyakorisága, a gleccserek visszahúzódása, a földhasználat megváltozása, árvízi események gyakoriságának növekedése, fertőzések terjedése, fokozódó talajerózió, csökkenő talajvizek észlelése, a csapadék gyorsabb lefolyása, folyók vízhozamának változása és édesvizek minőségének a romlása. Több további súlyos hatást említhetünk, viszont az egyik legsúlyosabb következmény a vízkészletek csökkenésével kapcsolatos (Pesaresi et al. 2017; Munia et al. 2020; Liu et al. 2024).

Az egyre gyakoribb extrém vízhiányos időszakok, aszályok megjelenése, illetve víztöbblet, belvíz és árvíz gyakoriságának növekedése egyaránt várható, sőt növekedés valószínűsíthető az események időtartamát illetően is (Hayashi et al. 2010; Hagemann et al. 2013; Munia et al. 2020).

A regionális klímaváltozás egyik következménye a csapadék tér és időbeli kiegyensúlyozatlan változásának (Khan et al. 2021; Qamar et al. 2023) hatása a hidrológiai ciklus esetében legfőként a víz körforgásának felgyorsulásaként jelentkezhet, amelynek további súlyos következményei várhatóak (Szöllősi-Nagy 2018a; Szöllősi-Nagy 2020; Ehtasham et al. 2024).

A hidrológiai vízciklus alakulásában bekövetkező változásokat befolyásolja a népességnövekedés, amelynek hatására csökkenni fog az egy főre jutó vízkészlet mennyisége, amely akár nemzetközi konfliktusokat idézhet elő. Lényeges a fenntartható vízkörforgás megértése, a környezeti fenntarthatósági mutatók felmérése, természeti-, társadalmi vízrendszerek összekapcsolása és integrált vízgazdálkodás kialakítása (Wolf 2007; Yang et al. 2021; Bilalova et al. 2023).

A klímaváltozás folyamatát az ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testületének (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) Hatodik Értékelő Jelentése is alátámasztja (IPCC 2022). A jelentések szerint a Föld felszínének hőmérséklete növekvő tendenciát mutat, sőt hőmérsékleti rekordok megdőlése prognosztizálható (Iturbide et al. 2020; Trenberth et al. 2007; Divinszki et al. 2024; Copernicus Climate Change Service (C3S) 2023;

WMO 2024). Az éghajlatváltozás egyaránt hatást gyakorol a természet és az emberi társadalmak kapcsolatára, az emberi életre, az emberi életterre, a természetes és épített környezetre (Collins et al. 2019; Berényi et al. 2021; Kiss et al. 2022a), ezáltal befolyásolja a társadalom éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodási képességét, kapcsolatát és feltárja ehhez kapcsolódó korlátait (Gregersen et al. 2021; Hidalgo-Crespo et al. 2022; Kiss et al. 2022b; Santos et al. 2023). Bár az országok felfigyeltek a jelzett problémára, ezért 194 ország írta alá a Párizsi Megállapodást. Hosszú távú célkitűzésként megfogalmazták, hogy a globális átlaghőmérséklet emelkedését az iparosodás előtti értékhez képest 2°C alatti szinten kell tartani, sőt leginkább az 1,5 °C értéket kellene megközelíteni (Spinoni et al. 2016; Faragó 2016; Faragó 2018). Azonban a legaktuálisabb tanulmányok alátámasztják, hogy ez a célkitűzés nem valósult meg, illetve ez az érték akár még fokozódhat is (Copernicus Climate Change Service (C3S) 2023; WMO 2024). A környezetvédelmi kezdeményezések, követelmények és környezetvédelmi célkitűzések előtérbe helyezése az Európai Unió részéről is kiemelt fontosságúnak bizonyul (Marín Durán és Morgera 2012; Cifuentes-Faura 2022; Kovács et al. 2024). Az Európai Unió 2050-re célul tűzte ki, hogy nullára csökkentse az üvegházhatású gázok kibocsátását. A 2021-es Európai Klímátörvény kötelezővé tette, hogy törekedni kell arra, hogy 2030-ra megközelítőleg 55%-kal csökkenteni tudjuk a kibocsátást az 1990-es szinthez képest (EP 2023; Calvin et al. 2023). A globális klímapolitika jelenleg eléggé változatos nézeteket tükröz, mert egyes országok visszavonulnak a klímaváltozás mérséklésének témakörétől, ez azonban súlyos következményeket eredményezhet.

Ahhoz, hogy megoldásokat és stratégiákat tudjunk kidolgozni a jelenleg is növekedést mutató éghajlati változásokra, a legtöbb meglévő adat és paraméter összegyűjtését követően globális és regionális szinten egyaránt szimulációkat és modelleket kell építenünk. A változások mértékére és alakulására, valamint ezek hatásainak az alakulására csak az éghajlati modellszimulációk adhatnak megközelítő válaszokat (Bartholy et al. 2007; Tebaldi et al. 2011; Power et al. 2011; Van Vuuren et al. 2011; Qamar et al. 2023).

Az eddigi kutatások azt bizonyítják, hogy az éghajlat változékonyságának hatására egyre súlyosabb árvizek alakulnak ki, mivel az éghajlatváltozás az árvizek egyik fő kiváltó okának bizonyul, mivel nemcsak a csapadékeloszlás tendenciáját módosítja, hanem tovább növeli az intenzív,

szélsőséges csapadékesemények számát és intenzitását (Kunkel et al. 2013; Prein et al. 2017; Eilander et al. 2023).

2.2. Klímaváltozás hatásai a Kárpát-medence és Magyarország területén

Az éghajlatváltozás hatása nemcsak globális szinten, hanem a Kárpát-medencében is érzékelhető. A szélsőséges természeti jelenségek nem csak az árvizek, hanem az aszályos időszakok gyakoriságában is megmutatkoznak. Hazánk árvíz, belvíz és aszály tekintetében is veszélyeztetett területnek számít (Pálfai 2004; Kerényi 2008; Blanka-Végi et al. 2024).

A Kárpát-medence különösképpen kedvezőtlen adottságokkal rendelkezik a vízgazdálkodás szempontjából, mivel ezen a területen található a régió legnagyobb sík területe, az Alföld. Éghajlata a Köppen-rendszer besorolása szerint nagyrészt a meleg mérsékelt éghajlati övben található, ugyanakkor vízháztartását és vízrendszerének alakulását nagyban befolyásolja, a körülölelő hegyvidékekről lefolyó vizek mennyisége. Az eddigi kutatások azt a tényt támasztják alá, hogy a nyári csapadékcsökkenés és a tavaszi párolgásnövekedés hatására a hőmérsékleti anomáliák értéke, a nyári aszályok gyakorisága Közép-Európában és a Kárpát-medence területén növekedő tendenciát mutat (Pal et al. 2004; Moberg et al. 2006; Bartholy et al. 2015). Továbbá az antropogén hatások is hozzájárulnak a hidrológiai körforgás fokozódásához, amely a Kárpát-medence, a Duna vízgyűjtőjének egy része és a Tisza részvízgyűjtő területén is megmutatkozik (Jánosi et al. 2023).

A Kárpát-medence és Magyarország területén nemcsak az árvizek, hanem az aszályos időszakok hosszának megnövekedése is előreláthatóan gondokat fog okozni. Az aszály az éghajlatváltozás hatására kialakuló jelentős természeti veszélynek tekinthető. A fokozódó aszály a vízmennyiség és a vízkészlet csökkenését eredményezi (Szalai et al. 2000; Kundrát et al. 2016; Kertész 2016). Ez a vízhiány korlátozza a mezőgazdaságban termesztendő növények fajtáit és a termés minőségi és mennyiségi csökkenését eredményezi (Deák et al. 2014; Valkó et al. 2014; Milosevic et al. 2015; Ray et al. 2015), befolyásolja az élőhelyek állapotát, káros folyamatokat generálhat, például elősegíti az invazív fajok terjedését (Hellmann et al. 2008). A melegebb éghajlat és az aszályos időszakok hozzájárulhatnak az erdőtüzek gyakoribb előfordulásához is (Deák et al. 2014).

Magyarország területén is az egyik kifejezetten nagy környezeti kihívást jelentő esemény az aszály (Pálfai 2004; Láng et al. 2007). Több tényező együttes hatására alakul ki tartós vízhiány, mint például a csapadék mennyisége és eloszlása, a párolgás mértékének megváltozása, a talajtani és növényzeti sajátosságok, a zöldfelületek és beépített területek növekedésének változása által. Az aszályra való érzékenységet a mezőgazdasági területek talajnedvesség megtartási képessége, a csapadékmintázatok változása és az erre adott növények reakciója is befolyásolja (Nagy et al. 2020; Mohammed et al. 2020). Az aszály több területen fejt ki negatív hatását, például Mezősi és társai (2016) tanulmányában az aszály növényzetre gyakorolt hatását és a mezőgazdasági aszályt említi, Gulácsi és Kovács (2018) munkájában a vegetációra gyakorolt hatásait vizsgálata, az erdőterületek méretének változása és az invazív fajok megjelenése kapcsán. A regionális vízkészlet alakulásában is meghatározó tényező az éghajlat folyamatos változása (Tran et al. 2022). Pálfai már 2002-ben felhívta a figyelmet arra, hogy az ország nagy részét érintő mérsékelt aszályval kell számolnunk (Pálfai 2002; Mezősi 2011), ami 2022-ben országos szinten extrém mértékű volt és okozott problémát a növénytermesztésben. A különböző klímamodellek, mint például az ALADIN, RCM, REMO, PRECIS rámutatnak arra, hogy jelentős változásokra kell felkészülni a következő évtizedekben (Mika 2009; Szabó et al. 2011; Bartholy et al. 2015; Mezősi et al. 2016).

A nagyobb mennyiségű, nagy intenzitású, de ritkább csapadékesemények és a magasabb hőmérsékletű, hosszabb száraz időszakok mind a mezőgazdaság, mind a vízügyi tervezés számára kihívást jelentenek. A kutatók a 21. század nyári időszakaira hasonló változásokat vetítettek előre Közép-Európára vonatkozóan (Pongrácz et al. 2014). Blanka és munkatársai (2013) arra a megállapításra jutottak kutatásaik során, hogy 2100-ig 4-8 °C-os emelkedés várható és ez a hőmérsékletemelkedés legfőképp az Alföldön lesz érzékelhető (Blanka et al. 2013). Garamhegyi és munkatársai (2018), Pálfai és Herceg (2011) jelezték az aszály veszélyét a Kárpát-medencében és a Balkán térségében. Kis és társai (2025) kutatásukban kimutatták, hogy a Pálfai-aszályindex alapján a 21. század végére a különböző kibocsátási forgatókönyvek (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) alapján a súlyos aszályok térbeli előfordulása jelentősen növekedhet Magyarországon, különösen az Alföld déli területein.

A Kárpát-medence, ezen belül is főleg a Tisza vízgyűjtője egy olyan terület, ahol mindhárom súlyos természeti esemény, árvíz, belvíz és aszály

egyaránt előfordulhat. A kutatások alapján, Magyarország területén is növekedni fog az átlaghőmérséklet, különösen jelentős eltéréseket jeleznek előre a nyári és az őszi időszakokra vonatkozóan. A fagyos napok számát illetően csökkenés várható, míg a hóhullámok gyakorisága megnövekedik, ugyanakkor a csapadék területi eloszlásának egyenlőtlensége fokozódik (Bartholy and Pongrácz 2007; Bartholy et al. 2015; Kis et al. 2015). Ahhoz, hogy ezekre az eseményekre megfelelően fel tudjunk készülni, lehetséges védekezési stratégiákat kell kidolgoznunk és a környezeti tényezőkhöz való alkalmazkodást kell előtérbe helyeznünk.

A 2020. évi XLIV. törvény a klímavédelemmel kapcsolatos célkitűzéseket foglalja magába. Magyarország törvénykezése, jogi felépítése és stratégiai- cselekvési tervei, közép- illetve hosszútávon is foglalkoznak ezzel a nem csak globális problémával. Ezzel összefüggésben olyan intézkedések bevezetésére lenne szükség, amelyek mérséklő hatást gyakorolhatnak a klímaváltozásból eredő negatív hatásokra és klímaaggodalmakra (Farkas Csamangó 2022; Kiss et al. 2022b; Kovács et al. 2024).

Magyarország világviszonylatban kis országnak tekinthető, mégis számos tudományos kutatás született az elmúlt években a klímaváltozás hatásainak vizsgálatáról különböző aspektusokban. Többek között Várallyay (2005) a klímaváltozás lehetséges talajtani hatásait vizsgálta a Kisalföldön, viszont arra a következtetésre jutott, hogy a térség változatos természetföldrajzi adottságainak köszönhetően, nem lehet biztos és határozott következtetéseket megfogalmazni a talajtani-, talajhasználati változásokkal kapcsolatban. Késmárki (2005) hasonló kutatást folytatott, ahol a klímaváltozás hatásait és válaszait vizsgálta a Kisalföld területén a szántóföldi növénytermesztés tekintetében, amelynek eredményeként javaslatokat fogalmazott meg a valószínűsíthető károk csökkentése érdekében. A klímaváltozás hatásainak vizsgálata Magyarország tekintetében is fontos területnek mondható, különböző szakterületekkel összekapcsolva. Erre rámutatnak Láng és munkatársai (2007) által megjelent „*A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok, A VAHAVA jelentés*” munkája is, amely összegyűjtötte több hasonló a klímaváltozás kérdéskörrel kapcsolatos tanulmányt (Láng et al. 2007).

Globális viszonylatban számos modell és hatásvizsgálat készült a klíma alakulásának változásáról, azonban, ha kisebb területen szeretnénk ezeket az összefüggéseket vizsgálni, és az eredményeket alkalmazni,

figyelembe kell vennünk a modellek felbontását. Amíg egy globális esetben jól körülhatárolható és skálázható az eredmények, addig egy kisebb térség klímájának alakulása sokkal instabilabb és torzítások fordulhatnak elő (Mika 2005; Pierce et al. 2009; Navarro-Racines et al. 2020; Gebrechorkos et al. 2023). A globális klímamodellek általában 25-250 km közötti rácshálót alkalmaznak, a regionális klímamodellek megközelítőleg 10-12 km felbontású rácshálóban tartalmazzanak adatokat (Iorio et al. 2004; Klaver et al. 2020).

2.3. A vízgyűjtők karakterisztikájának vizsgálata, vízgyűjtő vízlevezetési sajátosságai

Vízgyűjtőnek nevezzük azt a területet, amely vízvásztókkal van körülhatárolva, amelyről a patak, folyó vagy folyórendszer összegyűjti a csapadékból vagy hóolvadásból származó vizet. A víz lefolyását meghatározzák a terület lejtésviszonyai, alakja, kiterjedése, növényborítottsága, valamint kőzettani és talajtani sajátosságai. A vízgyűjtőt használjuk a leggyakrabban, mint természetföldrajzi egységet, amely egy jól meghatározott működésű, természetföldrajzi rendszer (Kerényi et al. 2013).

A felszíni vízgazdálkodás egyik alapvető célja a felszíni vizek társadalmi és gazdasági célú fenntartható hasznosítása, figyelembe véve a vízzel kapcsolatos ökoszisztémák zavartalan működését. A vízgazdálkodással kapcsolatos feladatokat, jogokat, kötelezettségeket és előírásokat a vízgazdálkodásról szóló 1995. évi LVII. törvény határozza meg (OVF 2016). A vízgyűjtő szintű vízgazdálkodás egy fenntarthatóságra törekvő rendszer fontos elemét képezi, mivel a felszíni vizek, vízkészletek megőrzése létfontosságú az emberi társadalom, a környezet és az ökoszisztémák fenntartása szempontjából (Mészáros 1978; Vermes 1997; Stelczer 2000).

A vízgyűjtők területén zajló események és változások különböző szoros kapcsolatban állnak egymással. Ennek köszönhetően a vízgyűjtőn történő csapadéklefolyást is több tényező befolyásolja. Ez alapján két fő csoportot különíthetünk el: természeti és antropogén tényezők. Ezeket a csoportokat további tényezőkre bonthatjuk, amelyek hatást gyakorolnak a lefolyásra.

A topográfiai jellemzők, mint például a lejtők meredeksége és kitétsége, befolyásolja a hóolvadás ütemét és a csapadék lefolyásának gyorsaságát. A meredek lejtőkön a víz gyorsabban lefolyik, mint az enyhébb

lejtők esetében, ezért az enyhébben lejtő területeken nagyobb lehet a beszivárgás, infiltráció mértéke.

A Kárpát-medence esetében a csapadék-ellátottságot, a lokális csapadékból direkt módon származó csapadék mintegy 56 km^3 , a hegységekben és a peremterületeken lehullott csapadék lefolyásának köszönhetően, megközelítőleg 114 km^3 víz jutott a folyók medrébe (Péczely 1998; Mezősi 2011). A felszíni lefolyás mértékét a síkság és a dombvidék, valamint a hegyvidék közötti határvonal esetében meghatározó 2 l/s/km^2 értéknél állapítják meg (Stelczer 2000; Mezősi 2011).

A talaj típusa is meghatározó szerepet játszik, mivel ezek vízmegtartó és vízáteresztő képességük jelentősen eltér, amely befolyásolja a csapadékvíz elvezetését vagy beszivárgásának mértékét. Például a homokos talajok nagyobb vízáteresztő képességűek, mint az agyagos talajok, ezért befolyásolja a felszíni lefolyás mértékét. A kőzetrétegek szerkezete szintén meghatározó tényező, mivel meghatározza, hogy a víz milyen mélységig tud beszivárogni (Várallyay 1985).

A víz lefolyásának jellegét döntően meghatározza a vízgyűjtő mérete, alakja, lejtése és karakterisztikája. A kisebb folyók esetében egy nagyobb intenzitású rövid idő alatt lehulló nagy mennyiségű csapadék is eredményezhet hirtelen árhullámot, amely jellemzően egy-két napig tart. Ha a vízgyűjtőterület dombvidéki, illetve hegyvidéki, meredekebb lejtésű, akkor már néhány órás intenzív csapadék is jelentős vízszintemelkedést eredményezhet. Nagyobb folyóknál ezzel szemben a lefolyás lassabb, az árhullám időben elnyújtottabb (Pirkhoffer et al. 2013).

A természeti adottságok között fontos szerepet a vízhálózat nagysága, sűrűsége és a vízgyűjtő terület geomorfológiai jellemzőinek alakulása, mivel egy sűrűbb vízhálózat gyorsabb lefolyást eredményez, mint kevésbé sűrű vízhálózat esetén, ahol nagyobb a beszivárgás.

A csapadék mederben történő lefolyását a folyók szakaszjellege nagyban befolyásolja. A folyók osztályozására már korábban is történtek kísérletek, amelyek megpróbálták a folyókat bizonyos kategóriákba sorolni. A felszínformálás szempontjából egyik legismertebb besorolás a Cholnoky-féle beosztás. Cholnoky Jenő, Albert Heim munkáját gondolta tovább, amely a folyók munkavégző képességén alapult. Ez alapján alsó-, közép- és felsőszakasz jelleget határozott meg. Ez a lehatárolás túl merevnek bizonyult, ezért szükséges volt további altípusok meghatározása. Ezért meghatározták a felső szakasz típusára jellemző „bevágódó” jellegét és az alsó szakaszra a

„hordaléképítő” jelleget (Somogyi 1996; Mezősi 2011). Ezeknek a jellegeknek a meghatározása az árvízi események során segítséget nyújthat a felszínalakító tevékenység becslésére.

A vízgyűjtő szintű csapadéklefolyás egyik meghatározó eleme a növényborítottság mértéke, mert a sűrű növényzet csökkenti az esőcseppek talajra gyakorolt eróziós hatását (csepperózió) és növeli a beszivárgás mértékét, de a fák lombkoronája és gyökérrendszere is befolyásolja a lefolyó víz sebességének és mennyiségének a mértékét, az előbbivel négyzetes, az utóbbival lineáris az eróziós hatás, illetve leveleken, ágakon, fatörzsön az intercepció hatása is érvényesül (Lee 1980; Rácz 1981).

A vízgyűjtők területét nem csak a természeti jelenségek, hanem az antropogén hatások is nagymértékben befolyásolják, a vízgyűjtő egész területére és elemeire hatást gyakorolnak. A talaj esetében a nagyobb kiterjedésű mélyszántás és öntözés, a domborzat esetén a tereprendezés, utak építése, csatornaépítés vagy a folyók árterén történő beavatkozások. A növényzet változására hatást gyakorol a túllegettetés, az invazív fajok betelepítése, az erdőirtás, de ugyanakkor a fásítás is (Mezősi 2011). Ezek az antropogén hatások együttes változásával befolyásolhatják a vízrendszert, a vizek minőségi állapotát és a vízgyűjtő terület vízháztartását is.

A felszíni vizek vízháztartását tovább befolyásolja a csapadék mennyisége és eloszlása, valamint a domborzat, ezek együttesen határozzák meg a lefolyási viszonyokat, és ezáltal a vízzállítás mértékét.

Több kutatás is foglalkozott a csapadék-lefolyás modellezésével vízgyűjtő szinten. Négyesi és Nagy (2023) kutatásában a csapadék-lefolyás modellezését tűzte ki célul közepes vízgyűjtőterületen, eltérő típusú csapadékadatok felhasználásával. Eredményként megfogalmazták, hogy a műholdas adatok a legfelhasználhatóbbak. Összefoglaló tanulmány is készült a témában, ahol Sitterson és munkatársai (2018) a lefolyási modellelhetőségek összehasonlítását tűzte ki célul, amelynek eredményeként megfogalmazták, hogy figyelembe kell venni a rendelkezésünkre álló adatokat és a modell típusok korlátait, ahhoz, hogy megfelelő modellkörnyezetet válasszunk a vizsgálathoz.

2.4. Árvizek és villámárvizek

Az árvizek olyan természeti jelenségek, amelyek a környezeti folyamatok részét képezik. Az árvízi jelenség a történelem folyamán mindig az emberiség életének részét képezte, ezért különböző stratégiákat és

alkalmazkodási megoldásokat fejlesztettek ki, majd alkalmazták a károk csökkentésére és mérséklésére. Ez azonban komoly műszaki, területi és tervezési munkát jelentett (Tápay és Szalai 1954; Nagy és Szlávik 2004). Természeti katasztrófáról akkor beszélhetünk, ha nagyobb anyagi és gazdasági károkat okoznak, vagy emberéleteket követelnek (Nagy 2009).

Mivel egyetlen egy árhullám sem mondható azonosnak, ezért változatosságuk, kialakulásuk és lefolyásuk is sokféle hatást gyakorol az ártér területére és az áradást érintő területekre. Az áramló víz nemcsak előntéseket és károkat eredményez, hanem a hordaléka is alakítja a környezetet (Szlávik et al. 2004; Szlávik 2005; OVF 2016).

Az éghajlatváltozás hatására bekövetkező változások kezelésére azonban új módszereket és stratégiákat kell kidolgozni. A természeti katasztrófák gyakorisága az elmúlt években egyre növekvő tendenciát mutat, főképp az árvizek nagyfokú és egyre nagyobb károkat okozó eseményei váltak globálisan számottevővé (Alfieri et al. 2018; Pörtner et al. 2022; Eilander et al. 2023).

Magyarország alvízi országnak tekinthető, mivel a folyók felső folyása az országhatáron kívül található és ez meghatározza az ország felszíni vízgazdálkodását (OVF 2017). Az árvizek egyre nagyobb árvízszinteket produkálnak, így ezzel párhuzamosan megnőtt a potenciálisan veszélyeztetett területek nagysága is. A nagy folyók áradásai mellett a kisebb folyók árhullámai, amelyek rövid időn belül is kialakulhatnak, szintén jelentős károkat képesek okozni. A kis folyók árvizei Magyarország területén a domborzati és éghajlati adottságok miatt gyakoriaknak mondhatók (Koris 2002; Szlávik 2003; Pirkhoffer et al. 2013).

Az árvízi eseményeket a víz eredetének függvényében két csoportra oszthatjuk. Csapadékból vagy hóolvadásból származik a folyók vízszintjét növelő víz mennyiségének nagy része, ennek következtében a leggyakoribb árvizek a tavaszi és a nyári időszakokban alakulnak ki (Péczely 1998; Stelczer 2000; Martonné Erdős 2006). Magyarország folyóira jellemző az éven belüli változékonyság, a mellékfolyók esetében a felső szakaszra jellemző a heves vízjárás, a mederben történő hirtelen vízszintnövekedés az éghajlati viszonyok gyors megváltozásának hatására. A csapadék mennyiségének rövid- és hosszútávú változásainak szélsőséges értékei növelik a vízjárás kontinentalitását (Martonné Erdős 2006; OVF 2017). A Magyarországon végbemenő természetföldrajzi változások, antropogén beavatkozások és a folyók felszínalakító tevékenységének hatásának jelentőségével Gábris (2022) foglalkozott részletesen, rávilágítva arra, hogy a

megváltozott csapadékeloszlás és szélsőséges időjárási események befolyásolják a folyók vízjárását, a medrek és árterek változását.

A Magyarország területén történő folyószabályozási munkálatok nagymértékben befolyásolták az árhullámok levonulását. Ezekkel a beavatkozásokkal nagyobb megmunkálható mezőgazdasági területek váltak elérhetővé, ugyanakkor a nagyvízi mederkezelési feladatok is felértékelődtek, mivel, ha nem megfelelő a víz lefolyása vagy a meder mélysége, akkor a töltések stabilitását kockáztathatjuk. Ezek az egymásra épülő feladatok országos szinten befolyásolják a vízgazdálkodás megfelelő szintű fenntartását (Szlávik et al. 2004). A Tarna vízszabályozásáról az első írásos emlékek 1715-ből vannak, azonban a vízrendszerét nagyban befolyásoló és szabályozó beavatkozások az 1900-as évek elején kezdődtek el (VGT 2010).

A villámárvizek rövid idő alatt nagy intenzitású csapadék hatására alakulnak ki. A villámárvíz, vagyis a „flash flood”, mint jelenség a nemzetközi szóhasználatban már régóta ismert (Schmittner és Giresse 1996; Pirkhoffer et al. 2009). Magyarországon azonban jóval később kezdtek foglalkozni a jelenséggel, mivel a hegyi- és dombvidéki vízfolyások háttérbe szorultak a nagyobb folyók árvizeivel szemben. Csermák Béla volt az első, aki összefoglaló és szélesebb körű ismereteket fogalmazott meg a hegyvidéki és dombvidéki hidrológiai vízrendezéssel kapcsolatban (Csermák 1985; Pirkhoffer et al. 2009).

A kormány által elfogadott keretstratégiai terv 2030-ig olyan célkitűzéseket fogalmaz meg a magyar vízgazdálkodással kapcsolatban, amelyek hozzájárulnak az országos vízgazdálkodás fejlesztéséhez és stabil fenntartásához. Többek között célul tűzte ki, az integrált vízgazdálkodás létrehozását, a víz minőségének fokozottabb védelmét, a vízkárelhárítás során a megelőzés központú szemlélet felértékelését, a vízi ökoszisztémák védelmét, a csapadékvíz-gazdálkodás minél hatékonyabb hasznosításának megvalósítását (Reich 2019).

2.5. Hidrológiai modellek kiválasztása és alkalmazása

A technika és a tudomány fejlődésével a különböző tudományterületeken egyre inkább felértékelődnek és fejlődnek a modellezési lehetőségek. Ez alól nem kivétel a hidrológia, a vízgazdálkodás vagy akár az árvízvédelem területe sem. A hidrológiai modellek alkalmazása és paraméterezése kulcsfontosságú eszköz a vízügyi ágazat munkatársainak és a döntéshozók számára. Lehetőséget ad számos probléma és kérdéskör megválaszolása során többféle szcenárió elkészítésére. Habár másfajta szemléletmódot és megközelítést igényelnek, de a hidrológiai modellek hasznosnak bizonyulnak, például az árvízi kockázatkezelésben és előrejelzések készítésében, felszíni és felszín alatti vízmozgások vizsgálata során (Kovács et al. 2015; Alfieri et al. 2018; Chen et al. 2020). Az elmúlt években a technika gyors fejlődésével, a modellezési lehetőségek tárháza is egyre szélesebb körűvé vált. Ennek hatására az alkalmazásuk és a modellek felépítése is egyre szerteágazóbb. A kutatások területén is előtérbe került a numerikus modellek alkalmazása (Lóczy et al 2012; Dottori et al. 2016).

A korai beavatkozás és a károk mérséklése során, az előrejelző rendszerek és a hidrológiai modellek jelentős segítséget nyújthatnak a hirtelen fellépő árvizek esetén. A jelenlegi hagyományos eszközök kihívást jelentenek az időben történő előrejelzés szempontjából, ami új módszerek bevezetését teszi szükségessé. Az előrejelzések alapján történő felkészülés és az innovatív árvízkezelés segíthet a károk enyhítésében (Bulti és Abebe 2020; Eilander et al. 2023).

A HEC-RAS szoftver egy amerikai fejlesztésű, ingyenesen elérhető program és széles körben nyújt lehetőséget a hidrológiai modellezés területén. Több nemzetközi tanulmány is alkalmazta ezt a modellkörnyezetet különböző mintaterületeken. Ogras és Onen (2020) tanulmányában bemutatta a Tigris folyó példáján, hogy a HEC-RAS modell képes szimulálni a különböző áradások során a felszíni profilokat, továbbá Pregun és társai (2006) tanulmánya alátámasztja, hogy terepi mérések és a digitális modellezés együttesen eredményesen alkalmazható a felszíni vízfolyások modellezésére. Tamiru és Dinka (2021) bizonyította, hogy a HEC-RAS más modellekkel integrálva alkalmasnak bizonyult arra, hogy javítsa a hagyományos előrejelzések pontosságát és megfelelő eszköznél bizonyul az árvízi kockázatkezelésben.

A terepi mérések és a digitális modellezés hatékonyan kombinálhatóak a felszíni vízhozam modellezése során (Pregun et al. 2006),

továbbá a HEC-RAS más modellekkel való integrálása alkalmasnak bizonyult a hagyományos előrejelzések pontosságának javítására, és értékes eszközként szolgál az árvízi kockázatkezelésben (Tamiru és Dinka 2021). Az adatszegény és nagyobb léptékű kisvízfolyásokon végzett vizsgálatok eredményei azonban további vizsgálatokat igényelnek (Ogras és Onen 2020; Murányi és Koncsos 2022; Singh et al. 2021).

A térinformatikai rendszerek segítségével lehetőségünk van további térbeli elemzések elvégzésére, vizsgálatára és térbeli információk gyűjtésére (Zeiger és Hubbart 2021; Tamiru és Wagari 2022).

Számos korábbi kutatásban alkalmaztak modelleket a folyókban zajló folyamatok feltárására és megismerésére. Chen és társai (2020) a folyó vízáramlásának és ártéri területeinek kapcsolatát vizsgálta, amely során megállapították, hogy a hidrodinamikai modellezés megfelelően rekonstruálja a vízrajzi adatokat, valamint jól reprodukálja a folyó és az ártér kapcsolatát árvíziesemények során. Zhang és társai (2021) munkájában összefoglalja a hidrológiai modellek kapcsolatainak sokszínűségét, környezeti paraméterek fontosságát különböző aspektusban. Foglalkoztak kis vízgyűjtők modellezésével különböző szoftverkörnyezetben, például MIKE-SHE felhasználásával (Singh et al. 1999; Aredo et al. 2021; Paudel és Benjankar 2022).

Magyarországi viszonylatban a hidrológiai területén a matematikai és statisztikai módszerek alkalmazása az 1960-as évekre közepén kezdődött el (Csoma és Szígyártó 1969; 1975). Az árvízi események adatait, paramétereit és jellemzőit megfigyelve az árvizek statisztikai változásait, illetve trendek alakulását figyelemmel kísérve igyekeztek új és hasznos eredményeket megfogalmazni.

Magyarország területére vonatkozóan készültek már árvízi modellezések, és az elmúlt évtizedekben egyre inkább előtérbe került nagyobb folyóink részletes felmérése és feltérképezése is. Kiemelt és fontos szerepet kap a tiszai és dunai árhullámok alakulásának és változásának megismerése (Szlávik 2003; Szígyártó 2015). Czigány és munkatársai (2013) Magyarország kisebb területén végeztek árvízi modellezést, viszont nagyrészt a HEC-HMS szoftverkörnyezetet alkalmazták (Czigány et al. 2013). Kovács és társai (2015) az árvizek jelentőségét és hatását a Tisza folyó példáján mutatják be. Nagy (2013) tanulmányában megfogalmazta, hogy a nagyvízi medrek az egyik legfontosabb elemét adják az árvizek levonulásának, és sürgető feladat ezek felmérése és modellezése a hosszú távú árvízi biztonság

megteremtése érdekében. Gashi és társai (2023) a Dráva alsó folyásának vizsgálatát tűzték ki célul, fontos szempontként előtérbe helyezve, hogy az árvízi események levonulása hogyan befolyásolja a meder alakjának fejlődését.

Ugyanakkor a kisebb vízfolyások még mindig háttérbe szorulnak. Sok esetben hiányzik, vagy részben hiányos az árvízhelyzetek levonulásának megismerése a kisebb folyókon, melyek közé tartozik a Tarna is: hiányoznak a nagyfelbontású topográfiai adatok, kevés a vízmérő állomás, kevés a hivatalos keresztmetszvény, hiányzik a meder partvonalának pontos meghatározása és a mellékpatakok vízhozamának adatbázisa.

2.6. A hidrológiai modellek célja, megalkotásának nehézségei és pontosságának vizsgálata

A klímaváltozás új szemléletet követel a hagyományos vízgazdálkodással szemben, legfőképp a specifikus területközpontú megközelítés, modellezés és a területi vízgazdálkodás szempontjából.

A hidrológiai vizsgálatok során a modellezés lehetőséget nyújt permanens és nem permanens modellfuttatásokra, ezáltal az események idő és térbeli változásának vizsgálatára (Bachri et al. 2021; Moya Quiroga et al. 2016). Azonban ismernünk kell ezek felhasználási lehetőségeit, valamint ismernünk kell a célt, hogy milyen feladatra szeretnénk alkalmazni az adott modellt. A hidrodinamikai modellek lehetővé teszik az áramlás nyomon követését, a vízmélység meghatározását, az árhullámok terjedésének szimulálását és a csapadék lefolyásának modellezését. A modellek alapján jól meghatározható a potenciális elöntési területek helye és kiterjedése. Egy árvízi esemény átfogó megértése csak az információk összevonása utáni elemzéssel és következtetések levonásával érhető el (Bulti és Abebe 2020; Zeiger és Hubbart 2021; Tamiru és Wagari 2022).

Egy árvízi jelenség levonulása történhet a folyó megszokott medrében, de egy hirtelen esőzés áradást eredményezhet. Ennek hatására a folyó kilép medréből, a víz meghaladja a partélek magasságát és a kialakult árhullám az árterek, illetve, ha léteznek, szűkségtározók irányába mozog. A hidrodinamikai modellek segítségével az áramlások iránya és nagysága előre jelezhető az elöntési területek helyével együtt (Zeiger és Hubbart 2021).

A modellkörnyezet kiválasztása és a szoftverek alkalmazása attól függ, hogy mi a modellépítés célja. A hidrológiai modelleknek több típusa ismert, mint például a konceptuális modellek, amelyek matematikai egyenletekkel

írják le a víz körforgását és a vízháztartási elemek közötti kapcsolatot. A fizikai alapú modellek fizikai egyenleteket alkalmaznak a vízmozgás és az energiaáramlás modellezésére. További típusba tartoznak a térben osztott modellek, amelyek a térbeli eloszlást és a heterogenitást veszik figyelembe, valamint alkalmazhatók az empirikus modellek, amelyek statisztikai összefüggések alapján képeznek eredményeket.

Általánosan a hidrológiai folyamatok kapcsán kétféle modellezési megközelítés alkalmaznak: az egydimenziós és a kétdimenziós modellezési lehetőséget. Az egydimenziós modellezés esetében a Saint Venant-egyenlet alkalmazása elterjedt, ahol a vízsebesség és a terepkeresztmetszet átlagos adatait alkalmazzák. Az 1D nem permanens vízmozgást a Saint-Venant egyenleteket implicit véges differencia sémával, a 2D esetében a Saint-Venant egyenlet és a véges térfogat módszer alkalmazásával együttesen alkalmazzák (Murányi és Koncsos 2022).

Az egydimenziós modell az áramlás irányának elemzésére megfelelő, viszont nem veszi figyelembe az oldalirányú áramlást, a keresztmetszetek és a távolabbi környezetük topográfiáját. Az egydimenziós modellek esetében egy adott keresztmetszvény rajzolható ki, így nincs szükség átfogó adatokra. A 2D modellezés azonban lehetővé teszi nemcsak az áramlási irányok modellezését, hanem az árvíz által elöntött terület topográfiáját is. Összetett geometria sem jelent problémát, de komplex adatokra van szükség. A futtatások eredményeként többek között adott pillanatban bekövetkező események vízszintjét, elérési idejét és az elöntött terület mértékét jeleníthetjük meg (Bulti és Abebe 2020; Zeiger és Hubbart 2021).

A kisvízfolyások esetében számos tényező nehezíti a modellek elkészítését, pontosságának meghatározását és az eredmények megbízhatóságát. Az első és legfontosabb tényező a rendelkezésre álló alapadatok felbontása és pontossága. Egy kisvízfolyás medrének és árvízének modellezése során az árhullám rekonstruálásához részletes DDM-re van szükség (Kenward et al. 2000; Garcia-Alén et al. 2022). A kisvízfolyások modellezésekor elengedhetetlen a partélek minél pontosabb meghatározása és a terepviszonyok definiálása, az érzékeny partszakaszok és a terhelési szintek minél pontosabb meghatározása érdekében. A terhelési szintek meghatározása az operatív előrejelzés alapvető részét képezi. Fontos beazonosítanunk a nagyobb árvízi lefolyást akadályozó terepi viszonyokat vagy torlasztó elemeket (USACE 2016).

Egy szemléletes példa a Tisza 2001. évi tavaszi árvize, ahol a 41-es főutat az árvíz idején át kellett vágni, mert ez az útszakasz gátelemként funkcionált (NKFP 2005; Nagy 2017). A hidak és átereszek nem voltak képesek átvezetni a nagy mennyiségű vizet, aminek következtében hét település került víz alá. A védekezésnek a Tiszán eddig nem tapasztalt mértékű árvízzel kellett szembenéznie. A mellékfolyókon is rendkívüli árhullámok alakultak ki a visszaduzzasztás hatására, a 2001-ben átszakadt gát pedig szükségessé tette a lokalizációs tervek továbbfejlesztését és modellezési folyamatok kidolgozását (Szlávik 2003; Illés et al. 2003).

A mérőállomások hiánya nehezítő tényező az árhullám előrejelzése és levonulása idején, ami jelentős információhiányt eredményez. Ahogy Zellei és társai (2003) is hangsúlyozta, az árvízi lefolyásmérések célja a megértés elősegítése mérési sorozatokkal és elemzésekkel.

A jelenlegi tanulmányok, a nemzetközi adatbázisok és az új távérzékelési technikák felhasználását javasolják a modellek és hidrológiai tanulmányok készítésekor, amelyek az adatok megbízhatóságát, egységességét, és ebből következően az eredmények széles körű elfogadottságát és relevanciáját eredményezik (Bernhofen et al. 2022; Wang és Xie 2018). A hidrológiai modellezés alkalmazásának lehetőségéről hazai és nemzetközi szinten is készültek tanulmányok. Az információk pontosítására és a tapasztalatok bővítésére azonban még mindig van lehetőség (Pregun et al. 2006; Pirkhoffer et al. 2009; 2013; Murányi és Koncsos 2022; Tamiru és Wagari 2022).

3. A mintaterületek bemutatása

3.1. A Kárpát-medence éghajlati adottságainak bemutatása

A Kárpát-medence Európa középső részén helyezkedik el, amelyet a Kárpátok, az Alpok és a Dinári-hegység vonulatai határolnak. A Kárpát-medence nagyszerkezeti egységeinek kialakulását az európai kontinens földtörténeti múltja határozza meg. A kialakulás hosszabb folyamat volt, amelyet nemcsak a medencét körülölelő hegységrendszerek alakulása, hanem az Afrika és Eurázsia pereméről leváló kisebb kontinenstörédek is meghatároztak. Ennek következtében több, kisebb és nagyobb szerkezeti egységből áll (Martonné Erdős 2003; Dövényi 2012; Kovács et al. 2015).

Éghajlatát nagyban meghatározza a földrajzi fekvése, a földrajzi szélesség, az Atlanti-óceántól és az Adriai-tengertől való távolság, tehát a mediterrán térségtől való távolság, a tengerszint feletti magasság, a légköri mozgásrendszerek. A medencét körülvevő hegyek zárt elhelyezkedése, a medencejelleg érvényesülése sajátos módon befolyásolja az éghajlati viszonyokat. A medence központi területein ez elsősorban a megnövekedett napsütéses órákban és a csapadék csökkenésében nyilvánul meg, míg a keleti peremeken a légtömegek felemelkedése miatt fokozott csapadékhullás tapasztalható (Hadnagy 2022).

A Kárpát-medence éghajlatára jellemző, hogy a téli évszakban az átlaghőmérséklet nyugat-délnyugat irányából kelet-északkelet felé csökken. A téli közép hőmérsékletek -1 °C körül alakulnak jellemzően Magyarország nyugati részén, és Szerbia északi részén, majd a Keleti- és Déli-Kárpátok irányába fokozatos csökkenő tendenciát mutatnak -3 , -4 °C -os értékekkel (Borsy 1995; Dövényi 2012).

A Kárpátok területén található a Kárpát-medence legalacsonyabb hőmérsékleti átlagértékei, amelyek a téli időszakban átlagosan -9 °C alatt alakulnak. Júliusban az átlaghőmérséklet északnyugatról délkelet felé haladva 18 °C -ról 23 °C -ra emelkedik, de a magasabb hegyekben, valamint egyes zárt medencékben az átlaghőmérséklet nem haladja meg a 10 °C -ot. A Kárpát-medence nyugati részén, a nyugat felől érkező hűvös óceáni légtömegek hatása érvényesül, ez a hatás a Duna vonaláig csökken, majd a kontinentális jelleg felerősödése jellemzi a terület éghajlatát (Dövényi 2012).

A csapadékeloszlás a Kárpát-medence területén időben egyenlőtlen. A legtöbb csapadék késő tavasszal és kora nyáron hullik. A csapadék időbeli változása során megfigyelhető egy nyári csúcs időszak (június), amely a nyugat-európai területek irányából érkező ciklonok hatásának tulajdonítható (Bihari et al. 2018). Az őszi időszakban (október) a mediterrán hatás érvényesül, amely leginkább délnyugaton fejt ki hatását és kelet felé csökken. A csapadék évi mennyisége 500-1700 mm között változik. Aszályos időszakok is beazonosíthatók a területen, amelyek júliustól augusztusig tartanak jellemzően az Alföld területén (Dövényi 2012; Bihari et al. 2018).

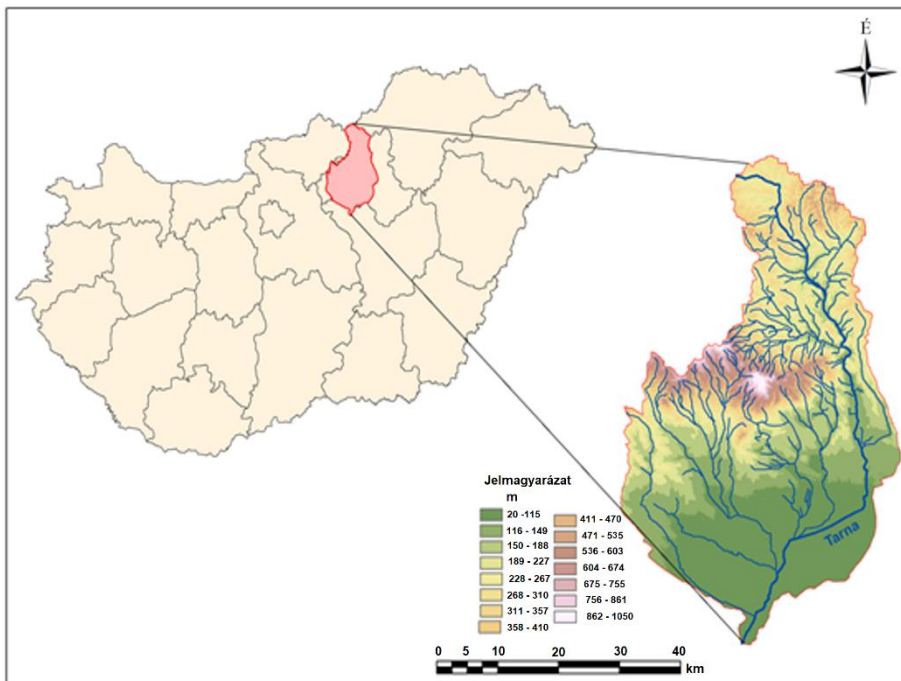
3.2. A Tarna-folyó és vízgyűjtő területének bemutatása

3.2.1. A mintaterület lehatárolása

A Tarna vízgyűjtője Magyarország északi részén, részben a Mátra keleti, részben pedig a tőle északra található Felső-Tarnai-dombság területén található. Forrásvidéke Szlovákia területén, Tajti település közelében található, Cerednél lép be Magyarország területére. Ezt követően Jászfákóhalmáig folytatja útját, majd a településtől délre a Zagyvába torkollik. A Tarna É-D-i folyásirányú. Vízgyűjtője a Tisza vízrendszerének alegységét képezi, területe 2116 km².

A Tarna vízgyűjtő lehatárolását nagyrészt a természetes víválasztó vonalak képezik. Tájegységet tekintve az alegység északi területei az Északi-Középhegységhez tartoznak, érintve a Mátravidéket és az Észak-Magyarországi medencéket. Déli irányban az alegység az Alföld része, azon belül az Észak-Alföldi hordalékkúpsíkság területéhez kapcsolódik (VGT 2010).

A domborzati viszonyokat tekintve a Tarna felső szakaszán hegyvidéki domborzat jellemző, a torkolat felé haladva az alföldi jelleg érvényesül. Elemzésem szerint a vízgyűjtő területének megközelítőleg 50%-a 100-200 m közötti síkvidék, 25 %-a 200-500 m közötti dombvidék, valamint a további 25% pedig 500-1000 m közötti hegyvidék (*1. ábra*). Ez alapján a vízgyűjtő domborzata tagoltnak mondható.



1. ábra. A Tarna vízgyűjtőjének elhelyezkedése Forrás: saját szerkesztés

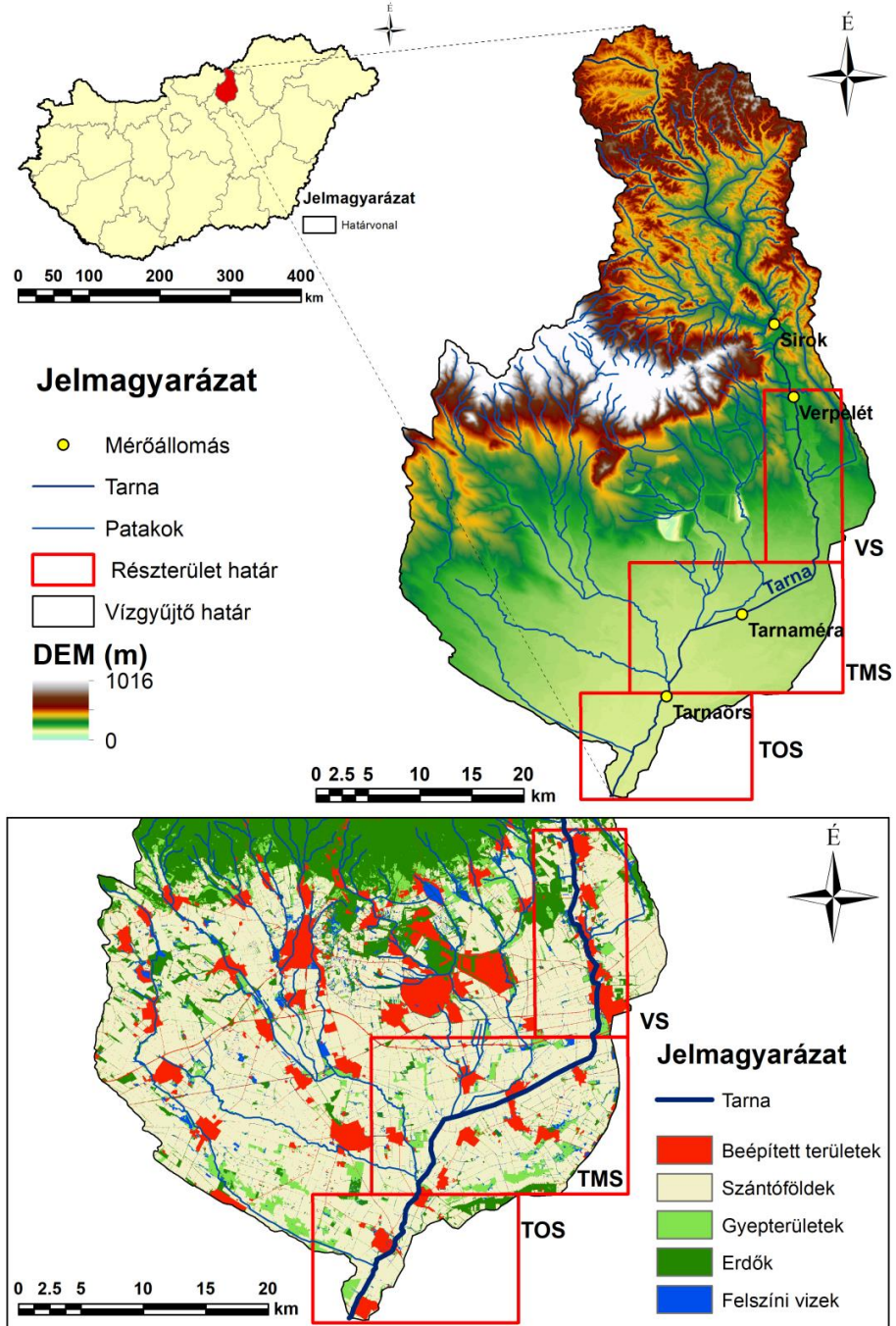
Kutatásom során a részletes elemzéshez a folyó morfológiai, hidraulikai és felszinformáló szakaszai alapján a folyó mentén három különböző szakaszt különítettem el: a felső szakasz (VS – Verpelét Section), a középső szakasz (TMS – Tarnaméra Section) és az alsó szakasz (TOS – Tarnaörs Section) (2. ábra).

A VS jelölésű területen a magassági értékek 107-236 m között mozognak, északról déli irányú általános lejtéssel. Ezt a területet keskeny völgyek és meredekebb lejtők (46°-ig) jellemzik. A vizsgált folyószakasz mentén sűrűn lakott területek és falvak találhatóak, ez az elhelyezkedés veszélyt jelent az emberi életre és az épített környezetre.

A TMS területén észak-déli irányban csökkenő magasság figyelhető meg, a magassági értékek 92-120 m között alakulnak. Bár a lejtő meglehetősen enyhe, a meredekség elérheti akár a 40°-ot is. A földhasználat túlnyomórészt mezőgazdasági jellegű, de lakóövezetek is találhatóak.

A TOS területet egy szélesebb medrű folyószakasz és magasabb partvonal jellemez. A tengerszint feletti magasság főként 90-110 m között mozog, túlnyomórészt enyhe lejtőkkel. A földhasználat mezőgazdasági

területeket (szántó-és legelőterületeket) foglal magában, viszont települések ezen a területen is veszélynek vannak kitéve.



2. ábra. A vizsgálati terület elhelyezkedése: a Tarna folyó vízgyűjtője Észak-Magyarországon. A folyó mentén három különböző szakaszon végeztem

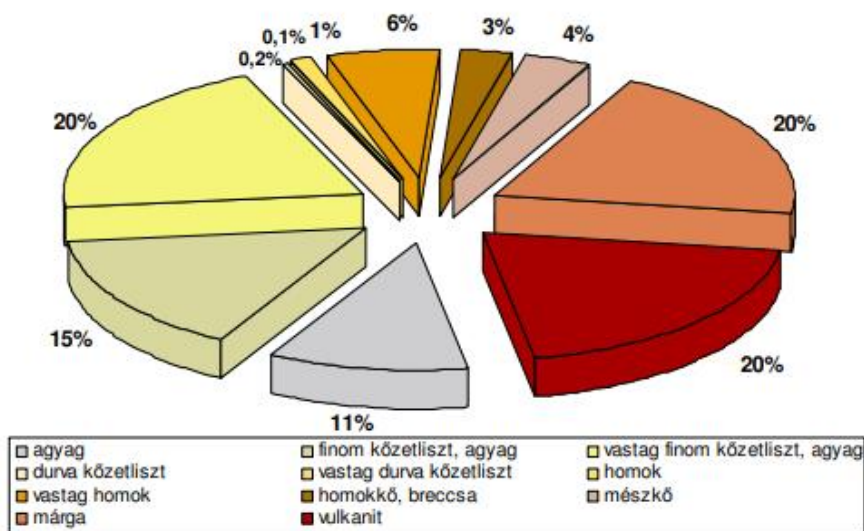
vizsgálatot: a felső szakaszon (VS), a középső szakaszon (TMS) és az alsó szakaszon (TOS) Forrás: saját szerkesztés

3.2.2. Felszínborítás, talajtani jellemzők

A terület főbb földtani szerkezeti irányai északnyugat–délkelet irányúak, illetve ezekre merőlegesen észak-északnyugat–dél-délkelet irányban húzódnak (VGT 2010).

Földtani és hidrogeológiai szempontból a térség három egységre osztható: a Mátra hegységi zónájára, a Mátraaljára, valamint az északi részmedencére, amely Pétervására térségében található. A Mátra hegységi része, egy vulkanikus eredetű tömb, ahol a csapadék nagyobb része a felszínen távozik, főként a lejtős peremeken. A vulkanikus kőzetek mállása során agyagos talaj alakul ki, amely szintén akadályozza a víz mélybe szivárgását (VGT 2010).

A Tarna vízgyűjtő területén a 10 m-es kőzetrétegek alakulása százalékos megosztásban heterogén képet mutat (3. ábra).



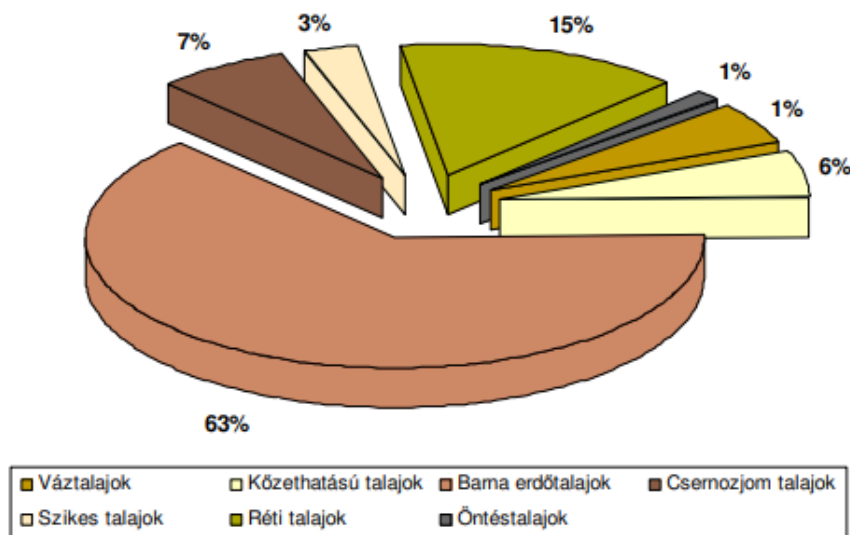
Forrás: MÁFI, felszín közeli 10 m kőzetkifejlődése M=1:500 000

3 ábra. A terület felszínhez közeli kőzeteinek fejlődése
Forrás: Vízgyűjtő-gazdálkodási Terv (2010).

A Tarna vízgyűjtőjének felszínborítása az északi részén változatosnak mondható, a magasabb régiókban az erdőterületek dominálnak, amelynek legjellemzőbb fafajai a bükk és a tölgy. Déli irányban haladva, a

mezőgazdasági területek, szántóföldek domináns jellege figyelhető meg, amelyek leginkább a dombság és a síkvidéki területek nagyobb részén jellemzőek. A beépítettség tekintetében a területen kisebb falvak jellemzőek, ezek nagyrészt mezőgazdaságra alapuló tevékenységet végeznek (Rónai 1986; Gábris 2011).

A vízgyűjtő terület északi részét elsősorban agyagbemosódásos barna erdőtalajok jellemzik (Rónai 1986; Gábris 2011). A dombsági területeken csernozjom-barna erdőtalaj és barnaföld található. A déli régióban a csernozjom talajok meszes üledéket tartalmaznak. A Tarna vízgyűjtőjének talajtípusait 63%-ban barna erdőtalajok, 15%-ban réti talajok, 7%-ban csernozjom talajok képezik, valamint kismértékben további 4 talajtípus is megtalálható (4. ábra).



Forrás: TAKI, AGROTOPO

4 ábra. A Tarna vízgyűjtőjének talajtípusai

Forrás: Vízgyűjtő-gazdálkodási Terv (2010).

3.2.3. Domborzati adottságok és klimatikus viszonyok

A vízgyűjtő legalacsonyabb pontja 91 m tengerszint feletti magasságon fekszik, a legmagasabb pontja pedig 1014 m (Kékestető), a terület átlagos tengerszint feletti magassága 219 m. A vízgyűjtő terület domborzata változatos, hegyvidéki részekkel és patak völgyekkel, valamint

domságok és síkságok találhatók. Általában az északi rész változatosabb domborzatú, meredekebb lejtőkkel, a déli rész pedig inkább síksági jellegű (Gábris 2011). Ennek megfelelően az árvizek jellemzői is eltérőek, északon gyors árvizek, délen pedig hosszabb, elnyújtott árvízi görbék alakulnak ki. Az éves középhőmérséklet 9,5-10,5°C, de a magasabb régiókban hidegebb (7 °C). Az éves átlagos csapadékmennyiség a legalacsonyabban fekvő területeken 500-550 mm, de a Mátra vidékén elérheti a 750-800 mm-t is, és júniusban a legtöbb. Az elmúlt 25 évben több állomáson is jelentős napi csapadék adatokat regisztráltak, például Kékestetőn 140,6 mm, Verpeléten 135 mm, Tarnaméra 128,6 mm csapadékot (Gábris 2011).

3.2.4. A Tarna vízjárásának és hidrológiai változóinak alakulása

A folyó vízjárásának és hidrológiai folyamatainak alakulását a vízhozam- és vízállásértékek határozzák meg, ezek alapján jellemezhetjük a folyó vízszállítását és lefolyásának jellegét. A Tarna folyó vízjárása az eddigi évek tapasztalatait figyelembe véve, valamint az elkészült adatbázis alapján szélsőségesnek mondható, mivel a folyót egyaránt jellemzik a kisvizes időszakok, valamint a hirtelen kialakuló árvízi események. Az adatok alapján a vízállások évi maximuma február-március és április-májusban alakult ki.

A Tarnán és a mellékvízfolyásai esetében kialakuló árhullámok jelentősek a kisvízfolyásokra jellemző árvizek viszonylatában (Martonné Erdős 2006). Az augusztusi időszakban azonban a vízfolyások egy része rendszerint kiszárad (VGT 2010).

A Tarna patakjainak vízhozamát a Mátra déli oldaláról lefutó vizek nagyban befolyásolhatják. Vízhozam adataink a Tarnóca-, a Bene- és a Gyöngyös-patakok vonatkozásában vannak, ezek egyenként akár 30-40 m³/s vízmennyiséget szállíthatnak. Ezek a patakok Tarnaméra és Tarnaörs között folynak a Tarnába, így lehetséges az, hogy Tarnamérán akár 70-80 m³/s maximum valószínűsíthető, addig Tarnaörsnél elérheti a 180 m³/s értéket is. A Tarna felső szakasz jellegű, amelyet a gyorsan lefutó csapadék gyors összegyülekezése jellemez, a tapasztalatok alapján tud akkora vízhozamot generálni, amely az alsóbb szakaszokon árvízi vízállást eredményez (Mezősi 2011). További meghatározó patakok, Parádi-Tarna-patak, Nyiget-patak, Domszlói-patak, Kígyós-patak, Külső-Mérges-patak, Rédei-patak, Szarvagy-patak, illetve Ágói-patak (VGT 2010).

Az árvízvédelmi töltések összefüggően a Budapest-Miskolc vasútvonal alatti részen épültek ki, a felsőbb terület egyes mederszakaszain a

jelentős vízfolyások esetében víztartó depóniák létesültek, a kisebb patakok esetében egyszerű trapéz szelvényeket alakítottak ki. A hegyvidéki szakaszokon a vízfolyások jelentős része eredeti, szabályozatlan mederben folyik (VGT 2010). Ahol azonban beavatkozások történtek, megszűnt a természetes árterek kialakulásának lehetősége, mivel a meder közvetlen környezetében árvízvédelmi töltések és víztartó depóniák létesültek. Továbbá a térség síkvidéki adottságai miatt a települések árvízi kitétsége indokoltá teszi a védművek meglétét (VGT 2010).

Az árvízi eseményeket illetően, az árvízszintek az alábbiak szerint kerültek meghatározásra: I. árvízvédelmi szint 250 cm, II. árvízvédelmi szint 300 cm, III. árvízvédelmi szint 350 cm. A kiválasztott időszakban összegyűjtöttem a vízmércéken mért 5 napnál hosszabb ideig tartó árvízi készültségnek megfelelő eseményeket. Verpelét esetében leginkább az 1-3 napos magas vízállások voltak a jellemzőek, az 5 napnál hosszabb események száma mindössze 10 darab volt. Ezzel szemben Tarnamérán 18, illetve Tarnaörsön 34 ilyen eseményt regisztráltak.

A Tarna Verpelét vízmérce legkisebb vízállása (LKV) 11 cm és a legnagyobb vízállása (LNV) 568 cm. A Tarnaméra vízmérce legkisebb vízállása (LKV) 16 cm és a legnagyobb vízállása (LNV) 500 cm. A Tarnaörs vízmérce legkisebb vízállása (LKV) 65 cm a legnagyobb vízállása 564 cm.

4. Anyag és módszer

4.1. Adatok

4.1.1. Terepi adatgyűjtés

2021 októberében bejártuk a Tarna vízgyűjtő területét a torkolattól a forrásvidékig. Az egyetem munkatársai segítették munkámat a terepi bejárás alatt, amelynek során kvalitatív és kvantitatív adatgyűjtést végeztem. A terepi bejárás alkalmával az árvízvédelmi szempontból jelentősebb helyszíneken (hidak, műtárgyak, összefolyás, mérőállomások) GPS segítségével koordinátákat rögzítettem és jegyzőkönyvet vezettem (5. ábra). A jegyzőkönyv előre meghatározott paramétereit alapján rögzítettem a környezetre, emberi beavatkozásra és felszínborításra vonatkozó jellemzőket. A terepi adatgyűjtés lehetőséget adott meg tapasztalni a környezeti viszonyokat, elősegítette a meder és közvetlen környezetének a megismerését, valamint segítséget nyújtott a későbbi komplex képalkotásban, a modellekben történő problémák megoldásában. Ennek köszönhetően területspecifikusan tudtam kezelni a kutatás során felmerülő kérdéseket és problémákat.



5. ábra. Terepi adatgyűjtés a Tarna vízgyűjtőjén
Forrás: saját szerkesztés

Az RTK GPS segítségével terepen rögzített keresztshelvények pontjait shp fájl formátumban dolgoztam fel. A jegyzőkönyv adatait excel táblázatban összesítettem.

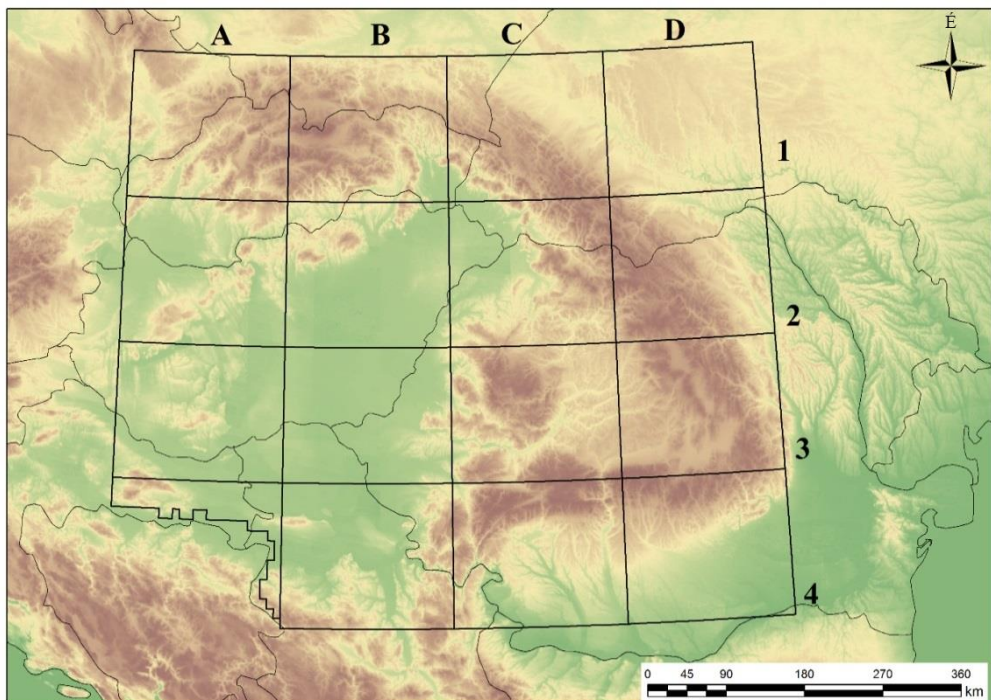
Az összeállított jegyzőkönyvet 5 egységre tagoltam, amelynek eredményeként részletes leírást kaptam a vizsgált területről. Elsőként az általános információkat rögzítettem: a vízfolyás nevét, a dátumot, a települést vagy a helyszín leírását, a koordinátákat vagy azt jelölő pontok nevét, a pillanatnyi időjárást, illetve a kitöltő nevét. Ezt követte a második rész, a környezet leírása, amely a meder és mederalak milyenségére, a vízfolyás mesterséges vagy természetes kialakulására, a vízfolyás alakjára, kanyarulatára (mesterséges/egyenes/kanyargó/erősen kanyargó/meanderező), a víz színére és a víz szennyezettségére vonatkozó információkat tartalmazta. A harmadik részben az emberi beavatkozással és kiépítettséggel kapcsolatos információkat gyűjtöttem össze. Itt két lényeges pont szerepelt: a mesterséges anyagok jelenléte a mederben, mint például beton, illetve terméskő, valamint a vízfolyás mesterséges elemeinek felsorolása pl. hidak, gátak, átereszek, bukók. A negyedik részben a felmérésen alapuló tulajdonságok, például a meder szélessége, vízmélység, víztükör szélessége, mederanyag jellege és az iszapvastagság került jegyzőkönyvbe. Az ötödik részben a vegetáció és a felszínborítás leírása volt a cél. Itt a vízfelület benőttességét (%), a növényborítottságot, jellemző felszínborítást és a környezeti leírást gyűjtöttem össze. Mindezt helyszíni fotókkal is dokumentáltam.

4.1.2. CarpatClim adatbázis

A kutatás során a CarpatClim (CC) adatbázis éghajlati változói kerültek feldolgozásra (Lakatos et al. 2013; Spinoni et al. 2015). A CarpatClim digitális klímaatlasz egy nagyfelbontású, egységes adatbázis a Kárpát-medence régiójára vonatkozóan, amely az Országos Meteorológiai Szolgálat és több közép-európai kutatóintézet, valamint szervezet együttműködésével jött létre. Az adatbázisban megtalálható, 16 klimatikus változó napi szintű időszora és 37 mutató havi időszora, valamint éves bontásban is találunk adatokat (Antolovic et al. 2013; CARPATCLIM 2017). Számos adat ingyenesen elérhető, hogy lehetőséget biztosítson a környezetvédelmi kérdésekkel és éghajlati vizsgálatokkal kapcsolatos nemzetközi kutatások jobb együttműködése érdekében. A térbeli felbontása $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$, amely 9 országot fed le megközelítően 600 000 km²-en, 5895 rácspontra tartalmaz az 1960-2010 közötti időintervallumban. Az adatok a

MASH (Multiple Analysis of Series for Homogenization) módszerrel homogenizált adatok, amelyet a hiányzó adatok és a mérési protokollok esetleges eltérései miatt fontos megemlíteni (Lakatos et al. 2011; Szentimrey 2011). Az adatok interpolációja a MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis) módszerrel történt, amely több mint 300 állomás hőmérsékleti adatait és több mint 600 állomás csapadékadatait használta fel (Szentimrey et al. 2010; Szentimrey és Bihari 2007; Szentimrey et al. 2012).

A kutatásomban a regionális szintű vizsgálat során a CarpatClim adatbázis 1960-2010 időszakra vonatkozó éghajlati változók adatait használtam fel: maximális hőmérséklet (TMAX), átlagos hőmérséklet (TA), csapadék (PREC) és a potenciális evapotranspiráció (PET). Ahhoz, hogy a vizsgált terület megfelelően tudjam vizsgálni, sakktáblaszerű beosztás volt a legmegfelelőbb, ami alapján a terület kisebb régiókra tagolódott. Az elemzés során a régiók "#" jellel lettek jelölve (6. ábra).



6. ábra. A vizsgált terület elhelyezkedése és a térbeli elemzéshez alkalmazott rácsháló, a CarpatClim atlasz alapján
Forrás: saját szerkesztés

4.1.3. E-OBS meteorológiai adatbázis

A vízgyűjtő szintű meteorológiai változások vizsgálata során, az E-OBS adatbázis adatait dolgoztam fel. Az E-OBS egy meteorológiai adatbázis, amely Európa területére vonatkozóan tartalmaz adatokat. Az adatok mérőhálózati méréseken alapuló, rácshálóra interpolált, napi szintű adatok. Az E-OBS adatbázis az Európai Klímaváltozási Program (ECA&D) keretében jött létre, amely több meteorológiai szolgálat és kutatóintézet adatait gyűjti össze (Cornes et al. 2018).

Az adatbázis egynapos események adatait tartalmazza 1950-től napjainkig, sávosan összesítve és rácshálóra bontva. Az adatok méréseken alapuló, interpolált, napi szintű adatok. Az adatok kinyerése Python programban írt kódok alkalmazásával történt. Az adatbázis napi középhőmérséklet, napi minimum hőmérséklet, napi csapadékösszeg, napi átlagos tengerszint feletti nyomás, napi átlagos szélesség, napi átlagos relatív páratartalom és a globális sugárzás adatait tartalmazza. Az adatbázis a következő területet fedi le: 25N-71.5N × 25W-45E, és az adatfájlok NetCDF-4 formátumban érhetőek el. A térbeli felbontását tekintve kétféle felbontásban érhető el: $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, illetve $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Az adatok széles körben felhasználhatók, mint például az éghajlat változásának vizsgálatára, időjárási modellek készítésére és validálására, valamint környezetvédelmi vizsgálatokra és ingyenesen hozzáférhető a felhasználási céltól függetlenül.

A kutatásom során felhasznált adatok excel és shape (shp) fájl formátumban 1960-1989 és 1990-2020 közötti időszakokra vonatkozóan kerültek összegyűjtésre. Az adatkészletben található adatok közül a napi csapadékösszeg adatokat használtuk fel a Tarna vízgyűjtő területére vetítve.

Kutatásom első részeként CarpatClim adatbázist használtam, mivel ez a hosszabb időszakot (1960-tól) lefedő, homogenizált és interpolált méréseken alapuló, grid-rács alapú adatbázis kiváló alapot nyújtott az általános hőmérsékleti és csapadékviszonyok hosszú távú trendjeinek vizsgálatához a Kárpát-medence területén. A vízgyűjtő szintű vizsgálatok során, ezt követően az E-OBS adatokat használtam. Bár az E-OBS adatbázis időbeli lefedettsége nem ér véget 2010-ben, csak 2020-ban jelent meg (C3S 2020), így a kutatásaim kezdetén a CarpatClim volt a legjobb elérhető adatforrás. Fontos szempont volt, hogy mindkét adatbázist 1960-tól

kezdődően alkalmaztam, hogy biztosítsam a kutatások közötti összhangot és összehasonlíthatóságot. Mindkettő homogenizált, interpolált, grid-rács alapú adatbázis, ezért jól kiegészítik egymást, és lehetőséget adnak a részletes, megbízható elemzésre.

4.1.4. AGROTOPO, NÖSZTÉP és CLC adatbázisok

A modellek elkészítéséhez és a talajtani tulajdonságok meghatározásához földhasználati és talajtani adatokra volt szükségem. Ehhez az AGROTOPO (1:100 000 méretarányú), CLC (Corine Land Cover) és a Magyarország ökoszisztéma alaptérkép (Tanács et al. 2021; Agrárminisztérium 2019) adatait használtam.

Az AGROTOPO adatbázis 1991-ben készült el a MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézetében, amelynek alapját az Átnézetes Talajismereti Térképek (Kreybig-féle 1:25 000 talajtérképek) képezik. A digitális adatbázis EOTR rendszerben 1:100 000 méretarányú, országos lehatárolásban tartalmaz talajtani paramétereket (Tóth et. al. 2015; MTA ATC TAKI 2015).

Az Európai Bizottság CORINE (*Coordination of Information on the Environment*) programjának keretein belül 1990-ben elkészült az első CORINE Land Cover adatállomány. Információkat tartalmaz Európa földhasználatáról. A legfrissebb elérhető adatbázis 2018-ban jelent meg, amely vektoros és 100 m-es raszteradatként áll rendelkezésre. Térbeli felbontása 25 ha/100 m, amelynek alapját a Sentinel-1, illetve Sentinel-2 műholdfelvételek képezik (EEA 2018).

Magyarország ökoszisztéma alaptérkép (NÖSZTÉP) a Nemzeti ökoszisztéma-szolgáltatások térképezése és értékelése c. projekt részeként jött létre, a magyarországi ökoszisztéma és tájkarakter térbeli elterjedésével kapcsolatban tartalmaz információkat. A felbontását tekintve, 20 × 20 m-es raszter alapú adatbázis, amely az egész ország területét lefedi.

Az említett adatokat a hidrológiai modell bemeneti adataként, a Manning-féle érdességi együttható meghatározása céljából és a terepi bejárás során gyűjtött információk kiegészítése kapcsán használtam fel.

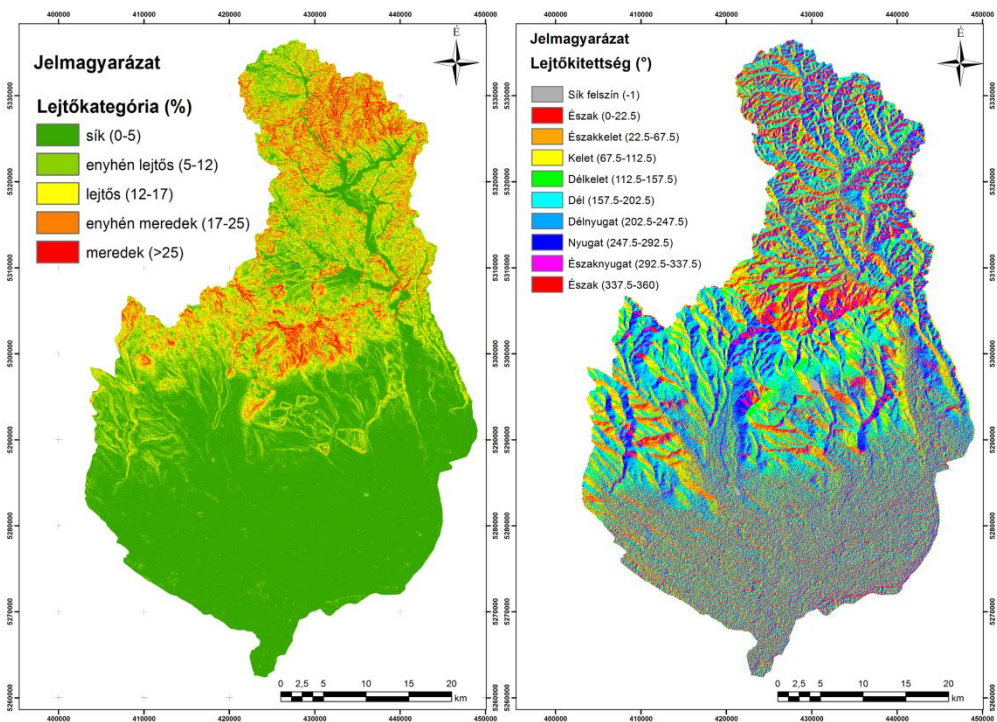
4.1.5. Topográfiai adatok

Kutatásom során a területek meghatározásához és a hidrodinamikai modell felépítéséhez minél részletesebb felbontású térbeli adatokra volt szükségem. Két digitális domborzatmodell (DEM) használtam a topográfiai

jellemzők kinyeréséhez: (1) az SRTM v4 digitális domborzatmodell (NASA 2013), amely jobb hibajavítással és interpolációval rendelkezik, mint a korábbi verziók (2) a Lechner Tudásközpont (Magyarország) által létrehozott 5×5 m-es szintvonalkból interpolációval és sztereofotogrammetriai kiértékeléssel frissített DDM5. A regionális szintű vizsgálatok során az SRTM-et alkalmaztam, a kisebb vízgyűjtő szintű modellezés során DDM5-t.

A meder és a mederkeresztzelvények adatait az ÉMVIZIG szolgáltatta azokra a helyszínekre, ahol a terepi mérések történtek. A Tarna nagyvízi mederkezelési tervben szereplő alsó szakaszcól állnak rendelkezésre LiDAR adatok, amelyekből a vízügyi igazgatóság előállította a kijelölt területeken a keresztzelvényeket, melyeket a validálás során használtam fel.

A mintaterület részletesebb domborzati adottságainak bemutatása céljából elkészítettem a lejtőkategória és a lejtőkitettségi térképeket (7.ábra). Ezeket a térképeket a lefolyás vizsgálat során használtam fel. A lejtőkategória térkép skáláját Márkus és Sárközy (1986) munkája alapján határoztam meg.



7. ábra. A vízgyűjtő lejtőkategória és lejtőkitettség térképe

Forrás: saját szerkesztés

4.1.6. Vízszint és vízhozam adatok 1990-2020 között

A kutatás során elkészült a Tarna vízgyűjtőjére egy 1990-2020 napi szintű vízhozam és vízszinteket tartalmazó, árvízi fokozatokra kategorizált adatbázis, amelynek alapadatait az ÉMVIZIG szolgáltatta.

A további vizsgálatokhoz szükséges topográfiai és hidrológiai adatkészleteket, beleértve a modellépítéshez szükséges vízszint- és lefolyási adatokat szintén az ÉMVIZIG biztosította. Az árvízvédelmi készülségi szintek esetében 3 kategóriát különböztetünk meg, vízállási szintek meghatározásával.

A hirtelen bekövetkező áradások az elmúlt évtizedekben növekedő tendenciát mutatnak, ezért a vizsgálat során a 2010 és 2019 közötti időszak hidrológiai adatai kerültek feldolgozásra. 2010 és 2019 évek között vizsgáltam a napi szintű vízszint és vízhozam adatokat a felszíni állomások vízrajzi adatai alapján. Ezeket az adatokat készülségi fokozatok szerint skáláztam, majd meghatároztam a Tarna folyó 2 legnagyobb áradását, amikor a vízszint elérte vagy meghaladta a 350 cm-t. Ezt követően kiválasztottam 2 nagy áradást, amikor a legalacsonyabb vízszintet 200 cm-nél állapították meg. Kiválasztottam továbbá 2 átlagos évben mért vízhozam adatsort február és május hónapokra vonatkozóan. Az átlag vízállás adatsorának időintervallumát 10 napban határoztam meg. Ez az adatsorok adták a hidrológiai modellek bemenő adatsorait.

A futtatásokat a megjelölt időpontokban Verpelét, Tarnaméra és Tarnaörs vízmérce adataira és a hozzá kapcsolódó lehatárolt területekre végeztem el. A siroki vízmércére az első vízmérce, amely a Tarna forrásához legközelebb található. Kis mederátmérő jellemzi, átlagos vízszintje 20-24 cm között alakul, ezért nincs is róla hosszútávú felhasználható adatsor. Ennek következtében erre a vízmérce pontra vonatkozóan, csak egy átlag vízhozam adatsoros futtatást végeztem, emiatt ez nem is került bele a vizsgálatba. Azonban a Tarna vízgyűjtő egészének vizsgálata során fontosnak tartom megemlíteni, hogy a siroki mérce is a vízgyűjtő területének részét képezi. A modellek kalibrálásához és validálásához a 2010 és 2019 közötti idősorokat és keresztmetszvényeket alkalmaztam minden vízmércére. A kutatás során több időpontban eseményalapú hidrológiai modelleket készítettem a Tarna vízgyűjtő területére.

4.2. Módszerek

4.2.1. A CarpatClim adatainak előkészítése és feldolgozása

Az elemzés során a CarpatClim 1960-2010 közötti évek adataiból a havi maximális hőmérséklet (TMAX), az átlaghőmérséklet (TA), a potenciális párolgás (PET) és a csapadék (PREC) adatait havi bontásban használtam fel.

A CarpatClim adatbázisból nyert adatok feldolgozását megelőzte az előkészítési fázis, amely első lépéseként az elkészült rács idősorának minden pontján regresszió elemzéssel trendvonalillesztést végeztem, mely azért volt kulcsfontosságú, mert lehetővé tette a változások irányának és mértékének kvantitatív meghatározását, ami alapvető a klímaváltozás hatásainak értékeléséhez és a további elemzések megalapozásához. Mivel 2009-ben és 2010-ben a csapadék mennyisége rendkívül magas volt, a korábbi évekhez viszonyítva (Móring 2011; Spinoni et al. 2015), ezért ezeket kizártam az elemzésből, hogy csökkentsem az eseményekből eredő torzítást, mivel a kiugró értékek a statisztikai regresszió esetében kibillentik az egyenest, és nem valós meredekséget mutat (kis mennyiségű csapadékok esetében erre nem volt szükség, mert ebben a kvartilisben nem voltak kiugróan kis adatok).

A regresszió-elemzés egyenlete a metszéspontból (β_0), ahol az illesztett egyenes metszi a függőleges tengelyt és az illesztett egyenes meredekségéből (β_1) áll, amely a független változó szorzója. Az egyenlet általános formája az (1) egyenlet, ahol a modell hibája (ε_i) is szerepel (Field et al. 2012).

$$Y_i = (\beta_0 + \beta_1 x_i) + \varepsilon_i \quad (1)$$

Ennek megfelelően a β_1 a függő változó (Y) változását tükrözi a független változó egységnyi változásával szemben. Ebben az esetben az adatsorral, mint idősorral dolgoztam, amely az 1960 és 2010 közötti időintervallum (mint független változó) változásai kerültek elemzésre, míg a függő változó az adott éghajlati változó (TMAX, TA, PET és PREC) volt.

A trendvonalillesztés az éves adatokon került elvégzésre, valamint megismételtem a hónapok szezonális csoportokra való bontásával is: tavasz (március-május), nyár (június-augusztus), ősz (szeptember-november) és tél

(december-február). Így mind a globális (általános), mind a szezonális (specifikus) változások elemzésére lehetőség volt.

4.2.2. Az E-OBS adatok felhasználása

A vizsgálat során az E-OBS adatbázis csapadék adatait is felhasználtam, hogy alátámasszam az éghajlatváltozás Tarna-vízgyűjtőre gyakorolt hatását. Az elsődleges paraméterek meghatározásánál a következő két időintervallumot határoztam meg: 1960-1989 és 1990-2020. A csapadékmennyiség eloszlásában bekövetkező változásokat a csapadékos napok számában határoztam meg. Csapadékos napnak tekintetem azt a napot, amikor minimum 1 mm csapadék hullott az adott cellában. Ezt követte az E-OBS adatbázis adatainak a kinyerése Tarna vízgyűjtőjére vonatkozóan.

Az adatok kinyeréséhez a szkript Python 3 programozási nyelv került alkalmazásra (Van Rossum és Drake 2009; Nagy 2021). Az adatok további előállítását, a rácsháléhoz igazított számításokat, az adatok kinyerését a netCDF4, a Numpy, illetve Pandas Python alapú könyvtárak alkalmazásával hajtottuk végre (Harris et al. 2020; McKinney 2010; The Pandas Development Team 2021; Nagy 2021).

A grid alapú rácsháló elkészülését konkrét bemeneti definíciók és paraméterek alapján határoztuk meg, ahol elsőként a térbeli meghatározás (észak, dél, nyugat és kelet), majd ezt követően az időpont meghatározása történt. Itt a kívánt időintervallum kezdő és végdátuma lett meghatározva. Így a rácsháló gridrácseit horizontálisan a szélesség és hosszúság, illetve vertikálisan az időváltozó adatai adják. Az adatok térbeli szűréséhez meg kellett találni a vízgyűjtő területéhez legközelebb található külső értéket a hosszúsági és szélességi adatok tekintetében. Ez alapján minden esetben meghatározásra került a mintaterületet magába foglaló, legjobban illeszkedő téglalap alapú terület egység, amely az adatbázis részét képezi. Ezt követően meghatároztuk a kezdő- és végdátumokat, majd ennek segítségével a kiválasztott időszakok a teljes adatbázisból leválogatásra kerültek. Az elkészült adatok kimentése 'csv' (comma-separated values) formátumban történt, Pandas könyvtár segítségével. Az elkészült állományokat geometriai és dátum indexekkel azonosítottuk (Nagy 2021).

Az elkészült adatbázis egynapos eseményeket tartalmaz sávosan összesítve, grideket tartalmazó rácsháló felépítésben shape fájl formátumban az 1960-1989 és 1990-2020 közötti időszakra vonatkozóan. Végül a QGIS segítségével térképeken ábrázoltam az adatokat. A kategóriák kialakítása az

alábbi szempontok figyelembevételével történt, ezek alapján végeztem el a csoportosítást: (i) Az időintervallumot két csoportra osztottam, hogy az időbeli változásokat részletesebben elemezhessem. (ii) Összegyűjtöttem az egymást követő csapadékos napok számát és ezeket térképeken ábrázoltam. (iii) Elemzést végeztem arra vonatkozóan, hogy az adott év során a mintaterület celláira vetítve hány olyan nap fordul elő, amikor a csapadékösszeg elérte vagy meghaladta az 1 mm-t.

4.2.3. Az eseményalapú modellek adatainak kiválasztása és előkészítése

A modellépítés többlépcsős folyamat, amelynek első lépése az adatsorok kiválasztása, az árvízi események csoportosítása, a modellezésre reprezentatívnak tekintett események adatainak a leválogatása.

A kutatás első lépései között az adatok összegyűjtése szerepelt. Ez tartalmazta azt a folyamatot, hogy a vízhozam és vízállás adatokat gyűjtöttem össze az 2010 és 2019 közötti időszakra vonatkozóan. Az ÉMVIZIG adatszolgáltatásának köszönhetően rendelkezésemre álltak az adatok, amelyek napi szintű, órás bontásban kerültek feldolgozásra. A kiválasztott időszakban napi szintű vízhozam és vízszint adatokat elemeztem órás felbontásban 3 hivatalos vízmérce esetében. Ezeket az adatokat minden vízmérce esetében három kategóriába csoportosítottam a hivatalos nemzeti árvízvédelmi szintekhez igazítva. Ez alapján elkészült a Tarna hivatalos vízmércéire egy olyan adatbázis, amely csak az árvízi eseményeket tartalmazza.

Az árvízi események kiválasztásánál figyelembe vettem az események időtartamát és reprezentativitását. A 2010-2019 közötti időszakban a Tarna folyó két legnagyobb árvizét (LF) választottam ki, ahol a vízszint elérte, vagy meghaladta a 350 cm-t. Ezt követően a második kategóriában két átlagos árvízi eseményt (F) választottam ki, ahol a legalacsonyabb vízszintnek 200 cm értéket határoztam meg. A harmadik csoportban két átlagos vízhozamú eseményt (A) jelöltem ki. Az átlagos vízszintadatokat (A) időintervallumát 10 napban határoztam meg, az optimális futási időeredmények és a területen belüli vízhozam-változások megfelelő figyelembevétele érdekében. Ez a kategória nem tartalmazott kiugró vagy magas vízszinteket (*1. táblázat*). Az eseménytípusok táblázatban található jelöléseiből összeállított kódok, az eredmények fejezetben az események azonosítását szolgálják. A táblázatban található rövidítések a következőket jelölik: LF – Large Flood, F – Flood, A – Average.

1. táblázat. A vizsgált események adatai a kezdési- és befejező dátumokkal

Esemény típus	Esemény	Kezdés dátuma	Kezdés i időpont	Befejezés dátuma	Befejezés időpont	Időtart -am
Legnagyobb árvíz (LF) > 350 cm	a	2010-02-20	13:00	2010-03-03	23:00	12 nap
	b	2016-02-10	14:00	2016-02-26	11:00	17 nap
Árvíz (F) > 200 cm	c	2013-03-30	04:00	2013-04-09	08:00	11 nap
	d	2017-05-04	16:00	2017-05-17	07:00	14 nap
Átlag (A)	e	2011-02-10	00:00	2011-02-19	23:00	10 nap
	f	2015-05-06	00:00	2015-05-15	23:00	10 nap

4.2.4. A HEC-RAS modellek felépítése és előkészítése

A kutatás során az amerikai U. S. Army Corps of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC) mérnökei által fejlesztett HEC-RAS szoftvert alkalmaztam a hidrológiai folyamatok modellezésére. A HEC-RAS egy nemzetközileg elismert és alkalmazott hidrológiai és hidrodinamikai program, amely mindenki számára ingyenesen elérhető (USACE 2016). A HEC-RAS eredményei kompatibilisek más térinformatikai szoftverrel, mint például a QGIS vagy az ArcGIS, ahol az exportált eredmények, a műholdfelvételek és a régebbi elöntési térképek segítségével validálhatók az új eredmények.

Továbbá azért esett a választásom a HEC-RAS szoftverre, mert lehetőséget ad 2D modellek megalkotására, permanens és nem permanens futtatások előállítására, valamint időben és térben követhetjük a víz áramlását a modellkörnyezetben.

A HEC-RAS szoftver felépítéséhez, mint bemeneti paramétereket, a következőket kell megemlíteni. A geometriai adatok esetében a domborzati adatok, amelyek a hullámtérre és a mederre vonatkoznak, mivel ez alapján készül el a geometriai rácsháló. A vonalas objektumok, mint például a folyó

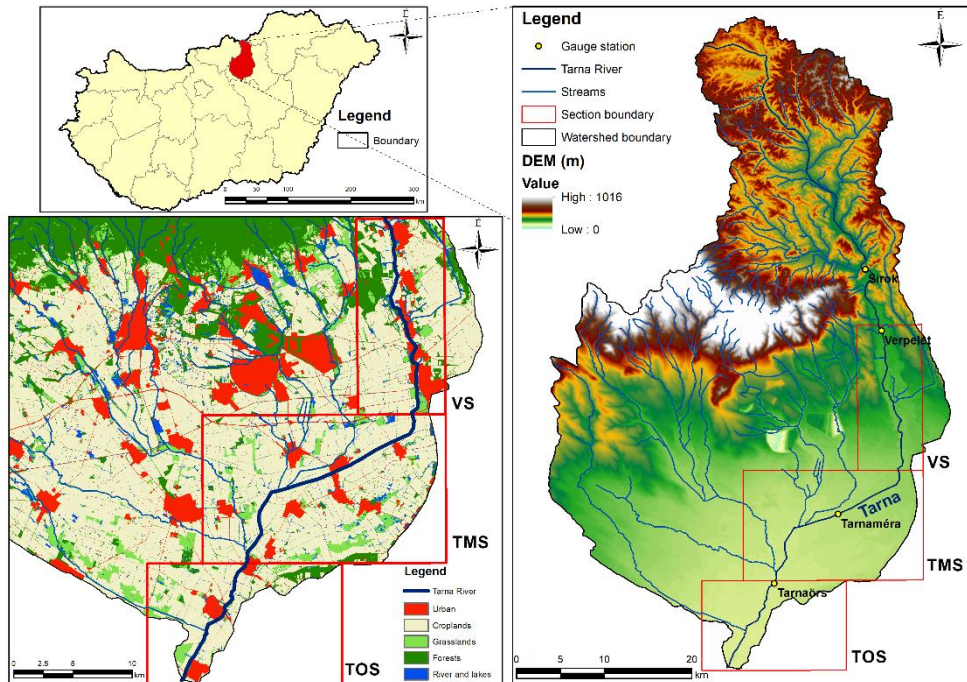
vagy melléptakok vonala, a partvonalak és partélek, illetve töltések vonala. Szükséges a hullámtér, a meder és árterek leírása, valamint a keresztmetszvények és vízmércék adatai. Ezekre az adatokra nemcsak a modellalap elkészítéséhez van szükség, hanem a későbbi validációhoz és kalibrációhoz is.

A hidrológiai adatoknál a vízhozam, vízállás adatok, amelyek lényeges elemét képezik a modellezésnek. A levezetési feltételek összegyűjtése is fontos a modellezés során, mint például a kritikus mélység, normál lejtés, lejtőkategória értékek.

A modell felépítésének első lépéseként a térbeli adatokat gyűjtöttem össze. A topográfiai adatok előkészítése, a terep topográfiai jellemzőinek meghatározása, a területi egységek lehatárolása és a térképek létrehozása a QGIS 3.6 szoftverkörnyezetben történt (QGIS Development Team 2019). A különböző események hidrológiai modelljeit, térképek és árvízi események adatainak kinyerését a HEC-RAS 5.0.7 szoftverkörnyezetben végeztem el (U.S. Army Corps of Engineers 2016).

A vízgyűjtő és a részvízgyűjtők lehatárolását, a háromszög alakú szabálytalan hálózat (TIN) módszerével határoztam meg. Ez a módszer megkönnyíti a peremfeltételek, a részvízgyűjtők lehatárolását és a magassági attribútumok pontos meghatározását. A topográfiai adatokat a HEC-RAS 5.0.7 programban dolgoztam fel, létrehozva egy 50×50 m-es cellaméretű geometriai rácsot a vízgyűjtőre. A folyók és patakok mentén azonban megnöveltem a geometriai rácsháló méretét, hogy a vízszintváltozásokat jobban kirajzolódjanak a futtatások során. Az érdességi együttható értékeinek meghatározása (n) 0,010-0,100 közötti skálát alkalmazva, a NÖSZTÉP és az erre vonatkozó szakirodalmak alapján történt. A terepi adatgyűjtés során összegyűjtött információk alapján korrekciókat végeztem. A geometriai rácshálót tehát a teljes vízgyűjtőre (C), valamint a felső szakasz (VS), a középső szakasz (TMS) és az alsó szakasz (TOS) lehatárolt területeire végeztem el.

A területi előntés mértéke alapján azonosítottam azokat az érzékeny területeket, amelyek érintettek voltak az események mértékének függvényében.



8. ábra. A vizgált terület elhelyezkedése és a három részterület lehatárolása: felső szakasz (VS), középső szakasz (TMS) és alsó szakasz (TOS) Forrás: saját szerkesztés

A szimulációk kimenetei minden egyes eseményre vonatkozóan 1 órás időközönként tartalmazzák az instacionáris áramlási adatokat. Az egyik legfontosabb paraméter, amely jelentős hatást gyakorol a modellszimulációkra, a számítási lépték, vagy időköz. A számítási intervallumnak megfelelően kicsinek kell lennie ahhoz, hogy a vízszintek változásait pontosan meg lehessen ragadni és érzékelti lehessen. Ez az érték függ a terület méretétől, a bemenő paraméterek mennyiségétől és a rácsháló méretétől. A megfelelő időintervallum kiszámításához elengedhetetlen a keresztmetszetek közötti távolság és az áramlási sebesség figyelembevétele (U.S. Army Corps of Engineers 2016).

A legjobb numerikus megoldást és a modellszimulációk optimális futási idejét figyelembe véve a következő beállításokat alkalmaztam, amelyek lehetővé teszik, hogy a modellek megfelelően figyelembe vegyék a változásokat. A számítási intervallumot 1 percre, a térképezési kimeneti intervallumot 1 órára (h), a vízrajzi kimeneti intervallumot 1 órára, a részletes kimeneti intervallumot szintén 1 órára állítottam be. A toleranciaintervallum

0,003 m volt a vízfelszín és 0,03 m³/s a minimális áramlási tolerancia esetében. A modellfuttatásokkal kapcsolatos leírások, és az eddigi tapasztalataim alapján ezeket az intervallumokat találtam a legmegfelelőbbnek (U.S. Army Corps of Engineers 2016).

A modellek kalibrálásához és a modellek ellenőrzéséhez a vízmércéknél mért vízszinteket használtam fel. A vizsgálat során Verpelét, Tarnaméra és Tarnaörs hivatalos vízmércéinek adatait használtam fel, északi irányból déli irányba haladva. A siroki mérőállomást a nagyon alacsony vízállás miatt nem vettem figyelembe.

4.2.5. HEC-RAS hidrológiai modellek alkalmazhatósága, megalkotása és futtatása

Számomra a HEC-RAS bizonyult a legoptimálisabbnak, az alkalmazhatósága szempontjából is, mivel egy ingyenesen elérhető szoftver, amely az egyik legszélesebb körben használt hidrológiai és hidraulikai modellező szoftver.

A modellek felépítését követően legfontosabb lépés a hidrológiai modellek paraméterezése. A paraméterezési technikák egyike a manuális kalibráció, amikor legfőképp a terepi viszonyok ismeretére és a modellező tapasztalatára hagyatkozva végezzük a paraméterezést. Az automatikus optimalizáció algoritmusok segítségével választja ki a legjobb paramétereket. A paraméterezési technikák egyike az érzékenységi elemzés, amelynek során azt vizsgáljuk, hogy a különböző bementeti adatok változtatása hogyan hat a modell eredményeire.

A modellezés és az árvízi lefolyás egyik fontos eleme a terület érdességi tényezője. Ennek az értéknek a meghatározására felszínborítási együtthatókat és műholdfelvételeket alkalmaztam. A hidrológiai modellezés egyik fő eleme a Manning-féle érdességi együttható. A Manning (n) érték egy hidraulikai paraméter, amely a felszínborításból számított érdességi együttható. A hidrológiai modellezés során az áramlási sebesség becslése során különböző felületek, érdességének meghatározására alkalmazzák. Barnes (1967) tanulmányában részletesen bemutatja az érdességi értékek meghatározása során figyelembe vett terepi elemeket. Az értékek (n) 0,010-0,150 között alakulhatnak. Ezeknek a meghatározására több szempontot is figyelembe vettem. Barnes (1967) szerint az érdességi együttható meghatározása leginkább tapasztalati úton, több folyó és példa vizsgálata során lehetséges. A Manning-féle érdességi együttható (n) meghatározásánál

Barnes (1967) és Chow (1959) munkáit vettem alapul. 6 kategóriát különböztettem meg, amelyekhez értékeket rendeltem: Beton meder 0,010 – 0,020; Természetes meder 0,018 – 0,020; Természetes meder növényzettel 0,022 – 0,030; Természetes folyó, patak kavicsos mederrel 0,030 – 0,050; Természetes meder sziklával 0,035 – 0,070; Erősen benőtt, kanyargós meder 0,050 – 0,100.

A Manning-féle érdességi együttható minél pontosabb meghatározása nagyon fontos, mivel nagyban befolyásolhatja a modellben kialakuló vízszinteket és az árvíz kiterjedésének mértékét (Barnes 1967; USACE 2016).

Ami a modellek futtatását és felépítését illeti, a már említett HEC-RAS szoftverben történtek a további modellépítési folyamatok. A projektfájl létrehozását követően beállítottam a paramétereket, vetületi rendszert, létrehoztam a geometriai fájlt és a geometriai rácshálót, ezt követően feltöltöttem a megfelelő adatokkal. Itt egy fontos szempontot figyelembe véve választottam ki a cellaértékeket, hogy a cellák száma ne haladja meg az 500 000-et, mert az sokkal nagyobb gépkapacitást igényel a futtatások során, és a futtatások időben is sokkal hosszabbak lesznek. Az eddigi tapasztalatok alapján, ez a beállítás nem ront számottevően az elemzés pontosságán. Azonban az általam kritikusnak tekintett területek helyén (kritikus mélységű területek, partélek), a rácshálót sűrítettem a mérések pontossága érdekében. A rácsháló szerkesztést követően hozzárendeltem a Manning-féle érdességi együtthatókat, és a hozzáigazított érdességi értékeket. Összekapcsolva az elemeket újra generáltam a rácshálót. Ezt követően sok rácsháló hiba keletkezett, amelyet először a beépített rácsháló javító eszközzel korrigáltam, azonban ezt követően is sok hiba maradt, amelyet manuálisan javítottam.

A peremfeltételeket beépítettem a modellbe: a Tarna felső szakaszát jelöltem bemeneti peremfeltételként, a torkolati pontot pedig a kimeneti feltételként határoztam meg. A modellben meg kell adni az adatsor hosszát és időtartamát, valamint a bemenő vízhozam értékeket. Fontos szerepet játszott a bemeneti adatok között a terület meredeksége. Ez a paraméter jelentősen befolyásolja a lefolyási viszonyokat.

A szimulációhoz több alap paramétert kellett beállítani, mint a futtatás nevét, rövid azonosítóját, időtartamát, a megjelenítési és számítási időléptéket, a tolerancia értékeket és az iterációk maximális számát. A modellfuttatások elindítását követően a számítási folyamat időigénye változó volt, akár több órát vagy napot is igénybe vett.

4.2.6. A hidrológiai modellek validálása és kalibrálása

A modellfuttatások során és az azt követő eredmények kiértékelésénél figyelembe kellett vennem a modell stabilitását és érzékenységét, valamint a numerikus pontosságot befolyásoló tényezőket. A bemenő adatok és a megadott paraméterek befolyásolják a modell érzékenységét. A futtatások során meghatározó a geometriai adatok és a peremfeltételek pontossága, a vízhozam és áramlási adatok, valamint az instacionárius egyenletek megoldása.

A modell stabilitását elsősorban a modellfuttatások indítását követően és folyamatában kísértem figyelemmel, ahol az iterációk számát és a numerikus hibák mértékét figyeltem. Ha a modell egy nagyobb hibát észlelt, akkor a számítás megállt és a futtatást nem lehetett folytatni. Esetünkben a modellek stabilitását a geometriai rácsháló paraméterei, a keresztmetszeti geometria, a számítási időlépés, alacsony áramlási feltételek, domborzatból adódó hiányzó vagy rossz meder adatok adták. Ezeket a hibákat több tesztfuttatás során felismertem, a számítási ablakban megjelent adatokat összegyűjtöttem, majd javítottam.

Abban az esetben, ha a modellek nem mutattak instabilitást, vagy hibát a modell futtatása során, az eredményeken további pontossági vizsgálatokat végeztem. Több keresztmetszetet helyeztem el a modellben. Közben figyeltem arra, hogy reprezentatív és mérhető helyeken vegyem fel ezeket a keresztmetszeteket, azokat az ismert területeket is beleértve, amelyeket a terepi bejárás során rögzítettem, ezáltal ellenőrizve a peremfeltételt is. A keresztmetszvények helyének megjelölése és felvétele során fontos a távolság mértéke a keresztmetszetek között, mivel numerikus hibákhoz, vagy az eredmény instabilitásához vezethetnek. A keresztmetszvények alkalmasak a szelvényen átfolyó vízhozam számítására.

A modellben generált keresztmetszeteket összevettem hivatalosan mért keresztmetszetekkel, és ha a hiba mértéke minimálisnak volt mondható, akkor a modellt elfogadhatónak tekintettem. Az alsó szakaszon található tarnamériai és tarnaörsi mértékadó vízmércék szelvényiben, illetve a tőlük 10 méterrel fentebbi és 10 méterrel lentebbi szelvényekben kért keresztmetszvények álltak a rendelkezésemre. A vízfolyás fentebbi szakaszán található siroki és verpeléti vízmércék esetében a 2002 évi mércebemérés alkalmával történt felmérés állt a rendelkezésemre. Továbbá a terepi bejárás adatokkal, észrevételekkel és megfigyelésekkel kiegészítve értékeltem ki a

futtatások eredményeit. A modellfuttatások során a Manning-féle érdességi együtthatót alap bemenő adatként használtam, további változtatásokkal kapcsolatos tesztelést nem végeztem.

4.2.7. Statisztikai módszerek

4.2.7.1. Statisztikai vizsgálat a CarpatClim meteorológiai adatok esetében

A CarpatClim adatainak statisztikai elemzése során kapott β 1-értékeket mediánnal és tartományokkal, valamint boxplotokkal kombinált violin plotokkal (hegedűdiagram) összegeztem.

A hegedűdiagramok a kernel valószínűségi sűrűségét mutatják a különböző értékeknél. A szezonális változások esetében a különbségeket robusztus ANOVA-val elemeztem, robusztus post hoc teszttel, a `tlwaybt()` függvénnyel kombinált bootstrappinggel (599 ismétlés) számolt trimmelt átlagok (20%) felhasználásával. Ugyanezt a robusztus megközelítést alkalmaztam a páronkénti post hoc összehasonlításoknál az `mcpp20()` függvénnyel (Field et al. 2012). A trimmelt átlag megközelítés kezeli az adathalmaz kiugró értékeit, míg a bootstrapping, amely egy cserepótlással történő újramintavételezési technika (vagyis véletlenszerű mintavétel a teljes adathalmazból, általában 99-9999 alkalommal), segít kiszámítani a meglévő adatok pontosságát az átlag szórásának, a konfidencia intervallumoknak, az előrejelzési hibáknak a számszerűsítésével. Mivel ezek a tesztek robusztus technikák, nem igényelnek normál eloszlást (Efron és Tibshirani 1993).

A térbeli tendenciát faktoriális elrendezéssel elemeztem: a vizsgált területet négy egyenlő szélességű régióra osztottam nyugatról keletre, és négy egyenlő szélességű régióra északról délre (6. ábra). Ezeket a régiókat rendezett faktorokként használva Kruskal-Wallis-tesztet alkalmaztam a statisztikai különbség feltárására (H_0 : a β 1-értékek mediánjai minden régió esetében azonos eloszlásúak; H_1 : a β 1-értékek mediánjai legalább egy régió esetében különböznek a többitől). A trendet a Jonckheere-Terpra-teszttel igazoltam, annak érdekében, hogy szignifikáns növekvő vagy csökkenő trend figyelhető-e meg (Ali et al. 2015). Mind a Kruskal-Wallis-, mind a Jonckheere-Terpstra-tesztek nem parametrikus tesztek, amelyek nem igénylik a normális eloszlást, továbbá permutációt alkalmaztam 5000 ismétléssel a statisztikai sokaság mediánjának jobb reprezentálása érdekében.

A statisztikai elemzést az R 3.5.2 (R Core Team 2018) programban végeztük a clifun (Venkatraman 2018) és a WRS2 (Mair és Wilcox 2018) csomagokkal.

Az érzékenységi térképet az éghajlati változók β 1-értékeinek felhasználásával állítottam össze. Ezeket az értékeket a TMAX, TA és PET esetében a felső kvartiliseket, a PREC esetében pedig az alsó kvartilist tekintettem küszöbértéknek. Így az új térképrétegek azokat a területeket jelenítették meg, ahol az aszályos tendenciák kockázata a legmagasabb (a teljes terület legveszélyesebb felső 25%-át képviselve). Ezután a térképrétegeket egy egyszerű összeillesztéssel egyesítettem, amely azokat a területeket mutatta, ahol a kockázatos éghajlati tényezők száma (a TMAX, TA és PET növekedése és a PREC csökkenése) az aszályprobléma súlyosságát jelezte (11. ábra) (0-tól 4-ig, azaz 0: nincs kockázat, 4: az összes éghajlati tényező trendje meghaladta a küszöbértéket). A térképek megalkotását a QGIS 3.6 szoftverkörnyezetben végeztem (QGIS Development Team 2019).

4.2.7.2 Statisztikai analízis a hidrológiai modellek esemény alapú vizsgálata során

A hidrológiai modellek esemény alapú statisztikai analízise során a hidrológiai események vízszintadatait a HEC-RAS szoftveres modellezésben használt lefolyási adatokból, valamint a hivatalos hidrológiai mérőállomások vízszintadatai együttes vizsgálata során dolgoztam fel. Összehasonlítottam a Tarnán megfigyelt és modellezett vízszinteket három különböző térbeli léptékben, amelyeket három árvízi típusra: nagy árvíz (LF), árvíz (F) és átlagos (A) vízállás osztottam.

A modelleredményeket a megfigyelt és a modellezett értékek közötti különbségen alapuló pontossági mérőszámokkal értékeltem: korreláció, szórás, négyzetes középhiba (RMSE), normalizált négyzetes középhiba (NRMSE), elfogulatlan négyzetes középhiba (ubRMSE), Kling-Gupta hatékonyság (KGE) és Nash-Sutcliffe hatékonyság (NSE). Ezeket a mutatókat használtam fel a modelleredmények kiértékelésének vizsgálatához (Moriassi et al. 2007; Gupta et al. 2009; Zeybek 2018).

A korreláció a változók közötti kapcsolat erősségére mutat rá. Megmutatja a kapcsolat erősségének mértékét és arányát. A korreláció vizsgálata fontos módszer, ha a vizsgálat megbízhatóságát és érvényességét akarjuk vizsgálni.

A szórást gyakran használjuk kutatások során, mint statisztikai mutatót, mivel megmutatja a várható középértéktől a kutatásban szereplő értékeinek az eltérését.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}} \quad (2)$$

Az RMSE a modellezett és a megfigyelt értékek közötti különbségek átlagos nagyságát méri, és az alacsonyabb RMSE értékek jobb modellteljesítményt jeleznek, kisebb átlagos reziduumokkal (2).

$$\text{NRMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{\text{nval}}} \quad (3)$$

$$\text{nval} = \left\{ \begin{array}{ll} \text{sd}(O) & , \text{norm} = \text{sd} \\ O_{\max} - O_{\min} & , \text{norm} = \text{"maxmin"} \end{array} \right\} \quad (4)$$

$$\text{bias} = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (5)$$

$$\text{ubRMSE} = \sqrt{\text{RMSE}^2 - \text{bias}^2} \quad (6)$$

Az NRMSE az RMSE normalizált változata, amely a reziduumok relatív nagyságát jelzi, ahol a kisebb érték jobb modellteljesítményt jelez. Az ubRMSE az átlagos négyzetes különbség (RMSE) négyzetgyökét méri, amely figyelembe veszi a torzítást.

A képletekben az M_i a modellezett adatok i -edik eleme, O_i a megfigyelt adatok i -edik eleme, N az adatpontok száma, sd a szórás, és max-min a maximális és minimális értékek közötti különbséget jelöli.

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

Az NSE a modell teljesítményének normalizált mérőszáma, amelyet úgy határozunk meg, hogy az összesített maradék négyzeteket elosztjuk a megfigyelt értékek négyzeteinek összegével és azok átlagával (7). A 0,75-1 közötti értékek nagyon jó, 0,65-0,75 jó, 0,50-0,65 kielégítő és <0,50 elégtelen modellt jeleznek (Zeybek 2018).

Emellett a hidrológiai modellek hatékonyságát a KGE segítségével értékeltem, amely kiszámítja a korrelációt és a normalizált eltéréseket az előre jelzett és a mért adatok között. Az 1-hez közelebbi érték jobb modellteljesítményt jelez; általában a 0,8-1 közötti értékek kiváló, a 0,6-0,8 jó, a 0,4-0,6 kielégítő és a <0,4 nem kielégítő modelleket jelentenek.

A kapott eredményeket Taylor-diagramokban is összefoglaltam, amelyek a vízszintek megfigyelt és modellezett értékei közötti korreláció szintjét szemléltetik (Taylor 2001). A magas korreláció nagyobb fokú egyezést jelzett.

A standard eltérés (SD) szintén jelölte az eltéréseket, az RMSE pedig az átlagos előrejelzési hibát jelentette. A Taylor-diagram áttekintést nyújtott a modellek teljesítményéről (17. ábra), és összehasonlítottam az események átlagos lefolyását a teljes vizsgálati területre (C), a felső szakaszra (VS), a középső szakaszra (TMS) és az alsó szakaszra (TOS).

A statisztikai kiértékelést az R nyelv használatával végeztem az R 3.5.2 szoftverkörnyezetben (R Core Team 2018). A diagramokon ábrázolt térbeli lehatárolások a teljes vizsgálati területet (C), a felső szakaszt (VS), a középső szakaszt (TMS) és az alsó szakaszt (TOS) foglalják magukban (2. ábra).

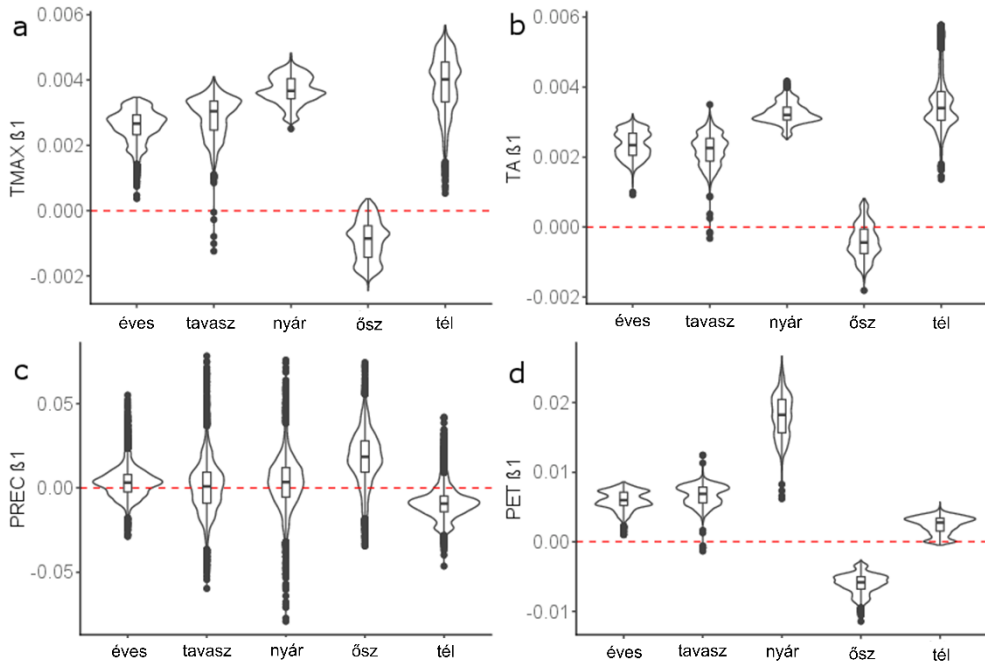
5. Eredmények és értékelésük

5.1. A csapadék és a hőmérsékleti tendenciák változásának kimutatása a Kárpát-medencében 50 éves periódus alapján

A CarpatClim adataiból származó eredményeket három nagyobb csoport szerint összegeztem. A szezonális trendek, a területi elterjedés trendjeinek és változásvizsgálatának, valamint a területi és szezonális együttes hatásának eredményei tekintetében figyeltem meg. Elsőként a szezonális trendek vizsgálatával foglalkoztam.

A robusztus ANOVA szerint minden vizsgált éghajlati változó szignifikáns szezonális különbséget mutatott ($p < 0,05$); vagyis minden évszak

különbözött egymástól, és minden évszak trendje eltért attól az esettől, amikor a trendet a bontás nélküli teljes évek alapján figyeltem meg.



9. ábra. Az éghajlati változók β_1 regressziós értékeinek kombinált hegedűdiagramja és boxplot-diagramja (TMAX: havi hőmérsékleti maximum, TA: havi átlaghőmérséklet, PREC: havi csapadék, PET: potenciális evapotranspiráció; ---: nulla szintet jelöli, ami azt jelzi, hogy nincs változás)
Forrás: saját szerkesztés

A TMAX emelkedése (9a. ábra) az ősz kivételével minden évszakban várható volt. Ősszel a csökkenés mérsékeltebb volt, mint az emelkedés a többi évszakban. Az emelkedés mértéke tavasszal, nyáron és ősszel hasonló volt, de télen nagyobb intervallumot fedett le. Éves szinten is növekedés volt várható, és az emelkedés meredeksége hasonló eloszlású volt, mint az első félévben, ugyanakkor kisebb tartományban volt értelmezhető.

A TA esetében megfogalmazott feltevések (9b. ábra) hasonlóak voltak, azzal a különbséggel, hogy a szórás minden évszakban kisebb volt. Meg kell említeni, hogy a β_1 -értékek eloszlása nyáron nagyobb intervallumban mozgott, mint a többi időszakban.

A PREC tekintetében (9c. ábra) tavasszal és nyáron csak kis változásokat vetített előre, ősszel azonban növekvő, télen pedig csökkenő tendencia volt megfigyelhető. Az utóbbi két esetben a hatások kiegyenlítik

egymást, ami nem eredményez jelentős változásokat az éves csapadék eloszlásában, a tavasz és a nyár esetében sem.

A PET esetében (9d. ábra) a közép- és maximumhőmérsékletekre jellemző változás figyelhető meg, vagyis tavasszal, nyáron és télen emelkedés, utóbbi esetben mérsékeltebb tendencia, ősszel pedig csökkenés, azzal a különbséggel, hogy a változások mértéke kisebb intervallumban értelmezhető. Valamint a változások mértéke egy nagyságrenddel nagyobb.

Ezt követően a területi elterjedést figyeltem meg és elemeztem az eredmények alapján. Megvizsgáltam, hogy a változásokban térbeli tendencia megfigyelhető-e az elhelyezkedésük függvényében. A nyugat-keleti és az észak-déli irányok esetében jelentős növekvő tendenciákat azonosítottam (10. ábra). A Kruskal-Wallis teszt kimutatta, hogy szignifikáns változások voltak, amikor az adathalmazt régiók szerint bontottam, de nem hangsúlyoztam azokat, amelyeknél ezek a szignifikáns ($p < 0,05$) különbségek az #1-#4 vagy #A-#D régiók között voltak (10. ábra).

A nyugat-keleti irányt esetében, a TMAX, a TA és a PET mediánjai a Keleti-Kárpátok vonaláig csökkentek minden egyes éghajlati változó esetében, de ezen a vonalon túl (#D régió) ez csak a nyárra és a télre volt igaz. Tavasszal és ősszel azonban a #D régió jelentősen nagyobb értékeket mutatott, mint a szomszédos #C régió és a β_1 -értékei hasonlóak voltak (de nem magasabbak), mint a legnyugatibb #A régióé. A #D szignifikánsan alacsonyabb értékű volt ($p < 0,05$) a nyári időszakot kivéve, amikor szignifikánsan magasabb volt ($p < 0,05$). Habár a tendenciák között voltak különbségek, a Jonckheere-Terpstra-teszt alapján mindegyik éghajlati változó szignifikáns trendet mutatott (2. táblázat).

2. táblázat. A nyugat-keleti tendenciák különbségei a Kruskal-Wallis (K-W) és a Jonckheere-Terpstra (J-T) teszt alapján (p: szignifikancia; TMAX: a havi hőmérsékleti maximumok β 1-értékei; TA: a havi középhőmérsékletek β 1-értékei; PREC: a havi csapadékösszegek β 1-értékei; PET: β 1-értékek a havi átlagos evapotranspiráció; sp: tavasz, s: nyár, a: ősz, w: tél; W: nyugat; E: kelet).

Klimatikus paraméter	Írány	K-W	p	J-T	p
TMAX	W→E	2463,4	<0,001	3057100	<0,001
TMAX sp	W→E	1661,3	<0,001	3780100	<0,001
TMAX s	W→E	2099,6	<0,001	2572100	<0,001
TMAX a	W→E	36650	<0,001	1509900	<0,001
TMAX w	W→E	850,94	<0,001	4935800	<0,001
TA	W→E	1797,9	<0,001	3596600	<0,001
TA sp	W→E	1550,6	<0,001	3837900	<0,001
TA s	W→E	2271,2	<0,001	2709000	<0,001
TA a	W→E	3802,9	<0,001	1539300	<0,001
PET w	W→E	831,57	<0,001	4740300	<0,001
PET	W→E	2500,6	<0,001	2520200	<0,001
PET sp	W→E	1963,8	<0,001	3110500	<0,001
PET s	W→E	1129,3	<0,001	3543300	<0,001
PET a	W→E	2342,7	<0,001	2980900	<0,001
PET w	W→E	838,32	<0,001	3934300	<0,001
PREC	W→E	282,61	<0,001	6438500	<0,001
PREC sp	W→E	324,21	<0,001	5482100	<0,001
PREC s	W→E	460,42	<0,001	6424800	<0,001
PREC a	W→E	651,70	<0,001	7273000	<0,001
PREC w	W→E	510,33	<0,001	4600900	<0,001

A régiók tekintetében északi irányból déli irányba haladva a TMAX mediánok legnagyobb értékei az északi régióban (#1 régió) voltak, ezt követően csökkenő tendenciát figyeltem meg a Kárpátok északi részétől déli irányba (10. ábra) haladva, egészen a Déli-Kárpátok vonaláig, ahol szignifikánsan magasabb ($p < 0,05$) mediánok voltak tavasszal, nyáron és télen.

Az őszi időszakban a tendencia folyamatos, eltéréseket nem figyeltem meg. A TA esetében is majdnem hasonló mintázatot találtam, azonban ebben

az esetben a tél is folyamatosan csökkenő trendet mutatott, akárcsak az ősz. Az #1 régió nagyobb szórást és nagyobb mediánt mutatott bármelyik éghajlati változóhoz vagy évszakhoz viszonyítva. Ebben az irányban a PET mintázata eltérő volt, mivel tavasszal és ősszel csökkenő, nyáron és télen pedig növekvő tendenciát figyeltem meg.

A PREC tavasszal és télen erőteljes és folyamatosan csökkenő trendet mutatott északról déli irányba haladva, nyáron és ősszel pedig enyhe csökkenés tapasztaltam. A tendenciák eltérése ellenére azonban mindegyik éghajlati tényező szignifikáns változási tendenciát mutatott a Jonckheere-Terpstra teszt szerint (3. táblázat).

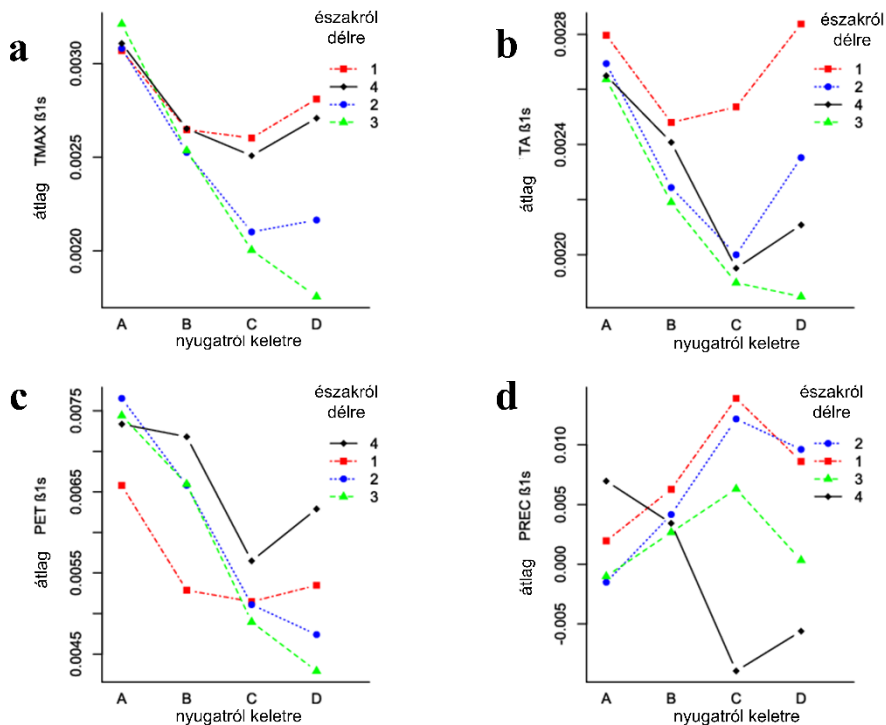
3. táblázat. A Kruskal-Wallis (K-W) és a Jonckheere-Terpstra (J-T) teszt alapján észak-déli irányú tendenciák különbségei (p: szignifikancia; TMAX: a havi hőmérsékleti maximumok β 1-értékei; TA: a havi középhőmérsékletek β 1-értékei; PREC: a havi csapadékösszegek β 1-értékei; PET: β 1-értékek a havi átlagos evapotranspiráció; sp: tavasz, s: nyár, a: ősz, w: tél; N: észak; S: dél).

Klímaváltozó	Irány	K-W	p	J-T	p
TMAX	N→S	543,05	<0,001	5202400	<0,001
TMAX sp	N→S	866,77	<0,001	4859200	<0,001
TMAX s	N→S	707,57	<0,001	7413700	<0,001
TMAX a	N→S	1058,4	<0,001	3673500	<0,001
TMAX w	N→S	578,91	<0,001	5718700	<0,001
TA	N→S	1664,3	<0,001	3363500	<0,001
TA sp	N→S	1307,5	<0,001	3768900	<0,001
TA s	N→S	411,83	<0,001	6766500	<0,001
TA a	N→S	665,74	<0,001	4062300	<0,001
TA w	N→S	1642,1	<0,001	3460500	<0,001
PET	N→S	429,81	<0,001	6931400	<0,001
PET sp	N→S	587,91	<0,001	4564700	<0,001
PET s	N→S	1839,9	<0,001	8715000	<0,001
PET a	N→S	1725,6	<0,001	2983200	<0,001
PET w	N→S	879,06	<0,001	7603700	<0,001
PREC	N→S	1155,0	<0,001	3502000	<0,001
PREC sp	N→S	2727,5	<0,001	2168200	<0,001
PREC s	N→S	203,03	<0,001	5481300	<0,001
PREC a	N→S	206,65	<0,001	6246700	<0,001
PREC w	N→S	2285,7	<0,001	2569500	<0,001

Harmadik egységként a területi és szezonális tényezők együttes hatását vizsgáltam. A térbeli jellemzők hatását kombináltam, és a kétirányú faktoriális ANOVA szerint, a két irány szignifikáns kölcsönhatása volt megfigyelhető az egyes éghajlati változók esetében (4. táblázat, 10. ábra).

4. táblázat. Az éghajlati változók és a térbeli változók kombinációi

	Átlagos négyzet			F érték			p (szignifikancia)		
	WE	NS	WE:NS	WE	NS	WE:NS	WE	NS	WE:NS
TMA X	$4,001 \times 10^{-4}$	$5,9 \times 10^{-6}$	$3,8 \times 10^{-6}$	2382	35	23	<0,00 1	<0,00 1	<0,00 1
TA	$1,313 \times 10^{-4}$	$1,492 \times 10^{-4}$	$3,866 \times 10^{-5}$	1585, 6	1801, 8	466,8	<0,00 1	<0,00 1	<0,00 1
PET	$3,544 \times 10^{-3}$	$6,18 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-5}$	3826, 7	667,5 2	30,46	<0,00 1	<0,00 1	<0,00 1
PREC	$5,86 \times 10^{-3}$	$8,644 \times 10^{-2}$	$4,442 \times 10^{-2}$	106,6	1573, 3	808,4	<0,00 1	<0,00 1	<0,00 1



10. ábra. Az éghajlati változók (TMAX: havi hőmérsékleti maximum, TA: havi átlaghőmérséklet, PREC: havi csapadék, PET: potenciális evapotranspiráció) és a térbeli jellemzők interakciós ábrái (a régiók megfelelnek a 6. ábrának), Forrás: saját szerkesztés

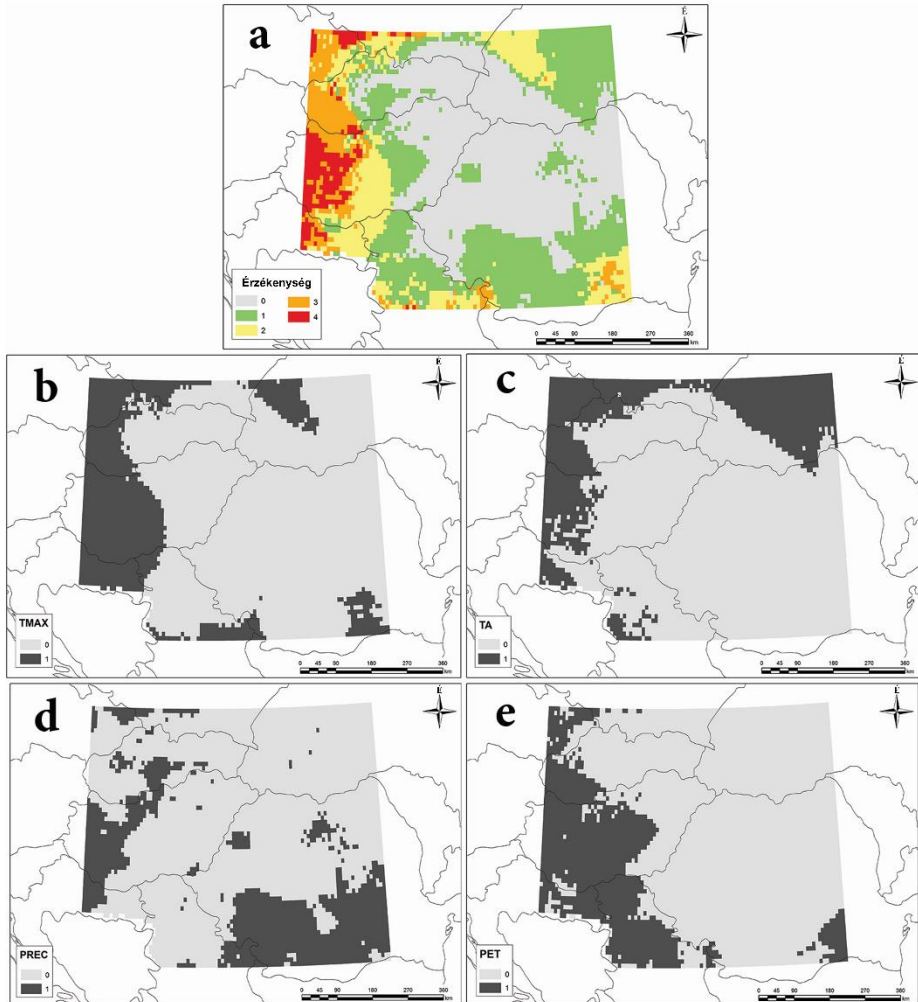
A TMAX térbeli tendenciáinak elemzése a β_1 -értékek tekintetében azt volt megfigyelhető, hogy az #1 és a #4 régió szinte azonos jellegű maximális hőmérsékletváltozás mutatkozik: az értékek csökkenésének mértéke a terület nyugati részétől elkezdődve (10a. ábra, #A), majd egy minimális emelkedéssel folytatódik (#D) ezt követően stagnáló állapot (#B, #C) figyelhető meg. A két központi régió (#2 és #3) trendjei is hasonlóan alakultak, azzal a különbséggel, hogy a #2 régió keleti felében (a #3-mal ellentétben) nem volt csökkenő tendencia a trend meredekségében.

TA esetében (10b. ábra), a trend meredeksége nyugatról kelet felé minden régióban csökkent, de csak a #3 régióban volt megfigyelhető egyenes trend minden hely esetében. Három régióban (#1, #2, #4) a Kárpátok

vonalaig csökkenő tendencia rajzolódott ki, onnan pedig növekedés kezdődött el.

A PET esetében megfigyelt trendek (10c. ábra) hasonló tendenciát mutattak, mint a TMAX, azzal a különbséggel, hogy az #1 és #4 régió elhelyezkedése ellentétes volt. Az #1 régió trendértékei nyugaton kisebbek voltak, és kelet felé csökkentek. A #4 kiindulási értéke figyelmen kívül hagyható, mivel a cella több mint $\frac{3}{4}$ -éről nem állnak rendelkezésre adatok; ezért nem lehet összehasonlítani a többivel.

A csapadék mennyiségének növekedését (10d. ábra) a magashegységek előterében (a Kárpátok nyugati oldalán - #C) figyeltem meg az eloszlás tekintetében, miközben a hegység keleti lejtőin csökkenést mutattam ki. A #4 régió kivételt képez, mivel a Déli-Kárpátok és a Román-alföld a #C és #D cellákban található, és ezekben csapadékhiány figyelhető meg.



11. ábra. Érzékeny területek az éghajlati változók megfigyelt legmagasabb trendjei (β_1 -értékek) alapján, a felső kvartilisek küszöbértékének alkalmazásával (a: az éghajlati változók összessége, ahol az összes térkép adatai együttesen vannak ábrázolva - minél magasabb az érték, annál több éghajlati változó lépte át a küszöbértéket; b: TMAX; c: TA; d: PET; e: PREC)

Forrás: saját szerkesztés

A rácsponthoz földrajzi szempontból is elemeztük, és feltártuk az éghajlati érzékenység legfontosabb elemeit (11a. ábra). A legnagyobb rész (42,0%) a meghatározott küszöbértékeken, azaz a felső kvartiliseken kívül volt. Ebbe az osztályba tartozott Északkelet- és Délkelet-Magyarország, a Bácskai-medence, az Erdélyi-medence egyes részei, a Partium, Szlovákia és Kárpátalja

(11a. ábra). Valamint 31,6% volt azon területek aránya, ahol csak egy éghajlati változó volt a küszöbérték felett, ezért a nem érzékeny részekkel együtt a vizsgált területnek csaknem a $\frac{3}{4}$ -e viszonylag stabil régiót alkotott. Azokon a területeken, ahol két éghajlati változó meghaladta a küszöbértéket 14,3% volt, és 7,5% volt az arány azokon a területeken, ahol három éghajlati változó meghaladta a kvartiliseket. Viszonylag kis terület tartozott a legkockázatosabb osztályba (4,6%), ez főként Nyugat-Magyarország és Kelet-Horvátország területén volt megfigyelhető.

Az egyedi jellemzők tekintetében az éghajlati változók összességében azt mutatták, hogy a Kárpát-medence keleti része és a Kárpátok hegységének vonulata meglehetősen állandóan stabil, míg a nyugati és délkeleti területek érzékenynek bizonyultak. A TMAX tekintetében a Dunától nyugatra fekvő területek a legérzékenyebb területek közé tartoztak (11b. ábra).

TA esetében szintén hasonló a mintázat volt megfigyelhető, azzal a különbséggel, hogy Magyarország délnyugati részének lefedettsége mozaikosabb volt, míg a Kárpátokon túli Ukrajna területe homogénebbnek mondható (11c. ábra).

PET eredmények esetében az érzékeny területek lefedettsége mozaikos volt, az észak-északnyugat és a dél-délkelet irányú vonaltól nyugatra fekvő területeken. Magyarország esetében ez a Dunától nyugatra fekvő teljes területet és a Tiszától nyugatra fekvő terület 1/3-át jelentette (11d. ábra). A legnagyobb területi szóródást a csapadék lefedettsége mutatta. Az ÉK-DNY irányú vonaltól nyugatra fekvő területek mozaikosak voltak. Romániában ez az Apuseni-hegység nyugati oldalán, valamint a Keleti- és Déli-Kárpátokban figyelhető meg (11e. ábra).

5.2. A csapadék és a hőmérsékleti tendenciák változása a Kárpát-medencében 50 éves időintervallum alapján történő vizsgálatának értékelései

A klímaváltozás, a csapadék és a hőmérsékleti tendenciák változásának kutatása nem egy új kutatási terület, azonban még mindig ad új kutatási nézőpontokat.

Az előző fejezetben ismertetett kutatás eredményeként elmondható, hogy a maximális (TMAX) és az átlaghőmérséklet (TA) szezonális változása szinkronban volt egymással mind az évszakos, mind az éves összehasonlításban. A magyarázat a változók alapját adó adatokban keresendő, mivel mindkét értéket az óránkénti maximum- és

átlaghőmérsékleti adatokból kaptuk. A TMAX és a TA összehasonlításában a maximumértékek valószínűsége magasabb volt, ami a hóhullámok időszakainak növekedésére utal. Ezt az átlaghőmérsékletet bemutató ábrát (9. ábra) és Göndöcs és munkatársai (2018) megállapításai is alátámasztották. A csapadék valószínűségének növekedése csak ősszel következett be, egy nagyságrenddel nagyobb mértékben, mint a hőmérsékleti paraméterek esetében. Az őszi csapadéktöbblet egyenletes eloszlása magyarázhatja az átlag- és a maximumhőmérséklet csökkenését. Zhao és Khalil (1993) szintén hasonló összefüggéseket találtak a hőmérséklet és a csapadék között az Egyesült Államokban a Középső- és Déli-síkság nyara esetében; azonban fontos megjegyezni, hogy ezeknek a területeknek a domborzata hasonló a vizsgálati területhez.

Ferrari és társai (2018) szintén negatív trendet talált az idősorokban Dél-Olaszországban, és arra is rámutattak, hogy bár az általános felmelegedés bizonyítékait sikerült megerősíteni, a szezonális változások eltérők és ellentmondásosak lehetnek. Milosevic és munkatársai (2015) a jelen tanulmányhoz hasonló eredményeket kaptak a vizsgálatuk során a csapadék és a hőmérséklet alakulására vonatkozóan Szerbia vajdasági régiójában (6. ábra #B3 és #B4 régiói).

Az 1949-2013 közötti időszakra vonatkozóan az őszi hónapokban jelentős csapadéknövekedést jelzett, míg az átlag- és a maximális hőmérséklet csak ősszel csökkent. A PET és a hőmérsékleti paraméterek előjele és eloszlása hasonlóan alakult, azzal a különbséggel, hogy a PET-értékek egy nagyságrenddel nagyobbak voltak. Ennek a hasonlóságnak az oka a hőmérsékleti összefüggésekben keresendő, mivel a magasabb hőmérséklet nagyobb párolgást és transzspirációt generál (Helfer et al. 2012). A maximális hőmérséklet térbeli változásának térbeli szerkezete nyugatról kelet felé haladva növekedést mutatott.

Az egyik legjelentősebb megállapítás, hogy a növekedés nagyobb volt azokon a területeken, ahol az orográfiai viszonyok miatt az éghajlat térbeli átlagban hűvösebb volt (az Északnyugati-, Északkeleti- és Déli-Kárpátok jelentős területei; az #1 #4 régiók, valamint Magyarország nyugati része), ami összhangban állt Szabó és társai (2019) megállapításával. Blanka és munkatársai (2013) és Mezösi és társai (2016) a legnagyobb változásokat az Alföldön prognosztizálták, ami ellentmondásnak tűnhet a mi eredményeinkkel, de néhány feltételt figyelembe kell venni: mi a trendet és nem a hőmérséklet-változást elemeztük, azaz az Alföldön is bekövetkezhet

további hőmérséklet-növekedés, de azokat a területeket érinti jobban, ahol jelenleg alacsonyabb a hőmérséklet. Az átlag- és a maximális hőmérséklet további (még kisebb mértékű) emelkedése súlyos problémákat okozhat, ezért mind a terület használóknak, gazdálkodóknak, mind a várostervezőknek szem előtt kell tartaniuk a lehetséges negatív hatásokat (pl. vízhiány, hőhullámok).

A Kárpátok éghajlati határként jelenik meg ebben a térbeli összehasonlításban: ez a jelenség a #C és #D régiókban a #2 és #3 cellákban a növekvő tendencia nagyobb mértékű csökkenésével mutatkozott meg. Ez az orográfia hatásával magyarázható (Kohler et al. 2014). Kohler és munkatársai (2014) munkájukban arra is rámutattak, hogy a Kárpátokban 1960-2010 között a 20 mm-nél több csapadékkal jellemezhető éves napok számának változása általában pozitív volt, a hegységben több olyan rész is volt, ahol csökkenő tendenciát mutatott. Az intenzív esőzések száma és az összes csapadéknapok számának növekedése kiegyensúlyozatlan vízháztartást, villámárvizeket és intenzív eróziót eredményezhet (Czigány et al. 2013; Jakab et al. 2019; Pirkhoffer et al. 2009; Szabó et al. 2015).

A magasabb hőmérséklettel és evapotranszpirációval, valamint alacsonyabb csapadékmennyiséggel jellemezhető régiókat a szélerózió veszélyezteti. Bár a száraz területeken gyakori a szélerózió, ez a kérdés olyan régiókban is felmerülhet, ahol korábban a növényzet és a talajnedvesség megakadályozta a talajok szél általi elhordását (Négyesi 2018; Pásztor et al. 2016).

A PET majdnem minden régióban csökkenő tendenciát mutatott nyugatról kelet felé, azonban az #1 és #4 régió (a TMAX-hoz hasonlóan) stagnáló (1), illetve növekvő (4) tendenciát mutatott, ami a hőmérséklet és a párolgás/beszívargás közötti összefüggésre vonatkozó korábbi állításokat földrajzi szempontból is igazolja. A csapadék mennyisége a #C régióig fokozatosan nőtt, majd az #1, #2 és #3 régiókban csökkent, ami az Atlanti-óceán felől érkező nedves légtömegeknek és a Kárpátok nyugati lejtőinek orografikus csapadéktöbbletének tulajdonítható (Kohler et al. 2014). Kivételt képezett a legdélebbi #4-es régió, ami az #A #4-es cellában a nem elegendő adatok hiányával és mediterrán hatásokkal magyarázható (Panthou et al. 2018).

A felső kvartilis feletti maximum- és átlaghőmérséklet, valamint a PET térbeli eloszlása csak annyiban különbözött, hogy a TA esetében a térkép lényegesen mozaikosabb volt (*11c. ábra*), míg a PET a maximumhőmérséklethez képest nagyobb területet képviselt. A csapadék

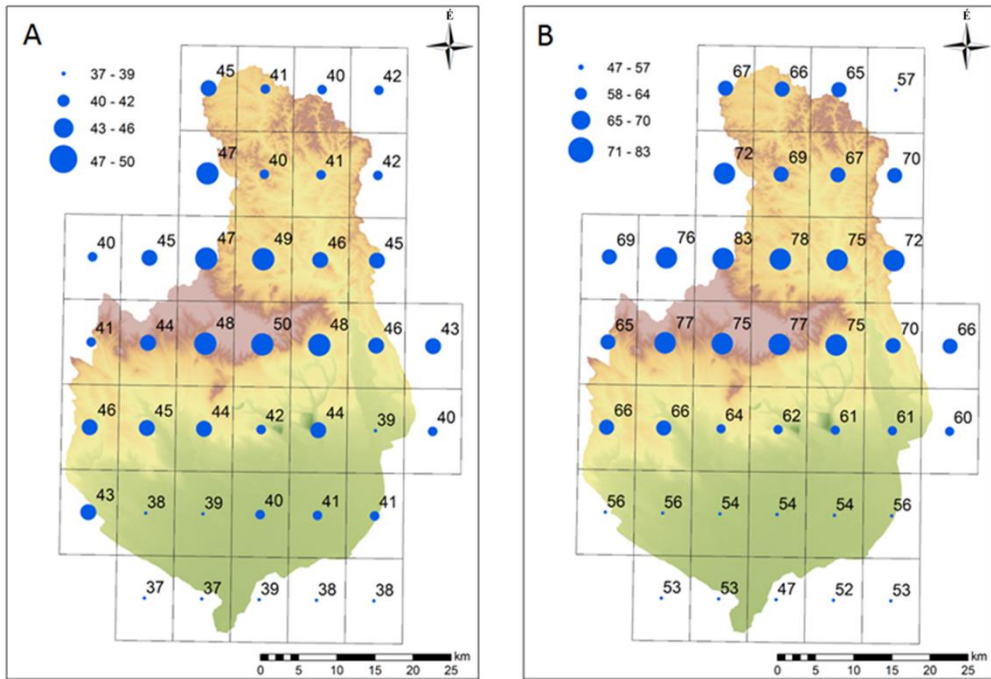
alsó kvartilis alatti területek mutatták a legnagyobb térbeli heterogenitást. Érdemes megjegyezni, hogy a Vöröstoronyi-hágó (Turnu Roșu) térségében megfigyelhető egy 0 érzékenységgű terület. A csapadékadatok elemzése során kiderült, hogy a havi csapadékösszegek az 50 éves átlagban jelentős eltéréseket mutattak ezen a területen. A 30-40 km-es távolságban akár 50-100 mm csapadékkülönbség is kimutatható az ezen a távolságon belüli rácsock között.

5.3. Az E-OBS adatbázis időbeli és térbeli csapadék adatainak vizsgálata 1960-2020 között a Tarna vízgyűjtő területén

Az csapadékelemzéseket kisebb szinten, az E-OBS adatok alapján a Tarna vízgyűjtő területére koncentrálva végeztem el.

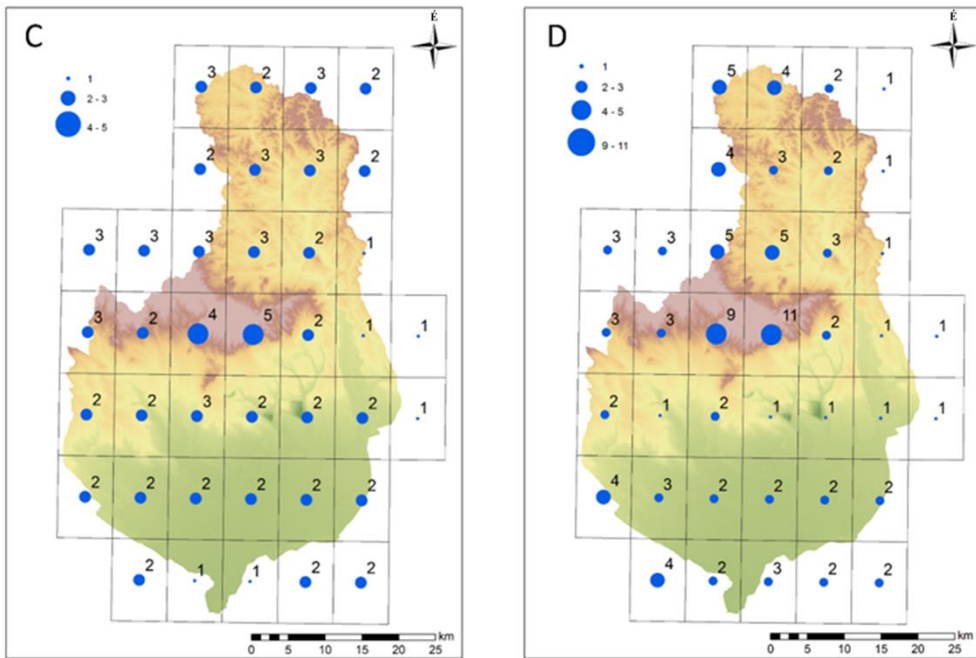
A kutatás során vizsgált adatok alapján elmondható, hogy 1960-1989 időszakban (A) a csapadékos napok száma elérte az 50-es értéket, amely a vízgyűjtő magasabb területén fordult elő (*12. ábra*). Az 1990-2020 időszakban (B) a csapadékos napok számának maximuma elérte a 83-at, amely szintén a magasabb fekvésű területeken megfigyelhető. Ezek alapján jól érzékelhető a csapadékos napok gyakoriságának emelkedése. A legnagyobb térbeli heterogenitás azokon a területeken volt jellemző, ahol a csapadékos napok száma alacsony volt.

Az ábrák alapján elmondható, hogy a gridrácokra osztott területen az 1990-2020 időszakban (B) minden esetben növekedés volt megfigyelhető (*12. ábra*). A növekedés mértékében minden rácselem esetében nem mutat szoros kapcsolatot, a térbeli eloszlás változásai az alacsonyabb tengerszint feletti magasságokban elhelyezkedő területeken erősebben megmutatkoznak.



12. ábra. 1960-1989 (A) és 1990-2020 (B) közötti időszakok 10 mm napi csapadékos napok gyakoriságának bemutatása
 Forrás: saját szerkesztés

Az 1960–1989 és az 1990–2020 közötti időszakban a 20 mm-t meghaladó napi csapadékesemények gyakoriságának összehasonlítása során eltérő skálát kellett alkalmazni, mivel a B időszakban ezen események előfordulása több térségben megduplázódott. A korábbi eredményekhez hasonlóan továbbra is megfigyelhető volt az a tendencia, hogy a magasabban fekvő területeken gyakoribbak ezek az események, míg az alacsonyabban fekvő síkvidéki területeken ritkábbak. Ez a mintázat az 1990 és 2020-as években ismételt megerősítést nyert, hiszen egyes térségekben a 20 mm feletti napi csapadékesemények száma kétszeresére emelkedett (13. ábra).



13. ábra. 1960-1989 (A) és 1990-2020 (B) közötti időszakok 20 mm napi csapadék gyakoriságának összehasonlítása
 Forrás: saját szerkesztés

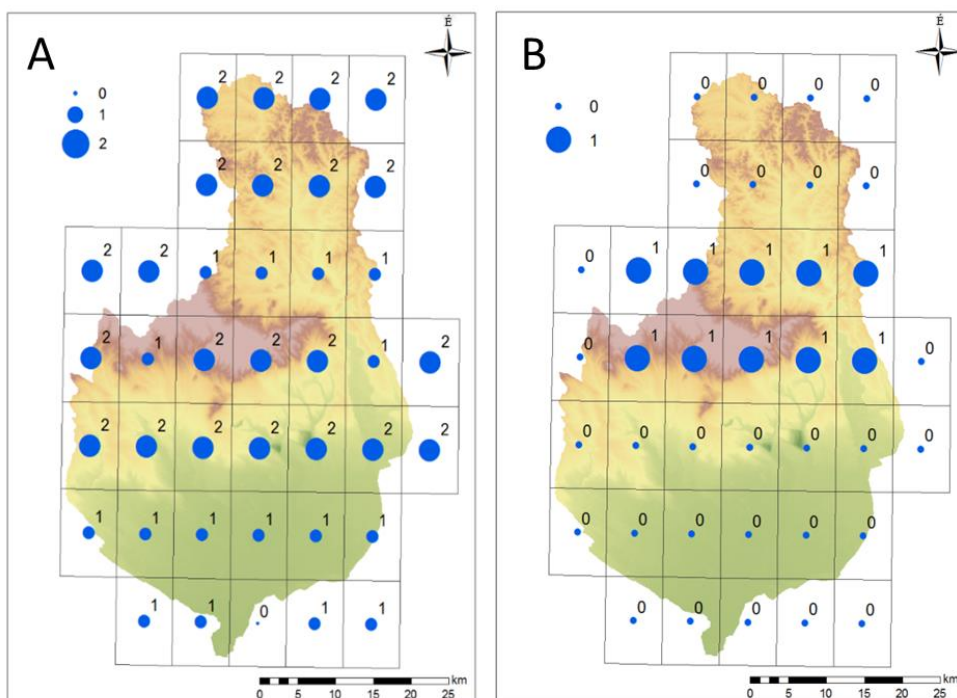
Az 1990-2020 közötti időszakban lehulló 30 mm/nap csapadék értékei a vízgyűjtőre tekintve azt, mutatják, hogy a magasabb térfelszíneken nagyobb gyakorisággal következnek be, viszont értékük csak 0-2 értékek között változik.

Az 1990-2020 közötti időszak 40 mm/nap csapadék gyakorisága csak 0 és 1 között változik. Ez jellemzően a 650-1050 m magassági területeken jelenik meg. A csapadék eloszlása a magasság és az időintervallum változásának függvényében jelentős időbeli és térbeli eltéréseket mutatott. A nagyobb csapadékkintenzitású napok gyakorisága a magasabb dombvidéki, illetve hegyi területeken hatással lehet a területen bekövetkező talajerózióra, a lefolyási viszonyok változására és a talajnedvességi viszonyokra, ezáltal a vízrendszer és az ökológiai viszonyok alakulására (14. ábra).

Az eredmények alapján megállapítható, hogy szignifikáns változás figyelhető meg az 1960-1989 és az 1990-2020 idők között a csapadékos napok számát illetően (14. ábra).

A 1960–1989 közötti időszakban a Tarna vízgyűjtő térségére vonatkozó adatbázisban nem volt kimutatható 20–30 mm, illetve 30–40 mm

közötti napi csapadékesemény, ezért az adott kategóriák grafikus megjelenítése nem volt lehetséges.



14. ábra. 1990-2020 közötti időszak 30 mm napi csapadék gyakorisága (A)

1990-2020 közötti időszak 40 mm napi csapadék gyakorisága (B)

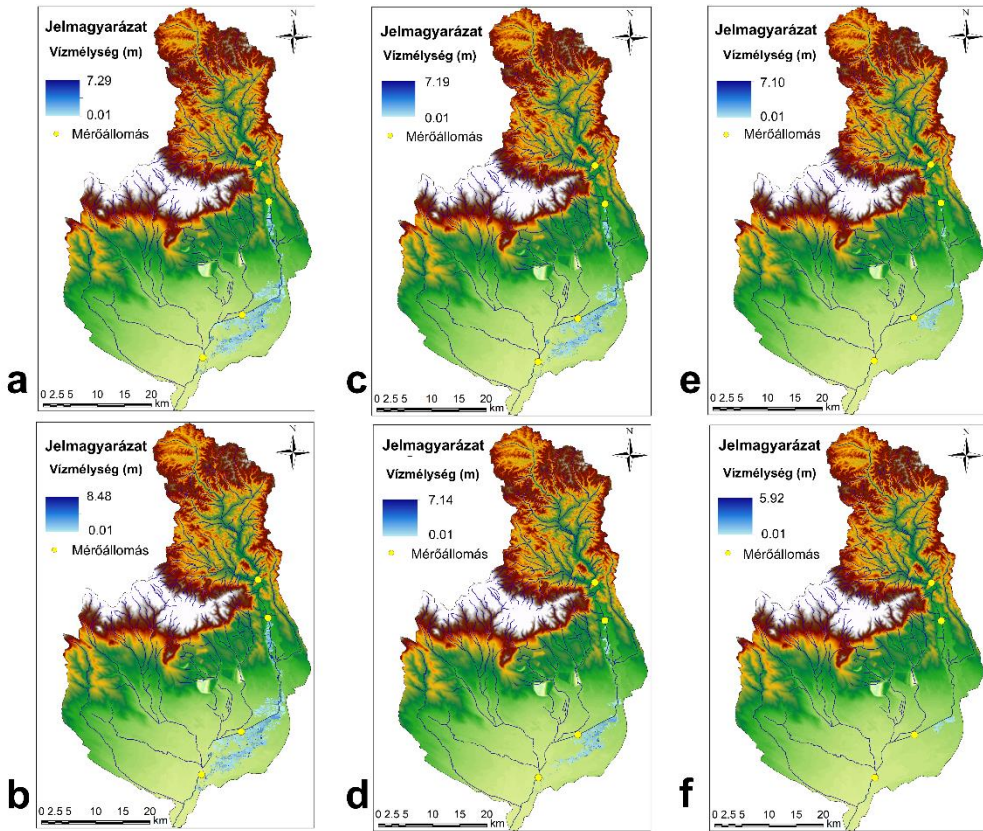
Forrás: saját szerkesztés

5.4. Hidrológiai modellek alkalmazhatóságának lehetőségei kiszívgyűjtő területén

A hosszas modellfuttatásokat követően különböző eredmények születtek, amelyeket térbeli eloszlásban, területi kiterjedésben és értéktartományban is vizsgáltam. A vizsgálatokat statisztikai elemzésekkel egészítettem ki.

Az eredmények alapján megfigyelhető volt, hogy a teljes szakaszra végzett árvízi szimulációk esetében az L_b (5. táblázat) esemény mutatta a legnagyobb kiterjedést, amelyet az L_a, F_c és F_d események követtek. Az A_e és A_f események esetében pedig lényegesen kisebb értékeket voltak megfigyelhetőek. A térbeli eloszlást tekintve, a VS, TMS és TOS szakaszon megfigyelhető eredmények alapján, a TMS szakaszon volt a legnagyobb az árvízzel érintett terület, ezt követte a VS kisebb előtöltött területtel. Azonban a

TOS szakaszon csak kis előtött terület volt megfigyelhető (15. ábra, 5. táblázat).



15. ábra. Az elöntési modellek térbeli ábrázolása a Tarna folyó vízgyűjtőjén Észak-Magyarországon: **a, b** Legnagyobb árvízi esemény, **c, d** Árvízi esemény, **e, f** Átlagos árvízi esemény. Forrás: saját szerkesztés

A modellek kiterjedését illetően, a legnagyobb mértékben a L_b és L_a események teljesítettek, 50,36 km² és 46,89 km² területi kiterjedéssel, amely az esemény típusa miatt várható volt. Az események térképei az elöntések mértékét szemléltetik, amelyek alapján beazonosíthatóak voltak az érzékeny területek. A középső rész (TMS) eredményezte az árvizek kiterjedésének legnagyobb mértékét, az L_b esemény során ez az érték 39,86 km² mutatott, ezt követte a középső szakaszon beazonosítható rész L_A 37,74 km² kiterjedéssel.

Az alsó szakasz (TOS) esetében a legmagasabb értéket az L_a 1,41 km² értékkel, az ezt követő események értékei már csak 0,88-0,01 km² között

alakultak. Ezek az eredmények elsősorban a folyó alsószakasz jellegével, a nagyobb mederátmérővel és a meder magasabb szintű kiépítettségével magyarázható. Ezen a szakaszon az árvízi események hatékonyabb kivédésére kiépítettebb infrastruktúra áll rendelkezésre.

5. táblázat. Az árvíz kiterjedése és értékei a három lehatárolt területre (VS: felső szakasz TMS: középső szakasz, TOS: alsó szakasz) és a teljes területre (C) a Tarna folyó vízgyűjtőjén Észak-Magyarországon. L-a és L-b: Legnagyobb árvízi esemény, F-c és F-d: árvízi esemény, A-e és A-f: Átlagos árvízi esemény.

Esemény típusa	Esemény	VS (km ²)	TMS (km ²)	TOS (km ²)	C (km ²)
Legnagyobb árvízi esemény	L_a	8,26	37,74	0,88	46,89
	L_b	9,09	39,86	1,41	50,36
Árvízi esemény	F_c	6,81	33,62	0,47	40,91
	F_d	3,94	18	0,13	22,07
Átlagos árvízi esemény	A_e	2,73	8,93	0,02	11,68
	A_f	0,01	2,93	0,01	2,95

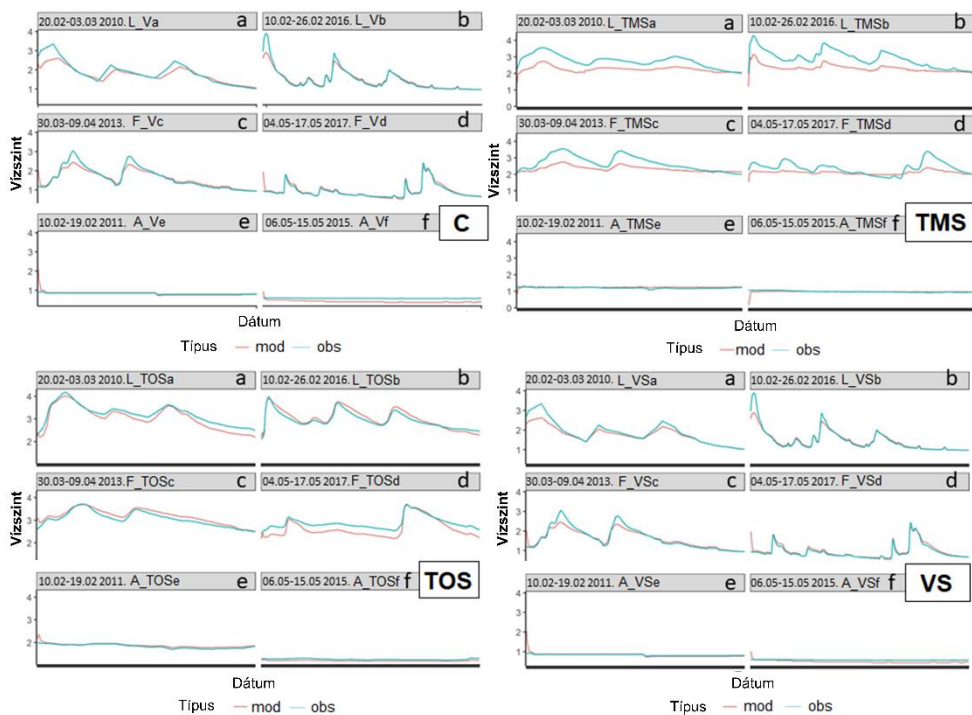
5.5. A hidrológiai modellek pontosságvizsgálata a választott árvízi események alapján

A kutatás során az eredmények ábrázolását és az előntések kiértékelését, pontosságvizsgálat követte, amely először a mért-, illetve a modellezett eredmények összehasonlítását foglalta magába, majd ezt követte a statisztikai módszerekkel történő vizsgálat. Ebben a fejezetben ezek eredményeinek összefoglalását mutatom be részleteiben.

A teljes szakasz (C) esetében hasonló tendenciák voltak megfigyelhetők mind a modellezett, mind a megfigyelt vízszintek esetében (16. ábra). Az A_e vízszintje állandó volt, megfelelő eltérések nélkül. Az A_f-ben a megfigyelt értékek mindig magasabbak voltak a modellértékeknél. Az F_c esetében a vízszintek a csúcsoknál eltértek egymástól, a modellezett vízszintek alulbecsült értékei mellett. F_d modellje minimális eltérést mutatott a mért értékektől. Az L_a esemény esetében a vízszintek emelkedése

a megfigyelt adatokban korábban kezdődött, mint a modelladatokban. Az L_b esetében a csúcspontoknál enyhe emelkedés volt megfigyelhető a megfigyelt értékek javára. A teljes (C) területen a három árvízi esemény esetében nem volt megfigyelhető jelentős eltérés (16. ábra).

Ami a TOS szakaszt illeti, az A_e és A_f események esetében csak a kezdeti pont mutatott egyértelmű különbséget, míg a relatív különbségek nagyok voltak, így az NRMSE nagy torzítást jelzett. Az F_c esemény azonos vízszinteket eredményezett a csúcspontokban, de a vízszintek csökkenése lassabb volt a megfigyelt értékeknél. Az F_d esemény szintén azonos csúcspontokat eredményezett, de a modellezett értékek következetesen a megfigyelések alatt voltak. Az L_a esemény értékei hasonló tendenciát mutattak, kisebb eltérésekkel, ahol a modellezett értékek következetesen magasabbak voltak. Az L_b modellje szorosan követte a megfigyeléseket, még a magas vízszintek esetében is; a csökkenés azonban lassabb volt a modellben. A TMS adta a legeltérőbb eredményeket a vízszintváltozások tekintetében. Az F_c alapján nagy torzulás volt megfigyelhető a csúcspontoknál: a modell következetesen a megfigyelt értékek alatt maradt. Az F_d diagram nem ábrázolt szembetűnő vízszintnövekedést a modell esetében. Az L_a és L_b változásait párhuzamosan követték, a modell eredményei mégis alacsonyabb vízszinteket jeleztek. A VS eseményei hasonló tendenciát mutattak az A_e és az A_f esetében. F_c esetében a modell a csúcspontoknál alulmúlta a megfigyelt értékeket. Az F_d esemény modellezett értékei a megfigyelt értékekkel azonos tendenciát mutattak. Az L_a esemény tekintetében a modellezett értékek a csúcspontoknál alulmúlhattak. Az L_b esetében a modellezett eredményekben az első két kiemelkedő csúcspontnál alacsonyabb értéket figyeltem meg (16. ábra).



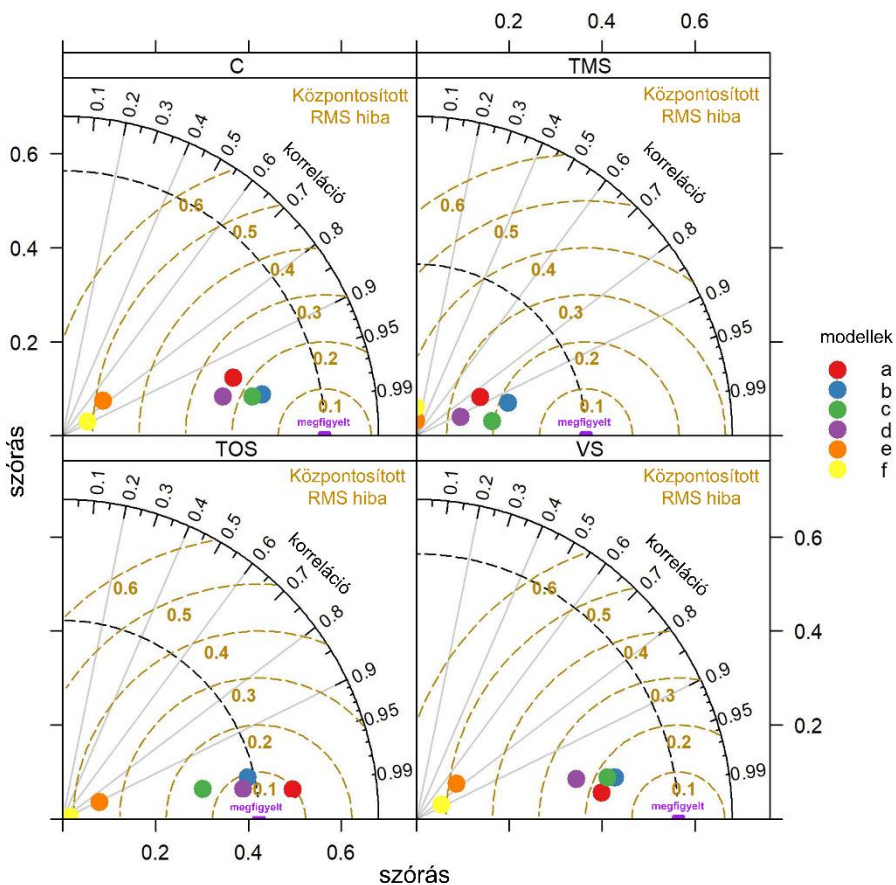
16. ábra. A megfigyelt (obs) és a modellezett (mod) vízszintek területi és eseményalapú eloszlásának ábrázolása a Tarna folyó észak-magyarországi vízgyűjtőjén a modelfuttatások során. **C**: teljes terület, **TMS**: középső szakasz, **TOS**: alsó szakasz, **VS**: felső szakasz; legnagyobb árvízi esemény: **a** és **b**; árvízi esemény: **c** és **d**; átlagos árvízi esemény: **e** és **f**.

Forrás: saját szerkesztés

A „b” esemény értékei minden területre vonatkozóan kiemelkedő eredményeket adtak, ahogyan az várható volt, mivel ezt az eseményt jellemezte a leghosszabb időtartam és az időintervallumon belül a legnagyobb vízhozam. Ezt követően a „d”, „a” és „c” események is hasonlóan jó eredményeket hoztak (17. ábra). A vizsgálat során az „e” és „f” események minden területen jelentős eltérést mutattak a többi eseménytől. A várakozásoknak megfelelően ezek a modellek teljesítettek a legkevésbé kedvezően a rövid időintervallum és a bemeneti adatok korlátozott változékonysága miatt. Ezen események átlagos értékei és pontossága eltértek a magasabb és a legmagasabb vízszintekétől.

A teljes (C) terület esetében a „b” és a „c” események 0,2 közeli RMSE értékű eredményeket adtak, míg az „a” és a „d” események értékei a 0,3-as tartományba estek. Az „e” és „f” események értékei nagy hibahatárral

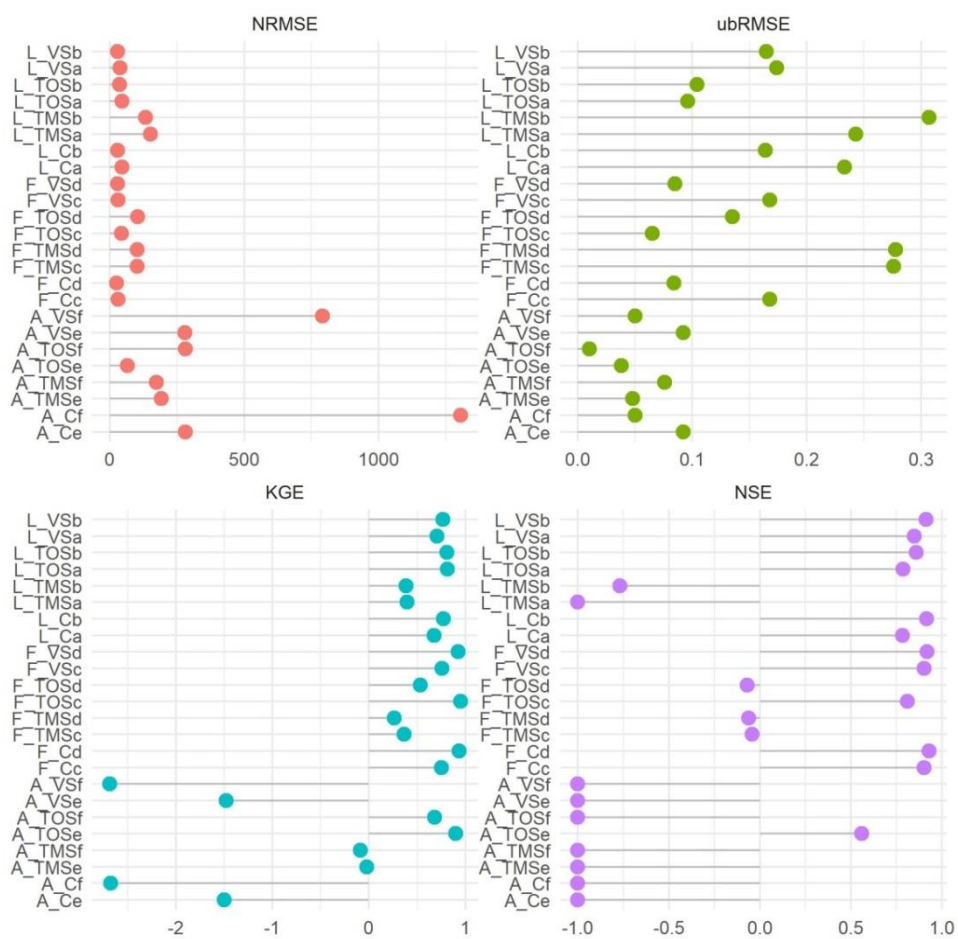
jelennek meg a Taylor-diagramon (17. ábra). Az RMSE növekedése a modell teljesítményének csökkenését jelzi. A TMS-értékek mutatták a legnagyobb különbséget az RMSE-ben minden esetben. Ismét az „e” és az „f” események teljesítettek a legrosszabbul. A Taylor-diagram vízszintbecslésre történő alkalmazásakor a diagram közepéhez közelebbi, alacsonyabb szórásértékekkel rendelkező modellek azt jelzik, hogy megbízhatóbbak és nagyobb pontossággal alkalmazhatók. A korrelációs együtthatók általában erős kapcsolatot jeleztek a modellezett és a megfigyelt értékek között, de voltak kivételek, általában az „e” és „f” események esetében, ahol más pontossági mérőszámok is alacsony teljesítményt mutattak. Erős korrelációk, 0,90-0,99 értékek figyelhetők meg a C, a TOS és a VS területeken, míg a TMS-ben két olyan esemény volt, ahol a modellek és a mért értékek közötti korreláció 0 és 0,2 között mozgott (17. ábra).



17. ábra. A hidrológiai modellek Taylor-diagramja területek és események szerint a Tarna folyó vízgyűjtőjére. C: teljes terület, TMS: középső szakasz, TOS: alsó szakasz, VS: felső szakasz. Az eseménykódok (változatok) megfelelnek a 16. ábrának.

Forrás: saját szerkesztés

Az NRMSE pontossága 0 és 1305 között mozgott. Az átlagos típusúnak minősített események következtében az átlagot meghaladó értékeket produkáltak. Az A_VSf és az A_Cf esetében a modellek voltak a kevésbé pontosak, míg a nagyobb árvizekre vonatkozó modellek általában jól teljesítettek az NRMSE alapján (18. ábra).



18. ábra. A modellfuttatások pontossági mérőszámai a Tarna folyó észak-magyarországi vízgyűjtőjére (NRMSE = normalizált átlagos négyzetes hiba; ubRMSE = torzítatlan átlagos négyzetes hiba; KGE = Kling-Gupta

hatékonysági együttható; NSE = Nash-Sutcliffe hatékonysági együttható).

VS: felső szakasz, TMS: középső szakasz, TOS: alsó szakasz, és C: teljes terület. L-a és L-b: Legnagyobb árvízi esemény, F-c és F-d: árvízi esemény, A-e és A-f: Átlagos esemény.

Forrás: saját szerkesztés

Mivel az ubRMSE csak a torzítatlan modellhibát tükrözte, nem azonosította a modell teljesítményét, de jelezte, hogy az L_TMSa és L_TMSb, valamint az F_TMSc és F_TMSd pontossági problémákkal küzdött, és ugyanezt tapasztaltuk az NSE esetében is. Az NSE azonban az A_TOSe kivételével szinte valamennyi átlagos (A) modell esetében szintén nem kielégítő modelleket jelzett. A KGE-k általában megfeleltek az NRMSE-nek és az NSE-nek. Ezek alapján a modellek többsége pontosnak tekinthető, mivel a 24 modellből 18 legalább kielégítően teljesített. Az NSE teljesítménymetrika eredményei alapján 11 esetben a modellek jól teljesítettek az előre jelzett és a megfigyelt értékek illeszkedése szempontjából, mivel közel voltak az 1-es küszöbértékhez, vagyis a modellek pontossága elfogadható. Általában az átlagos vízhozam-szimulációk teljesítettek a legrosszabbul, az árvíz és a nagy árvíz szimulációk pedig pontosabbak voltak (18. ábra).

5.6. A hidrológiai modellek alkalmazhatóságának értékelése

A modellezés eredményeinek kiértékelését követően összehasonlítást végeztem más hasonló kutatások eredményeivel és igyekeztem az összefüggéseket feltárni.

A kutatás keretében a mért és modellezett vízszintek időbeli változásában változó tendenciát figyeltem meg. Az átlagos események során nem voltak jelentős változások, de a nagy és jelentős árvízi események során az árhullámban, amelyet az árvízi görbék szemléltetnek, ingadozás volt megfigyelhető (16. ábra). Illés és társai (2003) az 1998-as tiszai árvíz során megfigyelték, hogy a csúcsárhullám diszkontinuitása az árterületi mélyedések fokozatos feltöltődése miatt következhet be. Hasonlóképpen a vizsgálataim során megfigyelt változások is az árterületi mélyedéseknek tulajdoníthatók: az árterületi mélyedésekben és a medertől távolabb eső területeken bekövetkező elöntések befolyásolták a mederben kialakuló vízszinteket, és az árhullám visszahúzódása során megfigyelt csúcsvízszinteket. Az áradás során a mederből távozó víz mennyisége befolyásolhatja az árhullám további visszahúzódását és intenzitását. A vízszintgrafikonok segítségével

kimutattam, hogy a vízszintváltozás sebessége gyors volt a VS szelvényes eseményekben (16. ábra).

A VS_c és VS_d esetekben a TMS_c, TMS_d, TOS_c és TOS_d szakaszokhoz képest az értékek meredek görbéje volt megfigyelhető. A VS szakasz a Tarna folyó medencéjének felső szakaszát tükrözi, ahol a részvízgyűjtők meredekebb lejtői gyorsabb áramlást eredményeznek az alacsonyabban fekvő területek felé, ami a nagyobb intenzitású lefolyás magasabb csúcsértékeit eredményezi. Az alacsonyabb, laposabb völgytalpakkal jellemezhető TMS szakaszon a vízszintgörbék egyre inkább ellaposodnak, ami hosszán tartó (több napig tartó) árvizeket eredményez. Hasonlóan elhúzódó árvízi görbét figyeltem meg a TOS szelvényben, ami elsősorban a domborzati jellemzőknek tulajdonítható. Szlávik (2021) és Stoffel és társai (2016) szerint az árhullámok kialakulását befolyásoló különböző tényezők közül a domborzat hatása az egyik legjelentősebb, amely a hegyvidéki és magashegyi területek hidrológiai eseményeiben nyilvánul meg.

A TMS szakasz esetében tapasztaltam a legnagyobb hibákat a pontossági mérőszámok tekintetében. A Taylor-diagram eredményei alapján (17. ábra) szintén a TMS szakasz volt a leggyengébb, a legmagasabb RMSE értékekkel, az ubRMSE és az NSE (18. ábra) alapján pedig a legkevésbé pontosnak bizonyult. Ez az eredmény elsősorban az alapadatok térbeli felbontásával magyarázható, azonban egy másik befolyásoló tényező a vízszintmérők hiánya. A TMS szelvényhez tartozó vízszintmérő a lehatárolt terület középső részén helyezkedett el, ami a modellezett és a mért adatok közötti nagyobb különbséget eredményezett, tehát a nagyobb távolságban elhelyezett vízszintmérők kevésbé pontos modellezési eredményeket adnak. Minél több mérési eredmény, vízszintmérő és adat áll rendelkezésünkre, annál pontosabb modellépítésre van lehetőség.

A modellezés alátámasztotta, hogy a domborzati adatok jelentősen befolyásolják a modellek eredményeit és pontosságát, amint azt az „e” és „f” átlagos események során bekövetkező áradásokat mutató előntési térképek is bizonyítanak (15. ábra). Az „a”, „b”, „c” és „d” események alapján elmondható, hogy a TMS szakasz a legérzékenyebb terület, bár minden szakaszon vannak olyan területek, ahol az előntés térbeli előrejelzése vagy annak kiterjedése nem pontos.

Az eredményeket befolyásolta a rendelkezésre álló adatok hiánya és a rendelkezésre álló adatok felbontása. A partélek pontos lehatárolása nem volt

lehetséges a rendelkezésre álló adatokból és a modellek a teljes szakaszon, olyan helyeken is elöntést jeleztek, ahol a valóságban nem fordulhat elő a domborzati adottságok miatt. A jobb eredmények eléréséhez sokkal jobb digitális terepmodellre lenne szükség, amely az általános topográfiai jellemzőkön túlmenően a töltéseket, vízterelő objektumokat és árkokat is magában foglalja. Ez azonban nem csak a kis vízgyűjtőkre jellemző, hanem általános probléma az adatok korlátozott elérhetősége és felhasználhatósága miatt, amire Brunner és társai (2021) is rámutattak. Ennek alapján kompromisszumokat kell kötni a bemeneti adatok és a felbontás tekintetében.

A HEC-RAS modellezés azonban elfogadható eredményeket szolgáltatott a vízszint előrejelzésben és a térbeli eredmények (előre jelzett elöntött területek) árvízi helyzetek esetében. Azonban a területi és kiöntési eredmények pontatlanok voltak, csak potenciális térképet mutattak, hogy mi történne akkor, ha a gátak átszakadnának és az utak nem akadályoznák az árvizeket. Ezt az eredményt alátámasztják Tamiru és Dinka (2021) megállapításai, akik kimutatták, hogy a HEC-RAS szoftverkörnyezetben létrehozott hidrológiai modellek alkalmasak az árvízzel elöntött területek azonosítására és vizsgálatára az árvízkezelési stratégia megalkotása során. A modellek térbeli elárasztási értékei az elvárások szerint megfelelőnek bizonyultak, nagyobb elárasztás a nagy vízhozamú és tartós, több napig tartó magas vízállású területeken következett be. Ongdas és társai (2020) tanulmányában elfogadható eredményeket kaptak a modellezett árvizek nagysága és a veszélytérképek kiterjedése tekintetében. Moya Quiroga és munkatársai (2016) tanulmányukban alátámasztották, hogy árvízi események során a HEC-RAS alkalmas a víz terjedésének és időbeli változásainak modellezésére. Vizsgálatom során a HEC-RAS modellek jól teljesítettek, azonban megállapítottam, hogy a peremfeltételek pontos meghatározása kulcsfontosságú, mivel a térbeli kiterjedés esetében jelentős változásokat következhetnek be az eredményekben.

A további vizsgálatok során figyelembe kell venni egy jelentős hibátényezőt: egy esemény során a mellékvízfolyások, patakok vízhozama nagymértékben befolyásolhatja a Tarna vízhozamát.

5.7. Az időbeli változások követése a hidrológiai adatok alapján

Kutatásom során megvizsgáltam a Tarna vízgyűjtőn bekövetkezett árvizeket, figyelembe véve az Országos Vízügyi Igazgatóság által meghatározott árvízi készültségi fokozatokat. A referenciaértékek kiválasztása a hivatalos nemzeti árvízvédelmi szintekhez igazodott.

Eredményként elkészült egy általam összeállított adatbázis, amelyet további két időszakra osztottam. Ezen időszakok alapján végeztem az árvízi elemzést: 1990-2004 és 2004-2019 között.

Vízszinteket tekintve Verpeléten 11-568 cm, Tarnamérán 16-500 cm, Tarnaörsön pedig 65-564 cm között alakultak a vízállások a vizsgált időszakban. Az adatelemzés során kiderült, hogy a magas vízszintek a február – március, illetve májusi hónapokban voltak megfigyelhetőek.

Az elemzés alapján sikerült megállapítani, hogy a 2010 és 2019 közötti időszak árvízi eseményeinek száma több alkalommal meghaladta az előző 15 évben (1990-2004) tapasztalt értékeket. Tarnaörs, Tarnaméra és Verpelét esetében is szignifikáns emelkedés figyelhető meg az árvízi események számában. Az árvízi napok számát tekintve Tarnaörs 1990-2004 közötti időszakban 126 árvízi napot rögzítettek, azonban Tarnaörsön a 2004-2019 időszakban ez a szám 355-re emelkedett. Ugyanakkor Tarnaméra és Verpelét esetében csökkenő tendencia figyelhető meg. Ezek az eredmények arra engednek következtetni, hogy bár az árvízi események számának gyakorisága nőtt, az időtartamuk lerövidült, amely valószínűsíthetően a csapadék intenzitásának növekedésével magyarázható, mivel az nem biztosít tartós vízutánpótlást az árvizek számára. A magasabban fekvő területekről érkező víz gyorsabban éri el a vízgyűjtő alsó szakaszát, ahol a domborzati viszonyok hatására az árhullám lelassul és ellaposodik.

6. táblázat. Az árvízi események száma (db) 1990–2004 és 2004–2019 közötti időszakokban Tarnaörs, Tarnaméra és Verpelét területén

Árvizek	Időszak	Tarnaörs	Tarnaméra	Verpelét
Árvízi események száma	1990-2004	23	31	6
	2004-2019	53	46	12
Napok száma	1990-2004	126	130	15
	2004-2019	355	125	19
Az árvízi napok átlagos száma	1990-2004	5,48	4,19	2,50
	2004-2019	6,70	2,72	1,58

6. Összefoglalás

A klímaváltozás hatására bekövetkező átalakulások a vízciklus, az éghajlati anomáliák gyakoriságának és a vízgyűjtők változásában is megmutatkoznak. A Kárpát-medencében tapasztalható szélsőséges időjárási viszonyok hatást gyakorolnak a természeti, gazdasági, politikai és társadalmi környezetre. Területspecifikusan, kisebb vízgyűjtőre gyakorolt hatások és változások esetében is jelentős változások figyelhetők meg.

Kutatásom során átfogóbb nézőpontból közelítettem meg a klímaváltozás kérdéskörét, azonban a téma egyre szélesebb körű megismerése során a vízgyűjtő szintű vizsgálatok is egyre nagyobb hangsúlyt kaptak. Célul tűztem ki a hőmérsékleti, párolgási és csapadéktendenciák hatásának vizsgálatát a Kárpát-medence területén és az érzékeny területek meghatározását. A CarpatClim adatok elemzését követően kirajzolódott, hogy érzékeny területnek tekinthető a csapadék és a potenciális evapotranspiráció tekintetében Magyarország északi és északnyugati területe, amely további vizsgálatokat indított el. Ennek következtében további célom volt vízgyűjtő szinten is vizsgálatokat végezni, amelynek során a Tarna vízgyűjtő csapadékadatainak az időbeli és térbeli változásait elemeztem. A csapadékadatok elemzése, a szakirodalmak olvasása és a tapasztalatok alapján elmondható, hogy a Tarna vízgyűjtője árvízi eseményekkel érintett területnek tekinthető. Ez a megállapítás tovább erősítette a mintaterület kiválasztásának megalapozottságát.

Az árvízi események modellezése nagy segítséget nyújthat az árvízi eseményekre való felkészülésben. Dolgozatom további meghatározó részét képezi a hidrológiai és hidrodinamikai modellezés, amely kisvízfolyás árvízi eseményeinek vizsgálatára irányul adathiányos környezetben. Emellett a modellek hatékonyságát és pontosságát is vizsgáltam az árvízi események időtartama és nagysága tekintetében.

A klímaváltozás regionális vizsgálata során a CarpatClim adatbázist felhasználva végeztem el az idősorok részletes elemzését, megközelítően 500 000 km²-en. Célom volt, hogy az éghajlati tendenciákat részletes térbeli elemzés során vizsgáljam.

Kimutattam, hogy a havi átlaghőmérséklet, a maximális hőmérséklet és a párolgás pozitív tendenciát mutatott, kivéve az őszt; a csapadék nem követte ezt a mintát, télen negatív tendencia volt megfigyelhető. A csapadék és az evapotranspiráció változásának intenzitása a maximális és az

átlaghőmérsékletéhez viszonyítva egy nagyságrenddel nagyobb volt. A térbeli tendencia nyugatról kelet felé alakult, de a Kárpátok elhelyezkedése jelentős hatást gyakorolt, így ennek hatására megváltoztatták a növekvő értékeket. Északról déli irányba tartó területi tendencia volt megfigyelhető, és a Déli-Kárpátok hegységei is jelentős hatást gyakoroltak a vizsgált terület legdélebbi régiójában. Az irányok (pontosabban a kelet-nyugati és az észak-déli irányok) között szignifikáns statisztikai kölcsönhatás mutatkozott. A felső kvartilisek (a csapadék esetében az alsó kvartilis) küszöbértékként való kijelölése segített a változó éghajlat által leginkább érintett régiók azonosításában. Az éghajlati változók összegzésével beazonosítottuk azokat a régiókat, ahol a küszöbértéket több éghajlati változó is meghaladta.

Eredményként elmondható, hogy Magyarország nyugati része és Horvátország keleti része a legérzékenyebb régiók az előre jelzett éghajlati változások alapján. A legnagyobb változások azokban a régiókban várhatók, ahol az éghajlat jelenleg hűvösebb, ott várható nagyobb felmelegedés.

Vízgyűjtő szinten további klímatisztikus vizsgálatokat végeztem, amely során az E-OBS adatok felhasználva a Tarna vízgyűjtő csapadékviszonyainak változását vizsgáltam két időszakban (1960–1989 és 1990–2020). Az eredmények szerint a csapadékos napok száma a második időszakban jelentősen emelkedett, egyes magasabban fekvő területeken elérve a 83 napot. A 20 mm-t meghaladó napi csapadékesemények gyakorisága több térségben megduplázódott, míg a 30 és 40 mm feletti értékek ritkán fordultak elő, főként 650–1050 m közötti magasságokban. A nagy intenzitású csapadékesemények elsősorban a magasabb dombvidéki területeken koncentrálódnak, ami befolyásolhatja a talajeróziót, a lefolyási viszonyokat és a talajnedvességet. Összességében szignifikáns növekedés tapasztalható a csapadékos napok számában és intenzitásában a vizsgált időszakok között.

A Tarna vízgyűjtőjén végzett vizsgálatok rendszerszemléletet követelnek meg, amely több tényező együttes hatását vizsgálja és az eddigi bekövetkezett árvízi eseményeket veszi alapul. A vizsgálat folytatásaként hidrológiai modellezést végeztem.

A kutatás során bebizonyítottam, hogy adathiányos környezetben és kevés mért adat rendelkezésre állása esetén is van lehetőség viszonylag pontos, eseményalapú hidrológiai modellezésre és előrejelzésre. Igaz, minden esemény más lefolyású, mert sok változó tényező befolyásolja, azonban a modellek jó eredményeket hoztak statisztikai mutatók alapján. A kis vízfolyások még mindig nehézséget jelentenek az árvízi modellezés területén. Viszont minél több kisebb folyóról készülő tanulmány szolgáltat

tapasztalatot, amelyek rávilágíthatnak arra, hogy a későbbiekben milyen nehézségek adódhatnak, illetve mire érdemes különösen figyelni az előkészítés, felmérés és modellezés során.

A Tarna vízgyűjtőjének három területre osztott modelleredményei alapján elmondható, hogy a vízszinteket és a térbeli elöntés eredményeit együttesen kell kezelni és értelmezni, mivel domborzati adatok részletességéből adódhatnak hibák, de a modellek így is jó viszonyítási alapot adnak a további vizsgálatokhoz.

A vizsgálatot nagyban korlátozta az adathiányos környezet, nagy felbontású domborzatmodell elérhetőségének és a mérőállomások hiánya, a meglévő mérőállomások egymástól nagy távolságra történő elhelyezkedése. A modellek paraméterezésénél a legnagyobb problémát a partvonalak pontos meghatározása jelentette. Ezeknek a hibáknak a kiküszöbölésére, részletesebb domborzatmodellre, mederadatakra és mérőállomásokra volna szükség.

A területi elöntés eredményei, a felső szakasz (VS), a középső szakasz (TMS), az alsó szakasz (TOS) modellezése során a legnagyobb kiterjedés a TMS területen volt megfigyelhető, ezt követte a VS szakasz, és a legkisebb elöntés a TOS területen volt megfigyelhető.

Az elöntési modellek adatai alapján hasonló tendenciák figyelhetők meg a modellezett és a megfigyelt vízszintekre vonatkozóan a teljes szakaszon. Az eredmények azt mutatták, hogy a VS, TMS és TOS szakaszok eredményei nem mutattak kiemelkedően jobb teljesítményt, mint a C terület eredményei. Így a kisebb területek szegmentálása nem minden esetben nyújt következetesen jobb eredményeket. A három területre osztott modell eredményei alapján fontosnak tartom megjegyezni, hogy a vízszintek és a térbeli elöntések együttes értelmezését kell előtérbe helyezni a jövőbeli eseményalapú modellezés során, hogy átfogó képet alkothassunk a kialakult jelenségről. Fontos része, hogy minimalizálni tudjuk az esetleges modellhibák mértékét.

A hidrológiai modellek statisztikai eredményei alapján elmondható, hogy a Taylor-diagram eredményei szerint a „b” esemény értékei minden területen kiemelkedő teljesítményt mutatott, ezt a „d”, „a” és „c” események követték, amelyek szintén hasonlóan jó eredményeket adtak. Az eredmények azt igazolják, hogy a leghosszabb időtartamú és legmagasabb vízállású események esetén teljesített legjobban a modell, mivel a „b” eseményt a leghosszabb időtartam és a legmagasabb vízszint jellemezte.

Az NRMSE pontossági mérőszámok megerősítik, hogy a nagyobb árvízi események modelljei általában jól teljesítettek. A Kling Gupta hatékonyság (KGE) statisztikai metrika értékei -2,67 és 0,95 között mozogtak, a 24 modelltől 18 modell megközelítőleg 1 értéket ért el. Az „átlagos” események jellemzően rosszul teljesítettek, vagyis a statisztikai mérőszámok szerint gyenge illeszkedést mutattak.

Bár a modelfuttatások megközelítő pontosságú eredményeket mutattak az eseményalapú modellezésben, az adatokkal korlátozott környezetben a hasonló modellek segíthetnek a víz terjedésének mérséklésében a potenciális árvízi események során, és megkönnyíthetik a szakemberek és döntéshozók számára a hatékonyabb intézkedések mihamarabbi elrendelésének folyamatát.

A kutatás innovatív előrelépést jelent területspecifikus szinten, mivel a Tarna vízgyűjtőjére ilyen nézőpontból nem készült hasonló munka. Ugyanakkor nemzetközi viszonylatban is tartalmaz innovatív eredményeket, mivel az eredményeim igazolják, hogy a HEC-RAS modellek alkalmasak adathiányos környezetben, kis vízfolyások modellezésére is, változó terepviszonyok mellett. A kutatás folyamata lehetséges forgatókönyvként szolgálhat hasonló adathiányos környezetben, hasonlóan változatos terepviszonyok mellett történő árvízi katasztrófák modellezése és előrejelzése során.

Jövőbeli kutatási lehetőségként javaslom a folyó partvonalának részletes geodéziai felmérését, a parti sáv pontos meghatározását és a Tarna folyóba torkolló patakok paraméterezését, vízhozamának megállapítását. Ezek az adatok lehetővé teszik egy komplex hidrológiai modell felépítését, amely a jelenlegi kutatással összehasonlítva további felmerülő kérdésekre adhat választ. A vizsgálat emellett megfelelő alapot biztosíthat a fotogrammetriai felmérésekből származó adatok értékeléséhez és összehasonlításához.

7. Summary

The transformations induced by climate change are reflected in alterations to the water cycle, the frequency of climatic anomalies, and changes within catchment areas. The extreme weather conditions experienced in the Carpathian Basin exert an impact on the natural, economic, political, and social environment. On a site-specific scale, significant changes can also be observed in the impacts and alterations affecting smaller catchments.

During my research, I approached the issue of climate change from a comprehensive perspective; however, as my understanding of the topic broadened, catchment-scale studies gained increasing emphasis. My objective was to examine the impacts of temperature, evaporation, and precipitation trends across the Carpathian Basin and to identify sensitive areas. Following the analysis of CarpatClim data, it became evident that northern and northwestern regions of Hungary are sensitive with respect to precipitation and potential evapotranspiration, which prompted further investigations. Consequently, I aimed to conduct catchment-level analyses, focusing on the temporal and spatial variations of precipitation data within the Tarna catchment. Based on the precipitation data analysis, literature review, and accumulated experience, the Tarna catchment can be considered a region prone to flood events. This finding further substantiated the soundness of the chosen study area.

Modeling flood events can provide significant support for flood preparedness. A key component of my thesis involves hydrological and hydrodynamic modeling focused on flood events in small watercourses, particularly in data-scarce environments. Additionally, I examined the effectiveness and accuracy of the models concerning the duration and magnitude of flood events.

Regarding the regional study of climate change, I conducted a detailed time series analysis using the CarpatClim database, covering approximately 500,000 km². My aim was to examine climatic trends through a comprehensive spatial analysis.

I demonstrated that the monthly average temperature, maximum temperature, and evaporation exhibited positive trends, except in autumn; precipitation did not follow this pattern, showing a negative trend in winter. The intensity of changes in precipitation and evapotranspiration was an order of magnitude greater compared to maximum and average temperatures. The

spatial trend progressed from west to east, but the location of the Carpathians had a significant influence, altering the increasing values accordingly. A north-to-south spatial trend was also observed, with the Southern Carpathians exerting a notable impact on the southernmost region of the study area. Significant statistical interactions were found between the directions (more precisely, the east-west and north-south axes). The designation of upper quartiles (and lower quartiles for precipitation) as threshold values facilitated the identification of regions most affected by the changing climate. By aggregating the climatic variables, we identified areas where the thresholds were exceeded by multiple climate variables.

As a result, it can be stated that the western part of Hungary and the eastern part of Croatia are the most sensitive regions based on the projected climate changes. The greatest changes are expected in regions where the current climate is cooler, as these areas are likely to experience more significant warming.

At the catchment scale, I conducted further climatic analyses using E-OBS data to examine changes in precipitation patterns within the Tarna catchment over two periods (1960–1989 and 1990–2020). The results indicate a significant increase in the number of rainy days during the latter period, reaching up to 83 days in some higher-elevation areas. The frequency of daily precipitation events exceeding 20 mm doubled in several regions, while occurrences of precipitation above 30 and 40 mm remained rare, primarily between elevations of 650–1050 meters. High-intensity precipitation events were mainly concentrated in the higher hilly areas, potentially impacting soil erosion, runoff conditions, and soil moisture. Overall, a significant increase was observed in both the number and intensity of rainy days between the studied periods.

Studies conducted on the Tarna catchment require a systems approach that examines the combined effects of multiple factors and is based on previously occurred flood events. As a continuation of this investigation, I carried out hydrological modeling.

Regarding the research, I demonstrated that even in data-scarce environments with limited measured data, it is possible to perform relatively accurate event-based hydrological modeling and forecasting. Although each event has a unique runoff pattern influenced by numerous variable factors, the models produced good results based on statistical indicators. Small watercourses continue to pose challenges in flood modeling. However, the

accumulation of studies on smaller rivers can provide valuable experience, highlighting potential difficulties and areas requiring special attention during preparation, surveying, and modeling phases.

Based on the modeling results dividing the Tarna catchment into three subareas, it can be concluded that water levels and spatial flood extents must be considered and interpreted together, as errors may arise from the level of detail in topographic data. Nevertheless, the models still provide a reliable reference basis for further investigations.

The study was significantly limited by the data-scarce environment, the lack of high-resolution digital elevation models, and the absence of measuring stations, with the existing stations being widely spaced. The most challenging aspect during model parameterization was the precise delineation of shorelines. To eliminate these errors, more detailed elevation models, channel data, and additional measuring stations are required.

Regarding the spatial flood extent results from modeling the upper section (VS), middle section (TMS), and lower section (TOS) of the catchment, the largest extent was observed in the TMS area, followed by the VS section, with the smallest flooding occurring in the TOS area.

Based on the flood extent model data, similar trends were observed between the modeled and observed water levels across the entire stretch. The results showed that the performances of the VS, TMS, and TOS sections were not noticeably better than those of the C area. Therefore, segmenting into smaller subareas does not consistently yield better results. From the modeling outcomes divided into three regions, it is important to emphasize that the combined interpretation of water levels and spatial flood extents should be prioritized in future event-based modeling to provide a comprehensive understanding of the phenomena. Minimizing potential model errors is also a crucial aspect.

Based on the statistical results of the hydrological models, the Taylor diagram indicates that event “b” demonstrated outstanding performance across all areas, followed by events “d,” “a,” and “c,” which also yielded similarly good results. These findings confirm that the model performed best during the longest duration and highest water level events, as event “b” was characterized by the longest duration and the highest water level.

The NRMSE accuracy metrics confirm that models of larger flood events generally performed well. The Kling-Gupta Efficiency (KGE) values ranged between -2.67 and 0.95, with 18 out of 24 models achieving values

close to 1. “Average” events typically performed poorly, showing weak fit according to the statistical metrics.

Although the model runs produced reasonably accurate results in event-based modeling, in data-limited environments, similar models can aid in mitigating water spread during potential flood events and facilitate faster decision-making for professionals and policymakers to implement effective measures.

The research represents an innovative advancement at a site-specific level, as no similar study has been conducted from this perspective on the Tarna watershed. Moreover, it contains innovative findings on an international scale, demonstrating that HEC-RAS models are suitable for modeling small watercourses in data-scarce environments with variable terrain conditions. The research process can serve as a potential scenario for flood disaster modeling and forecasting in similarly data-limited settings with comparable diverse terrain characteristics.

As a future research opportunity, I recommend conducting a detailed geodetic survey of the riverbank, precise delineation of the riparian zone, and parameterization and discharge measurement of the tributary streams flowing into the Tarna River. These data would enable the development of a complex hydrological model, which, compared to the current research, could address additional emerging questions. Furthermore, the study could provide a solid foundation for the evaluation and comparison of data derived from photogrammetric surveys.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni témavezetőmnek Dr. Szabó Szilárdnak, aki a doktori kutatásom során segítette munkámat, támogatott, értékes szakmai tanácsaival és biztatásával hozzájárult a dolgozat elkészüléséhez.

Köszönöm az értekezés bírálóinak, Dr. Négyesi Gábornak és Dr. Búró Botondnak, hogy szakmai észrevételeikkel, építő jellegű kritikájukkal hozzájárultak dolgozatom elkészüléséhez az előzetes vita során.

Köszönöm az Országos Vízügyi Igazgatóság és az ÉMVIZIG adatszolgáltatását.

Külön szeretném megköszönni Dr. Lóki József tanár úr odaadó szakmai támogatását és biztatását, amelyet doktori kutatásom során tanúsított.

Köszönöm a Természetföldrajzi és Geoinformatikai Tanszék munkatársainak és PhD társaimnak a szakmai visszajelzéseket, az inspiráló és biztató beszélgetéseket. Köszönöm a közös munka lehetőségét.

Külön köszönettel tartozom Nagy Bálintnak, aki Python script megírásával, hosszas szakmai beszélgetésekkel és baráti biztatásával támogatta munkámat.

Köszönöm Abriha-Molnár Vandának, Abriha Dávidnak, Szabó Lorándnak, Schlosser Alettának, Czomba Péternek, Juhász Bencének, Nagy-Pataki Angelikának és Nagy Lorándnak, hogy mindig fordulhattam hozzájuk kérdéseimmel és segítséget nyújtottak, ha szükségem volt rá.

Szeretném megköszönni a TIVIZIG munkatársainak támogatását, legfőképpen Zsuga Antal osztályvezetőnek, akinek támogatására mindig számíthattam, kollégáimnak, Asztalos Gábornak, Fróna Tamásnak, Deák Gyulának és Hadas Milánnak biztató támogatását. Külön szeretném megköszönni Tillingerné Csige Zsuzsannának biztatását, gondoskodását és segítségét, amiért mindig hálás leszek.

Hálásan köszönöm Dr. Czellez Boglárkának a szakmai támogatást, a baráti beszélgetéseket és azt, hogy mindig számíthattam rá.

Szeretném megköszönni Dr. Bertalanné Dr. Balázs Boglárkának, Dr. Bertalan Lászlónak, Dr. Lázár Istvánnak és Dr. Szalkai Gábornak baráti, szakmai, kutatói kérdések megválaszolásában mindig számíthattam rájuk.

Hálával és köszönettel tartozom szüleimnek, nagyszüleimnek és rokonaimnak türelmükért, biztatásukért és folyamatos támogatásukért a

doktori képzés alatt. Hálásan köszönöm testvéremnek, Edinának a biztatást, támogatást és azt, hogy minden helyzetben mellettem állt.

Hálával tartozom a sok biztatásért Szopos nagymamának és nagytatának, akik már nem lehetnek velünk.

Köszönöm Zoltánnak, barátaimnak és mindazoknak, akik a doktori képzés során türelmesek voltak hozzám, kitartóan biztattak, és mellettem álltak a nehéz pillanatokban is.

A kutatást a TKP2021-NKTA-32 projekt támogatta. A kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával valósult meg.

8. Irodalomjegyzék

Agrárminisztérium (2019): Ökoszisztéma-alaptérkép és adatmodell kialakítása. DOI:10.34811/osz.alapterkep.dokumentum

Alfieri, L., Cohen, S., Galantowicz, J., Schumann, G.J.-P., Trigg, M.A., Zsoter, E., Prudhomme, C., Kruczkiewicz, A., Coughlan De Perez, E., Flamig, Z., Rudari, R., Wu, H., Adler, R.F., Brakenridge, R.G., Kettner, A., Weerts, A., Matgen, P., Islam, S.A.K.M., De Groeve, T., Salamon, P. (2018): A global network for operational flood risk reduction. *Environmental Science & Policy* 84, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.03.014>

Ali, A., Rasheed, A., Siddiqui, A. A., Naseer, M., Wasim, S., Akhtar, W. (2015): Non-Parametric Test for Ordered Medians: The Jonckheere Terpstra Test; *International Journal of Statistics in Medical Research* 4. 203-207.

Antolovic, I., Mihajlović, V., Rancic, D., Mihić, D., Djurdjević, V., (2013): Digital Climate Atlas of the Carpathian Region. *Advances in Science and Research* 10, 107–111. <https://doi.org/10.5194/asr-10-107-2013>

Aredo, M. R., Hatiye, S. D., Pingale, S. M. (2021): Impact of land use/land cover change on stream flow in the Shaya catchment of Ethiopia using the MIKE SHE model. *Arabian Journal of Geo-sciences*, 14, 114. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06447-2>

Bachri, S., Aldianto, Y., Sumarmi, S., Utomo, K., Fathoni, M. (2021): Flood modelling of Badeng River using HEC-RAS in Singojuruh sub district, Banyuwangi regency, East Java, Indonesia. *Jurnal Geografi* 13, 76. <https://doi.org/10.24114/jg.v13i1.19211>

Barnes, H. H. Jr. (1967): Roughness Characteristics of Natural Channels, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849, United States Government Printing Office, Washington.

Bartholy, J., Pongrácz, R. (2007): Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. *Global and Planetary Change, Extreme Climatic Events* 57, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.002>

Bartholy, J., Pongracz, R., Kis, A. (2015): Projected changes of extreme precipitation using multi-model approach. *Időjárás*. Budapest, 119, 129-142.

Berényi A., Pongrácz R., Bartholy J. (2021): Csapadékszélsőségek változása Európa déli alföldi régióiban az 1951–2019 időszakban. *MG* 16, 85–101. <https://doi.org/10.15170/MG.2021.16.04.05>

Bernhofen, M.V., Cooper, S., Trigg, M., Mdee, A., Carr, A., Bhave, A., Solano-Correa, Y.T., Pencue- Fierro, E.L., Teferi, E., Haile, A.T., Yusop, Z., Alias, N.E., Sa’adi, Z., Bin Ramzan, M.A., Dhanya, C.T., Shukla, P. (2022): The Role of Global Data Sets for Riverine Flood Risk Management at National Scales. *Water Resources Research* 58, e2021WR031555. <https://doi.org/10.1029/2021WR031555>

Bihari, Z., Babolcsai, GY., Bartholy, J., Ferenczi, Z., Gerhátné Kerényi, J., Haszpra, L., Homokiné Ujváry, K., Kovács, T., Lakatos, M., Németh, Á., Pongrácz, R., Putsay, M., Szabó, P., Szépszó, G. (2018): Éghajlat. In *Magyarország nemzeti atlasza: természeti környezet*. Ed.: Kocsis, K., Budapest, MTA CSFK Földrajztudományi Intézet. 58-69.

Bilalova, S., Newig, J., Tremblay-Lévesque, L.-C., Roux, J., Herron, C., Crane, S., (2023): Pathways to water sustainability? A global study assessing the benefits of integrated water resources management. *Journal of Environmental Management* 343, 118179. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118179>

Blanka, V., Mezősi, G., Meyer, B. (2013): Projected changes in the drought hazard in Hungary due to climate change; *Időjárás* 117: 219-237.

Blanka-Végi, V., Tobak, Z., Kajári, B., Sipos, Gy., Barta K., Kovács, F., Boudewijn, V. L., (2024): Gépi tanulási módszerek az aszály és belvíz monitoring és előrejelzés fejlesztésében, *Földrajzi Közlemények* 2024. 148. 2. pp. 175–181.

Borsy, Z. (szerk.) (1995): *Általános természetföldrajz*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.

Brunner, M.I., Slater, L., Tallaksen, L.M., Clark, M. (2021): Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review. *WIREs Water* 8, e1520. <https://doi.org/10.1002/wat2.1520>

Bulti, D.T., Abebe, B.G. (2020): A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application. *Model. Earth Syst. Environ.* 6, 1293–1302. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00803-z>

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P.W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W.W.L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., Jotzo, F., Krug, T., Lasco, R., Lee, Y.-Y., Masson-Delmotte, V., Meinshausen, M., Mintenbeck, K., Mokssit, A., Otto, F.E.L., Pathak, M., Pirani, A., Poloczanska, E., Pörtner, H.-O., Revi, A., Roberts, D.C., Roy, J., Ruane, A.C., Skea, J., Shukla, P.R., Slade, R., Slangen, A., Sokona, Y., Sörensson, A.A., Tignor, M., Van Vuuren, D., Wei, Y.-M., Winkler, H., Zhai, P., Zommers, Z., Hourcade, J.-C., Johnson, F.X., Pachauri, S., Simpson, N.P., Singh, C., Thomas, A., Totin, E., Arias, P., Bustamante, M., Elgizouli, I., Flato, G., Howden, M., Méndez-Vallejo, C., Pereira, J.J., Pichs-Madruga, R., Rose, S.K., Saheb, Y., Sánchez Rodríguez, R., Ürge-Vorsatz, D., Xiao, C., Yassaa, N., Alegría, A., Armour, K., Bednar-Friedl, B., Blok, K., Cissé, G., Dentener, F., Eriksen, S., Fischer, E., Garner, G., Guivarch, C., Haasnoot, M., Hansen, G., Hauser, M., Hawkins, E., Hermans, T., Kopp, R., Leprince-Ringuet, N., Lewis, J., Ley, D., Ludden, C., Niamir, L., Nicholls, Z., Some, S., Szopa, S., Trewin, B., Van Der Wijst, K.-I., Winter, G., Witting, M., Birt, A., Ha, M., Romero, J., Kim, J., Haites, E.F., Jung, Y., Stavins, R., Birt, A., Ha, M., Orendain, D.J.A., Ignon, L., Park, S., Park, Y., Reisinger, A., Cammaramo, D., Fischlin, A., Fuglestvedt, J.S., Hansen, G., Ludden, C., Masson-Delmotte, V., Matthews, J.B.R., Mintenbeck, K., Pirani, A., Poloczanska, E., Leprince-Ringuet, N., Péan, C., 2023. IPCC, 2023: Climate Change (2023): Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

CARPATCLIM. (2017): Climate of the Carpathian Region. <https://www.carpatclim-eu.org/>

Chen, X., Chen, L., Stone, M. C., Acharya, K. (2020): Assessing connectivity between the river channel and floodplains during high flows using

hydrodynamic modeling and particle tracking analysis. *Journal Hydrology*, 583, 124609. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124609>

Chow, V. T. (1959): *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill.

Cifuentes-Faura, J., (2022): European Union policies and their role in combating climate change over the years. *Air Qual Atmos Health* 15, 1333-1340. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01156-5>

Collins, M., Sutherland, M., Bouwer, L., Cheong, S.-M., Frölicher, T., Combes, H., Koll, R., Losada, I., McInnes, K., Ratter, B., Rivera, E., Susanto, R., Swingedouw, D., Tibig, L. (2019): *IPCC SROCC— Extremes, Abrupt Changes and Managing Risks*.

Copernicus Climate Change Service (C3S) (2024): *European State of the Climate 2023*. <https://doi.org/10.24381/bs9v-8c66>

Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store, (2020): *E-OBS daily gridded meteorological data for Europe from 1950 to present derived from in-situ observations*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.151d3ec6

Cornes, R.C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E.J.M., Jones, P.D. (2018): *An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123, 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>

Czigány, S., Pirkhoffer, E., Lóczy, D., Balatonyi, L. (2013): *Flash Flood Analysis for Southwest-Hungary*, in: *Geomorphological Impacts of Extreme Weather: Case Studies From Central and Eastern Europe*. pp. 67–82. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6301-2_5

Csermák, B. (1985): *Hegy- és dombvidéki vízrendezés hidrológiai kérdései*. VMGT 157. Vízgazdálkodási Intézet, Budapest.

Csoma, J., Szigyártó, Z. (1969): *Folyók vízjárásának statisztikai jellemzése*. *Hidrológiai Közlöny* Budapest.

Csoma, J., Szigyártó, Z. (1975): *A matematikai statisztika alkalmazása a hidrológiában*. Budapest.

Deák, B., Valkó, O., Török, P., Végvári, ZS., Hartel, T., Schmotzer, A., Kapocsi, I. and Tóthmérész, B. (2014): Grassland fires in Hungary – experiences of nature conservationists on the effects of fire on biodiversity; *Applied Ecology and Environmental Research* 12: 267-283. doi:10.15666/aeer/1201_267283

Dottori, F., Salamon, P., Bianchi, A., Alfieri, L., Hirpa, F.A., Feyen, L. (2016): Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping. *Advances in Water Resources* 94, 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.002>

Dövényi, Z. (szerk.) (2012): A Kárpát-medence földrajza. Akadémiai Kiadó Zrt. Budapest.

European Environment Agency (EEA) (2018): CORINE Land Cover (CLC), Version 2020_20u1, European Environment Agency.

Efron, B., Tibshirani, R. (1993): *An Introduction to the Bootstrap*. London, Chapman & Hall/CRC. ISBN 0-412-04231-2.

Ehtasham, L., Sherani, S.H., Nawaz, F., (2024): Acceleration of the hydrological cycle and its impact on water availability over land: an adverse effect of climate change. *Meteorol. Hydrol. Water Manage.* 12, 1-21. <https://doi.org/10.26491/mhwm/188920>

Eilander, D., Couasnon, A., Leijnse, T., Ikeuchi, H., Yamazaki, D., Muis, S., Dullaart, J., Haag, A., Winsemius, H.C., Ward, P.J. (2023): A globally applicable framework for compound flood hazard modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 23, 823–846. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-823-2023>

European Parliament (EP) (2023): EU measures against climate change <https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vkqp9dzgriys?ctx=vg9hjllgxmz> (2025. 05.15).

Faragó, T. (2016): A párizsi klímátárgyalások eredményei. (Outcomes of the climate negotiations in Paris). *MAGYAR ENERGETIKA*, 1. 8-12.

Faragó, T. (2018): A nemzetközi környezet- és klímapolitikai együttműködés. In: Felkészülés és alkalmazkodás. Mérsékelt öv? Felelős cselekvési irányok a hatékony klímavédelemért, Budapest, 5-19.

Farkas Csamangó E. (2022): A klímaváltozás negatív hatásai Magyarországon, cselekvési tervek. A klímaváltozás hatásaiból eredő kihívások. Szerk.: Sziebig Orsolya Johanna, Tóth Zoltán Balázs, Külügyi Műhely Alapítvány, Budapest. Pécs. 79-92.

Divinszki F., Kis A., Pongrácz R., (2024): Hőmérsékleti extrémumok Európában várható alakulásának elemzése az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület Interaktív Atlasza alapján. LÉGKÖR: AZ ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI INTÉZET SZAKMAI TÁJÉKOZTATÓJA, 69 (1). pp. 25-32. ISSN 0133-3666

Ferrari, E., Coscarelli, R., Sirangelo, B. (2018): Correlation Analysis of Seasonal Temperature and Precipitation in a Region of Southern Italy; Geosciences 8: 160. doi:10.3390/geosciences8050160

Field, A., Miles, J., Field, Z. (2012): Discovering statistics using R. SAGE, Los Angeles-London-New Delhi-Singapore, Washington DC, ISBN 978-1-4462-0045-2

García-Alén, G., González-Cao, J., Fernández-Nóvoa, D., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Puertas, J. (2022): Analysis of two sources of variability of basin outflow hydrographs computed with the 2D shallow water model Iber: Digital Terrain Model and unstructured mesh size. Journal of Hydrology 612, 128182. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128182>

Garamhegyi, T., Kovács, J., Pongrácz, R., Tanos, P., Hatvani, I. G. (2018): Investigation of the climate-driven periodicity of shallow groundwater level fluctuations in a Central-Eastern European agricultural region; Hydrogeology Journal 26. (3):677–688.

Gashi, N., Czigány, S., Pirkhoffer, E., Kiss, K. (2023): Modelling the impact of climate change on the flow regime and channelplanform evolution of the lower Drava River. Modern Geográfia,18(2), 47–76.

Gábris, Gy. (2011): A Zagyva-Tarna alföldi vízrendszerének kialakulása és fejlődése, Földrajzi Közlemények, 135. 3. pp. 205-217.

Gábris, Gy. (2022): A folyóvíz felszínalakító tevékenysége Magyarországon; ELTE; Budapest.

Gebrechorkos, S., Leyland, J., Slater, L., Wortmann, M., Ashworth, P.J., Bennett, G.L., Boothroyd, R., Cloke, H., Delorme, P., Griffith, H., Hardy, R., Hawker, L., McLelland, S., Neal, J., Nicholas, A., Tatem, A.J., Vahidi, E., Parsons, D.R., Darby, S.E., (2023): A high-resolution daily global dataset of statistically downscaled CMIP6 models for climate impact analyses. *Sci Data* 10, 611. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02528-x>

Gregersen, T., Doran, R., Böhm, G., Poortinga, W., (2021) Outcome expectancies moderate the association between worry about climate change and personal energy-saving behaviors. *PLOS ONE* 16, e0252105. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252105>

Göndöcs, J., Breuer, H., Pongrácz, R., Bartholy, J. (2018): Projected changes in heat wave characteristics in the Carpathian Basin comparing different definitions; *International Journal of Global Warming* 16. (2). doi: 10.1504/IJGW.2018.094552

Gubler, S., Fukutome, S., Scherrer, S.C., (2023): On the statistical distribution of temperature and the classification of extreme events considering season and climate change an application in Switzerland. *Theor Appl Climatol* 153, 1273-1291. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04530-0>

Gulácsi, A., Kovács, F. (2018): Drought monitoring of forest vegetation using MODIS-based normalized difference drought index in Hungary; *Hungarian Geographical Bulletin* 67. (1): 29-42. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.67.1.3>

Gupta, H., Kling, H., Yilmaz, K., Martinez, G., (2009): Decomposition of the Mean Squared Error and NSE Performance Criteria: Implications for Improving Hydrological Modelling. *Journal of Hydrology* 377, 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>

Hadnagy, I. (2022): Éghajlati sajátosságok. Szerk.: Molnár József és Papp Géza, A Kárpát-medence földrajza. Természet, társadalom, gazdaság, néprajz. Budapest-Beregszász.

Hagemann, S., Chen, C., Clark, D.B., Folwell, S., Gosling, S.N., Haddeland, I., Hanasaki, N., Heinke, J., Ludwig, F., Voss, F., Wiltshire, A.J., (2013): Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models. *Earth System Dynamics* 4, 129–144. <https://doi.org/10.5194/esd-4-129-2013>

Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., del Rio, J. F., Wiebe, M., Peterson, P., Gérard-Marchant, P., Sheppard, K., Reddy, T., Weckesser, W., Abbasi, H., Gohlke, C., Oliphant, T. E. (2020): Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357–362.

Hayashi, A., Akimoto, K., Sano, F., Mori, S., Tomoda, T., (2010): Evaluation of global warming impacts for different levels of stabilization as a step toward determination of the longterm stabilization target. *Climatic Change* 98, 87-112. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9663-6>

Helfer, F., Lemckert, C., Zhang, H. (2012): Impacts of climate change on temperature and evaporation from a large reservoir in Australia; *Journal of Hydrology* 475. 365-378. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.10.008

Hellmann, J. J., Byers, J.E., Bierwagen, B. G., Dukes, J. S. (2008): Five potential consequences of climate change for invasive species; *Conservation Biology* 22. (3): 534-543. doi: 10.1111/j.1523-1739.2008.00951.x

Hidalgo-Crespo, J., Coello-Pisco, S., Reyes-Venegas, H., Bermeo-Garay, M., Amaya, J.L., Soto, M., Hidalgo-Crespo, A., (2022): Understanding citizens' environmental concern and their proenvironmental behaviours and attitudes and their influence on energy use. *Energy Reports*, The 8th International Conference on Energy and Environment Research - “Developing the World in 2021 with Clean and Safe Energy” 8, 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.116>

Hufnagel, L., Cs, S., Drégelyi-Kiss, Á., E, F., Turei, D., Gergocs, V., Petrányi, G., A, B., Gimesi, L., B, E., L, D., Horváth, L. (2008): Klímaváltozás, biodiverzitás és közösségökölógiai folyamatok (8.fejezet). 227–264.

Illés, L., Konyecsny, K., Kovács, S., Szlávik, L. (2003): Az 1998. novemberi árhullám hidrológiája. *Vízügyi Közl. Különszáma I.* 47-77.

Iorio J.P, Duffy, P., Govindasamy, B., Thompson, S., Randall, D., (2004): Effect of model resolution and subgrif scale physics on the simulation of precipitation in the continental United States. *Climate Dynamics* 23, 243-258. <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0440-y>

IPCC (2022): *Climate Change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems.* <https://doi.org/10.1017/9781009157988>

Iturbide, M., Gutiérrez, J.M., Alves, L.M., Bedia, J., Cerezo-Mota, R., Gimenez, E., Cofiño, A.S., Di Luca, A., Faria, S.H., Gorodetskaya, I.V., Hauser, M., Herrera, S., Hennessy, K., Hewitt, H.T., Jones, R.G., Krakovska, S., Manzanás, R., Martínez-Castro, D., Narisma, G.T., Nurhati, I.S., Pinto, I., Seneviratne, S.I., van den Hurk, B., Vera, C.S., (2020): An update of IPCC climate reference regions for subcontinental analysis of climate model data: definition and aggregated datasets. *Earth System Science Data* 12, 2959–2970. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2959-2020>

Jakab, G., Bíró, T., Kovács, Z., Papp, Á., Sarawut, N., Szalai, Z., Madarász, B., Szabó, S. (2019): Spatial analysis of changes and anomalies of intense rainfalls in Hungary; *Hungarian Geographical Bulletin* 68. (3).

Jánosi, I., Bíró, T., Lakatos, B., Gallas, J., Szöllosi-Nagy, A., (2023): Changing Water Cycle under a Warming Climate: Tendencies in the Carpathian Basin. *Climate* 11, 118. <https://doi.org/10.3390/cli11060118>

Kenward, T., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Fielding, E. (2000): Effects of Digital Elevation Model accuracy on hydrologic predictions. *Remote Sensing of Environment* 74(3): 432–444.

Kerényi A. (2008): Éghajlatváltozás: múlt jelen, jövő. *Földrajzi Közlemények* 132. 4. 419-431.

Kerényi A., Kiss, T., Szabó Gy. (2013): *Környezeti rendszerek.* Debreceni Egyetem, Szegedi Tudományegyetem. pp. 92-98.

Kertész, Á. (2016): Is desertification a problem in Hungary?; *Acta Geographica Debrecina Landscape and Environment* 10. (3-4): 242-247. doi: 10.21120/LE/10/3-4/18

Késmárki, I. (2005): A globális klímaváltozás várható hatásai és válaszai a Kisalföld szántóföldi növénytermesztésben. *AGRO-21 FÜZETEK* 1218-5329 12 43 24-38

Khan, A.A., Zhao, Y., Khan, J., Rahman, G., Rafiq, M., Moazzam, M.F.U. (2021): Spatial and Temporal Analysis of Rainfall and Drought Condition in Southwest Xinjiang in Northwest China, Using Various Climate Indices. *Earth Syst Environ* 5, 201–216. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00226-5>

Kis, A., Szabó, J.A., Pongrácz, R., Bartholy, J. (2015): A klímaváltozás extrém lefolyási karakterisztikákra gyakorolt hatásainak elemzése a Zagyva vízgyűjtőjén, *Egyetemi meteorológiai füzetek*, 26. Aktuális kutatások az ELTE Meteorológiai Tanszékén. Eötvös Loránd Tudományegyetem, 41-48.

Kiss, E., Balla, D., Kovács, A.D., (2022a): Characteristics of Climate Concern—Attitudes and Personal Actions—A Case Study of Hungarian Settlements. *Sustainability* 14, 5138. <https://doi.org/10.3390/su14095138>

Kiss, E., Balla, D., Poszet, S., Kovacs, A., (2022b): A klímaaggódmak jellemzői és helyi szintű sajátosságai: Esettanulmány Hajdú-Bihar megye választott településeiről, 2020. *Területi Statisztika* 62. <https://doi.org/10.15196/TS620505>

Kis, A., Szabó, P., & Pongrácz, R. (2025): Analysis of detected and future drought conditions – a case study for the Great Hungarian Plain. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(6), 303.

Klaver, R., Haarsma, R., Vidale, P.L., Hazeleger, W., (2020): Effective resolution in high resolution global atmospheric models for climate studies. *Atmospheric Science Letters* 21, e952. <https://doi.org/10.1002/asl.952>

Kohler, T., Wehrli, A., Jurek, M. (2014): Mountains and climate change: A global concern. (Sustainable Mountain Development Series.) Bern, Switzerland, Centre for Development and Environment (CDE), Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC) and Geographica Bernensia.

Koris, K. (2002): A hazai hegy- és dombvidéki kisvízgyűjtők árvízhozamainak meghatározása. *Vízügyi Közlemények* 84(1): 64–77.

Kovács, A.D., Farkas, J.Z., Vasárus, G.L., Balla, D., Kiss, E., (2024): Climate policy contradictions in light of the policy paradigms - the case of the Visegrád Countries. *Environmental Science & Policy* 154, 103689. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103689>

Kovács, S., Lovas, A., Gombás, K. (2015): Flood protection of Hungary in the integrated water management in the Tisza River Valley as an example. *Hidrológiai Közlöny*, 95(4), 6–19.

Kundrát, J.T., Simon, E., Gyulai, I., Lakatos, G., Tóthmérész, B. (2016): Short-term weather fluctuation and quality assessment of oxbows; *Időjárás - Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 120. (3): 301-313.

Kunkel, K., Karl, T.R., Brooks, H., Kossin, J., Lawrimore, J., Arndt, D., Bosart, L., Changnon, D., Cutter, S., Doesken, N., Emanuel, K., Groisman, P., Katz, R., Knutson, T., O' Brien, J., Paciorek, C., Peterson, T., Redmond, K., Robinson, D., Wuebbles, D., (2013): Monitoring and Understanding Trends in Extreme Storms: State of Knowledge. *Bulletin of the American Meteorological Society* 94, 499-514. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00262.1>

Lakatos, M., Szentimrey, T., Bihari, Z., (2011): Application of gridded daily data series for calculation of extreme temperature and precipitation indices in Hungary; *Időjárás - Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 115. (1-2): 99–109.

Lakatos, M., Szentimrey, T., Bihari, Z., Szalai, S., (2013): Creation of a homogenized climate database for the Carpathian region by applying the MASH procedure and the preliminary analysis of the data; *Időjárás - Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 117. (1): 143–158.

Láng I., Csete, L., Jolánkai, M. (szerk) (2007): A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok A VAHAVA jelentés. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest.

Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barret, K., & Blanco, G., (2023). IPCC, 2023: Climate change 2023: Synthesis report, summary for policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core writing team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC.

Lee, R. (1980): Forest hydrology. Columbia University Press, New York.

Liu, J., Li, D., Chen, H., Wang, H., Wada, Y., Kummu, M., Gosling, S.N., Yang, H., Pokhrel, Y., Ciais, P., (2024): Timing the first emergence and disappearance of global water scarcity. Nat Commun 15, 7129. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51302-z>

Lóczy, D., Czigány, S., Pirkhoffer, E., Lóczy, D., Czigány, S., Pirkhoffer, E. (2012): Flash Flood Hazards, in: Studies on Water Management Issues. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/28775>

Mair, P., Wilcox, R. (2018): Robust Statistical Methods Using WRS2. <https://cran.r-project.org/web/packages/WRS2/vignettes/WRS2.pdf>

Martonné Erdős K. (2006): Magyarország természeti földrajza I., KLTE, Debrecen.

Martonné Erdős K. (2003): Magyarország tájföldrajza, KLTE, Debrecen.

Marín Duran, G., Morgera, E. (2012): Environmental Integration in the EU's External Relations: Beyond multilateral dimensions. Hart.

Márkus, B., Sárközy F. (1986): Geodéziai AMT, Tankönyvkiadó, Budapest.

McKinney, W. (2010): Data Structures for Statistical Computing in Python. Proceedings of the 9th Python in Science Conference, 51–56.

Meehl, G., Stocker, T., Collins, W., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., JM, G., Kitoh, A., Knutti, R., JM, M., Noda, A., Raper, S., Watterson, I.G., Weaver, A., Zhao, Z.-C. (2007): Global Climate Projections, in: Climate Change.

Meehl, G.A., Zwiers, F., Evans, J., Knutson, T., Mearns, L., Whetton, P. (2000): Trends in Extreme Weather and Climate Events: Issues Related to

Modeling Extremes in Projections of Future Climate Change *. Bull. Amer. Meteor. Soc. 81, 427–436.

Mezősi, G. (2011): Magyarország természetföldrajza; Akadémiai Kiadó, Budapest.

Mezősi, G., Blanka, V., Ladányi, Z., Bata, T., Urdea, P., Frank, A. and Meyer, B. C. (2016): Expected mid- and long-term changes in drought hazard for the South-Eastern Carpathian Basin; Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences 11: 355-366.

Mészáros Csaba (1978) (szerk.): Mezőgazdasági vízépités; vízhasznosítás; Tankönyvkiadó, Budapest.

Mika, J. (2005): Globális klímaváltozás, magyarországi sajátosságok. „AGRO-21” Füzetek, Klímaváltozás – Hatások – Válaszok, „AGRO-21” Kutatási Programiroda, Budapest. 7-17.

Mika, J. (2009): Changes in means and extremities of temperature and precipitation in Hungary: One empirical and two model approaches with special reference to North-East Hungary; Thaiszai: Journal of Botany (Kosice) 19: 443-457.

Milosevic, D., Savic, S. M., Stojanovic, V., Popov-Raljic, J. (2015): Effects of precipitation and temperatures on crop yield variability in Vojvodina (Serbia); Italian Journal of Agrometeorology 20: 35-46.

Moberg, A., Jones, P.D., Lister, D., Walther, A., Brunet, M., Jacobeit, J., Alexander, L.V., Della-Marta, P.M., Luterbacher, J., Yiou, P., Chen, D., Klein Tank, A.M.G., Saladié, O., Sigró, J., Aguilar, E., Alexandersson, H., Almarza, C., Auer, I., Barriendos, M., Begert, M., Bergström, H., Böhm, R., Butler, C.J., Caesar, J., Drebs, A., Founda, D., Gerstengarbe, F.-W., Micela, G., Maugeri, M., Österle, H., Pandzic, K., Petrakis, M., Srnec, L., Tolasz, R., Tuomenvirta, H., Werner, P.C., Linderholm, H., Philipp, A., Wanner, H., Xoplaki, E. (2006): Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901–2000. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 111. <https://doi.org/10.1029/2006JD007103>

Mohammed, S., Alsafadi, K., Daher, H., Gombos, B., Mahmood, S., Harsányi, E., (2020): Precipitation pattern changes and response of

vegetation to drought variability in the eastern Hungary. Bulletin of the National Research Centre 44, 55. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00306-y>

Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R.D., Veith, T., (2007): Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE 50. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

Móring, A. (2011): Weather of 2010 (in Hungarian); Légkör 56: 38-42.

Moya Quiroga, V., Kure, S., Udo, K., Mano, A. (2016): Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version

MTA ATC TAKI (2015): Magyar Agrártudományi Kutatóközpont Talajtani Intézet. <https://www.elkh-taki.hu/>

Munia, H.A., Guillaume, J.H.A., Wada, Y., Veldkamp, T., Virkki, V., Kumm, M., (2020): Future Transboundary Water Stress and Its Drivers Under Climate Change: A Global Study. Earth's Future 8, e2019EF001321. <https://doi.org/10.1029/2019EF001321>

Murányi, G., Koncsos, L. (2022): Természetközeli árvízvédelmi megoldás vizsgálata a Tisza-völgyben HEC-RAS 1D-2D kapcsolt modellezéssel Csongrád környékén. Hidrológiai Közlöny, 102. évf.(1. szám), pp. 13-24.

Nagy B. (2021): E-OBS adatbázisok időbeli és térbeli szűrése, illetve átalakítása pontosvesszővel tagolt szöveges állománnyá Python programozási környezetben In: Molnár, Vanda Éva (szerk.) Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában XII.: Theory meets practice in GIS Debrecen, Magyarország : Debreceni Egyetemi Kiadó, 219-222.

Nagy, G., Lóczy, D., Czigány, S., Pirkhoffer, E., Fábrián, S.Á., Ciglič, R., Ferik, M., (2020): Soil moisture retention on slopes under different agricultural land uses in hilly regions of Southern Transdanubia. Hungarian Geographical Bulletin 69, 263-280. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.69.3.3>

Nagy, I. (2013): Javaslatok a magyar árvízvédelem megújításához. Hidrológiai Közlöny, 93(1), 15–23.

Nagy, L., Szlávik, L. (szerk) (2004): Árvízvédekezés a gyakorlatban; Közlekedési Dokumentációs Kft., Budapest.

Nagy, L. (2009): Árvízvédekezés a településeken. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, Budapest.

NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), (2013): NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second. Version 3. 6°S, 69°W NASA EOSDIS Land Processes DAAC, USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota (<https://lpdaac.usgs.gov>), accessed January 19, 2019, at <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL3.003>

Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A., Ramirez-Villegas, J., (2020): High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Sci Data* 7, 7. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0343-8>

Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Programok (NKFP) 2001-2004, (2005): 3. Program: Az árvízi kockázatok meghatározásához szükséges műszaki és tudományos alapok megteremtése, új árvízi gyakorisági és kockázat-bebecslési módszerek kidolgozása, Budapest.

Négyesi, G. (2018): Application possibilities of erodibility factor (EF) in the case of soils in Nyírség; *Agrokémia és Talajtan* 67. (2): 199-212.

Négyesi, K., Nagy, E., (2023): Esemény alapú csapadék-lefolyás modellezés különböző típusú csapadékatatok használatával. *Hidrológiai Közöny* 103, 44-53. <https://doi.org/10.59258/hk.12339>

Ogras, S., Onen, F. (2020): Flood Analysis with HEC-RAS: A Case Study of Tigris River. *Advances in Civil Engineering* 2020, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2020/6131982>

OVF (2016): Vízkárelhárítási kézikönyv, Budapest.

OVF (2017): Nemzeti Vízstratégia (Kvassay Jenő Terv). Budapest.

Pal, J., Giorgi, F., Bi, X. (2004): Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections.

Panthou, G., Vrac, M., Drobinski, P., Bastin, S., Li, L. (2018): Impact of model resolution and Mediterranean sea coupling on hydrometeorological extremes in RCMs in the frame of HyMeX and MED-CORDEX; *Climate Dynamics* 51. 3. 915-932.

Pálfai I. (2002): Magyarország aszályosságai zónái. *Vízügyi Közlemények* 84/3 323-357.

Pálfai I. (2004): *Belvizek és aszályok Magyarországon*. Közlekedési Dokumentációs Kft. Budapest.

Pálfai, I., Herceg, Á. (2011): Droughtness of Hungary and Balkan Peninsula; *Riscuri si Catastrofe* 9. (2): 145–154.

Pásztor, L., Négyesi, G., Laborczi, A., Kovács, T., László, E., and Bihari, Z. (2016): Integrated spatial assessment of wind erosion risk in Hungary; *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16. (11): 2421-2432.

Paudel, S., Benjankar, R. (2022): Integrated hydrological modeling to analyze the effects of precipitation on surface water and groundwater hydrologic processes in a small watershed. *Hydrology*, 9(2), 37. <https://doi.org/10.3390/hydrology9020037>

Péczely Gy. (1998): *Éghajlattan*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.

Pesaresi, M., Ehrlich, D., Kemper, T., Siragusa, A., Florczyk, A.J., Freire, S., Corbane, C., (2017): *Atlas of the Human Planet 2017*

Pierce, D.W., Barnett, T.P., Santer, B.D., Gleckler, P.J., (2009): Selecting global climate models for regional climate change studies. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 106, 8441-8446. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900094106>

Pirkhoffer, E., Czigány, S., Geresdi, I. (2009): Impact of rainfall pattern on the occurrence of flash floods in Hungary. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues* 53, 139–157. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2009/0053S3-0139>

Pirkhoffer, E., Czigány, S., Geresdi, I., Lovász, G. (2009): Environmental hazards in small watersheds: flash floods – impact of soil moisture and canopy cover on flash flood generation; *Riscuri și catastrofe (Cluj-Napoca, Romania)* 7. (5):117–129.

Pirkhoffer E., Czigány S., Hegedűs P., Balatonyi L., Lóczy D. (2013): Lefolyási viszonyok talajszempontú analizise ultra-kisméretű vízgyűjtőkön. *TL* 11, 105–123. <https://doi.org/10.56617/tl.3737>

Pongrácz, R., Bartholy, J., Bartha, E.B. (2014): Analysis of projected changes in the occurrence of heat waves in Hungary. *Advances in Geosciences* 35, 115–122. <https://doi.org/10.5194/adgeo-35-115-2013>

Power, S.B., Delage, F., Colman, R., Moise, A. (2011): Consensus on Twenty-First-Century Rainfall Projections in Climate Models More Widespread than Previously Thought. *J. Climate* 25, 3792–3809. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00354.1>

Pörtner, H.-O., Roberts, D., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Lösschke, S., Möller, V., Okem, A., Rama, B., Belling, D., Dieck, W., Götze, S., Kersher, T., Mangele, P., Maus, B., Mühle, A., Weyer, N., (2022): *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Pregun C., Tamás J., Takács P., Bíró T. (2006): HEC-RAS alapú geoadatbázis vizsgálata az EU Vízügyi Keretirányelv előírásai alapján I. *ACTA AGRARIA KAPOSVARIENSIS* 10, 31–42.

Prein, A.F., Rasmussen, R.M., Ikeda, K., Liu, C., Clark, M.P., Holland, G.J., (2017): The future intensification of hourly precipitation extremes. *Nature Clim Change* 7, 48–52. <https://doi.org/10.1038/nclimate3168>

QGIS DEVELOPMENT TEAM (2019): QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

Qamar, S., Ali, Z., Sammen, S.S. (2023): A new method for modelling precipitation variability in relation to climate change. *Journal of Water and Climate Change* 14, 289–304. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.340>

R. Core Team. (2018): R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

Ray, D.K., Gerber, J.S., Mcdonald G.K., West, P.C. (2015): Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications* 6: 5989. doi:10.1038/ncomms6989

Rácz, J. (1981): Az erdő szerepe a vízgyűjtő területek vízháztartásában. In Majer, A. – Kovács, I.-ván, editors, *Erdő és Víz*. MTA VEAB Erdészeti Szakbizottság, Erdészeti és Faipari Egyetem, Sopron. 23–28.

Reich, Gy. (2019): *Nemzeti Vízstratégia*, Nemzeti Közzolgálati Egyetem, Budapest.

Rohde R., (2025): *Global Temperature Report for 2024* - Berkeley Earth. https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2024/?utm_source=chatgpt.com (2025.04.30).

Rónai, A. (1986): A magyarországi kvarter képződmények kifejlődése és szerkezeti helyzete. *Földtani közlöny*. 116.1.

Salmaso, F., Crosa, G., Espa, P., Quadroni, S. (2021): Climate Change and Water Exploitation as Co- Impact Sources on River Benthic Macroinvertebrates. *Water* 13, 2778. <https://doi.org/10.3390/w13192778>

Santos, F., Ferreira, P., Pedersen, J. (2023): Climate Change and Sustainability. pp. 73–83. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24888-7_6

Scherrer, S.C., de Valk, C., Begert, M., Gubler, S., Kotlarski, S., Croci-Maspoli, M., (2024): Estimating trends and the current climate mean in a changing climate. *Climate Services* 33, 100428. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100428>

Schlaepfer, M.A., Lawler, J.J., (2023): Conserving biodiversity in the face of rapid climate change requires a shift in priorities. *WIREs Climate Change* 14, e798. <https://doi.org/10.1002/wcc.798>

Schmittner, K.-E., Giresse, P. (1996): Modelling and application of the geomorphic and environmental controls on flash flood flow. *Geomorphology* 16, 337–347. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(96\)00002-5](https://doi.org/10.1016/0169-555X(96)00002-5)

Simpson, N.P., Mach, K.J., Constable, A., Hess, J., Hogarth, R., Howden, M., Lawrence, J., Lempert, R.J., Muccione, V., Mackey, B., New, M.G., O'Neill, B., Otto, F., Pörtner, H.-O., Reisinger, A., Roberts, D., Schmidt, D.N., Seneviratne, S., Strongin, S., Aalst, M. van, Totin, E., Trisos, C.H., (2021): A framework for complex climate change risk assessment. *One Earth* 4, 489–501. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.03.005>

Singh, R., Subramanian, K., Refsgaard, J. C. (1999): Hydrological modelling of a small watershed using MIKE SHE for irrigation planning. *Agricultural Water Management*, 41(3), 149–166. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00022-0)

Singh, S., Kanga, S., Đurin, B., Kranjčić, N., Chaurasia, R., Markovinović, D. (2021): Flood risk modeling using HEC-RAS and geospatial techniques. *E-Zbornik, elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta* 11, 20–36. <https://doi.org/10.47960/2232-9080.2021.22.11.20>

Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Avant, B., Mucche, M., (2018): An Overview of RainfallRunoff Model Types.

Somogyi, S. (1996): A magyar honfoglalás földrajzi környezete. A Kárpát-medence történeti földrajza, Nyíregyháza.

Spinoni, J., Szalai, S., Szentimrey, T., Lakatos, M., Bihari, Z., Nagy, A., Németh, Á., Kovács, T., Mihic, D., Dacic, M., Petrovic, P., Kržič, A., Hiebl, J., Auer, I., Milkovic, J., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Kilar, P., Limanowka, D., Pyrc, R., Cheval, S., Birsan, M.-V., Dumitrescu, A., Deak, G., Matei, M., Antolovic, I., Nejedlík, P., Štastný, P., Kajaba, P., Bochníček, O., Galo, D., Mikulová, K., Nabyvanets, Y., Skrynyk, O., Krakovska, S., Gnatiuk, N., Tolasz, R., Antofie, T., Vogt, J. (2015): Climate of the Carpathian Region in the period 1961–2010: climatologies and trends of 10 variables. *International Journal of Climatology* 35, 1322–1341. <https://doi.org/10.1002/joc.4059>

Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J., Barbosa, P. (2016): Meteorological Droughts in Europe: Events and Impacts – Past Trends and Future Projections. Publications Office of the European Union, Luxembourg, EUR 27748 EN, doi:10.2788/450449.

Stelczer, K., (2000): A vízkészlet-gazdálkodás hidrológiai alapjai; ELTE, Eötvös Kiadó, Budapest.

Stoffel, M., Wyżga, B., Marston, R.A. (2016): Floods in mountain environments: A synthesis. *Geomorphology* 272, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.008>

Szabó, P., Horányi, A., Krüzselyi, I., Szépszó, G. (2011) The climate modelling at Hungarian Meteorological Survey: ALADIN and REMO. 36. Meteorológiai Tudományos Napok OMSZ, Budapest, 87-101.

Szabó, J., Jakab, G., Szabó, B. (2015): Spatial and temporal heterogeneity of runoff and soil loss dynamics under simulated rainfall; *Hungarian Geographical Bulletin* 64: 25-34.

Szabó, S., Elemér, L., Kovács, Z., Püspöki, Z., Kertész, Á., Singh, S.K., Balázs, B. (2019): NDVI dynamics as reflected in climatic variables: spatial and temporal trends – a case study of Hungary; *GIScience & Remote Sensing* 56: 624-644.

Szalai, S., Szinell, C.S. and Zoboki, J. (2000): Drought Monitoring in Hungary; In: *Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management* Ed.: Wilhite, D.A., Sivakumar, M.V.K., Wood, D.A. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 182-199.

Szentimrey, T., Bihari, Z. (2007): Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis); *Proceedings from the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology*, Budapest, Hungary, 17-27.

Szentimrey, T., Bihari, Z., Szalai, S. (2010): Comparison of Geostatistical and Meteorological Interpolation Methods (What is What?); *Spatial Interpolation for Climate Data: The Use of GIS in Climatology and Meteorology* Ed.: DOBESCH, H., DUMOLARD, P., DYRAS, I. pp. 45–56.

Szentimrey, T. (2011): Manual of homogenization software MASHv3.03; Hungarian Meteorological Service

Szentimrey, T., Lakatos, M., Bihari, Z., Kovács, T., Szalai, S., Auer, I., Hiebl, J., Milkovic, J., Stepanek, P., Zahradnicek, P., Tolasz, R., Kilar, P., Pyrc, R., Limanowka, D., Cheval, S., Matei, M., Kajaba, P., Ivanakova, G., Bochnicek, O., Nejedlik, P., Statsny, P., Mihic, D., Petrovic, P., Savic, T., Skrynyk, O., Nabyvanets, Y., Gnatiuk, N. (2012): Final report on quality control and data homogenization measures applied per country, including QC protocols and measures to determine the achieved increase in data quality; Carpatclim Project Deliverable D1 12, Retrieved April 22, 2014. http://www.carpatclim-eu.org/docs/deliverables/D1_12.pdf.

Szigyártó, Z. (2015): A Tisza nagyvízi vízjárása a múlt századelejétől napjainkig. Hidrológiai Közlöny, 95(4), 19–29.

Szlávik, L. (2003): A 2001. évi felső-tiszai árvíz kialakulása éshidrológiai sajátosságai. Vízügyi Közlemények, 85(4), 13–34.

Szlávik, L. (2003): Az elmúlt másfél évszázad jelentősebb Tisza-völgyi árvizei és az árvízvédelem szakaszos fejlesztése. In: Szlávik L. (szerk.): Elemző és módszertani tanulmányok az 1998-2001. évi ár- és belvizekről. Vízügyi Közlem. Különszám - IV: 31-43.

Szlávik, L. (2003): Az ezredforduló árvizeinek és belvizeinek hidrológiai jellemzése. Vízügyi Közlemények 85(4): 547–566.

Szlávik, L., Sziebert, J., Zellei, L., Váradi, J., (2004): Árvíz- és belvízvédelem; Eötvös József Főiskola, Baja.

Szlávik L. (2005): Árvízvédelem; Főiskolai jegyzet, Eötvös József Főiskola, Baja.

Szlávik, L. (2021): The March 2001 flood disaster in Bereg was 20 years ago. Hungarian Journal of Hydrology, 101(2), 3–25.

Szöllősi-Nagy A. (2018.a): Sorsfordító a fejlődésben. 2.rész: Válaszút előtt áll a világ vízgazdálkodása. Hidrológiai Közlöny, Vol. 98, No. 4, pp. 9-16.

Szöllősi-Nagy A. (2020): A klímaváltozás hidrológiai hatásai: több víz, több aszály – mit tehetünk? Klímaváltozás és Magyarország, Szerk. Szathmáry Eörs, Osiris Kiadó, Budapest, pp. 23 – 40.

Tamiru, H., Dinka, M.O. (2021): Application of ANN and HEC-RAS model for flood inundation mapping in lower Baro Akobo River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 36, 100855. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100855>

Tamiru, H., Wagari, M. (2022): Machine-learning and HEC-RAS integrated models for flood inundation mapping in Baro River Basin, Ethiopia. *Model. Earth Syst. Environ.* 8, 2291–2303. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01175-8>

Tanács, E., Belényesi, M., Lehoczki, R., Pataki, R., Petrik, O., Standovár, T., Pásztor, L., Laborczi, A., Szatmári, G., Molnár, Z., Bede-Fazekas, Á., Somodi, I., Kristóf, D., Kovács-Hostyánszki, A., Török, K., Kisné Fodor, L., Zsembery, Z., Friedl, Z., Maucha, G. (2021): Compiling a high-resolution country-level ecosystem map to support environmental policy: methodological challenges and solutions from Hungary. *Geocarto International* 37, 8746–8769. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.2005158>

Tápay, L., Szalai, M. (1954): *Árvízvédelmi kézikönyv*; Budapest.

Taylor, K., (2001): Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research* 106, 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>

Tebaldi, C., Arblaster, J., Knutti, R. (2011): Mapping model agreement on future climate projections. *Geophysical Research Letters* 38, L23701. <https://doi.org/10.1029/2011GL049863>

Tollefson, J., (2022): Climate change is hitting the planet faster than scientists originally thought. *Nature* d41586-022-00585-7. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00585-7>

Tran, 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* 26, 184-199.
<https://doi.org/10.5937/gp26-37271>

Trenberth, Jones, P., Ambenje, Bojariu, R., Easterling, D., Tank, K., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J., Rusticucci, M., Soden, B., Zhai, P., Folland, C. (2007): *Observations: Surface and Atmospheric Climate Change*. pp. 235–336.

The pandas development team (2021): *pandas-dev/pandas: Pandas 1.3.3*. Zenodo

Tóth, G., Hengl T., Hermann T., Makó A., Kocsis M., Tóth B., Berényi Üveges J. (2015): Magyarország mezőgazdasági területeinek talajtulajdonság-térképei European Union. doi: 10.2788/318926
https://airterkep.nebih.gov.hu/gis_portal/talajvedelem/pdf/LB-NA-27539-HU-N_online.pdf

US Army Corps of Engineers (USACE). (2016): *HEC-RAS river analysis system. Hydraulic reference manual*. Hydrologic Engineering Research Center.

Valkó, O., Török, P., Deák, B. and Tóthmérész, B. (2014): Review: Prospects and Limitations of Prescribed Burning as a Management Tool in European Grasslands; *Basic and Applied Ecology* 15 (1): 26–33. doi:10.1016/j.baae.2013.11.002.

Van Rossum, G., Drake, F. L. (2009): *Python 3 Reference Manual*.

Van Vuure, 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. *Climate Change*, 109, pp.5-31.

Várallyay, Gy. (1985): Magyarország talajainak vízháztartási és anyagforgalmi típusai. *Agrokémia és Talajtan*. 34,3-4.

Várallyay, Gy. (2005): Magyarország talajainak vízraktározó képessége. *Agrokémia és Talajtan*. 54,5–24.

Venkatraman, E.S. (2018): clinfun: Clinical Trial Design and Data Analysis Functions. R package version 1.0.15. <https://CRAN.R-project.org/package=clinfun>

Vermes, V. (szerk) (1997): Vízgazdálkodás; Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó; Budapest.

VGT (2010): A Víz Keretirányelv hazai megvalósítása. Vízyűjtő-gazdálkodási Terv 2-11. Tarna. Vízügyi és Környezetvédelmi Központi Igazgatóság, Észak-magyarországi Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság, Budapest.

Wang, X., Xie, H. (2018): A Review on Applications of Remote Sensing and Geographic Information Systems (GIS) in Water Resources and Flood Risk Management. *Water* 10, 608. <https://doi.org/10.3390/w10050608>

Wang, Z., Wang, T., Zhang, X., Wang, J., Yang, Y., Sun, Y., Guo, X., Wu, Q., Nepovimova, E., Watson, A.E., Kuca, K., (2024): Biodiversity conservation in the context of climate change: Facing challenges and management strategies. *Science of The Total Environment* 937, 173377. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173377>

Wolf, A.T. (2007): Shared Waters: Conflict and Cooperation. *Annual Review of Environment and Resources*, 32. pp. 241-269.

WMO, World Meteorological Organization. (2024) State of the Global Climate 2024 <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (25.04.30.).

Yang, D., Yang, Y., Xia, J., (2021): Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geography and Sustainability* 2, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>

Ye, H., (2018): Changes in duration of dry and wet spells associated with air temperatures in Russia. *Environ. Res. Lett.* 13, 034036. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae0d>

Zeiger, S., Hubbart, J. (2021): Measuring and modeling event-based environmental flows: An assessment of HEC-RAS 2D rain-on-grid

simulations. *Journal of Environmental Management* 285, 112125.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112125>

Zellei, L., Sziebert, J. (2003): Árvízi áramlásmérések tapasztalatai a Tiszán. In: Szlávik L. (szerk.): Elemző és módszertani tanulmányok az 1998-2001. évi ár- és belvizekről, *Vízügyi Közlemények különszám 4*: 133-144.

Zeybek, M. (2018): Nash-Sutcliffe efficiency approach for qualityimprovement. *Journal of Applied Mathematics and Computation*, 2(11), 496–503. <https://doi.org/10.26855/jamc.2018.11.001>

Zhang, Y., Huang, C., Zhang, W., Chen, J., Wang, L. (2021): The concept, approach, and future research of hydrological connectivity and its assessment at multiscales. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(38), 52724–52743. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16148>

Zhao, W., Khalil, M.A.K. (1993): The relationship between precipitation and temperature over contiguous United States. *Journal of Climate* 6: 1232-1236.

9. Mellékletek

15. ábra. Az előntési modellek térbeli ábrázolása a Tarna folyó vízgyűjtőjén Észak-Magyarországon részletes felbontásban: **a, b** Legnagyobb árvízi esemény, **c, d** Árvízi esemény, **e, f** Átlagos esemény.

Forrás: saját szerkesztés

