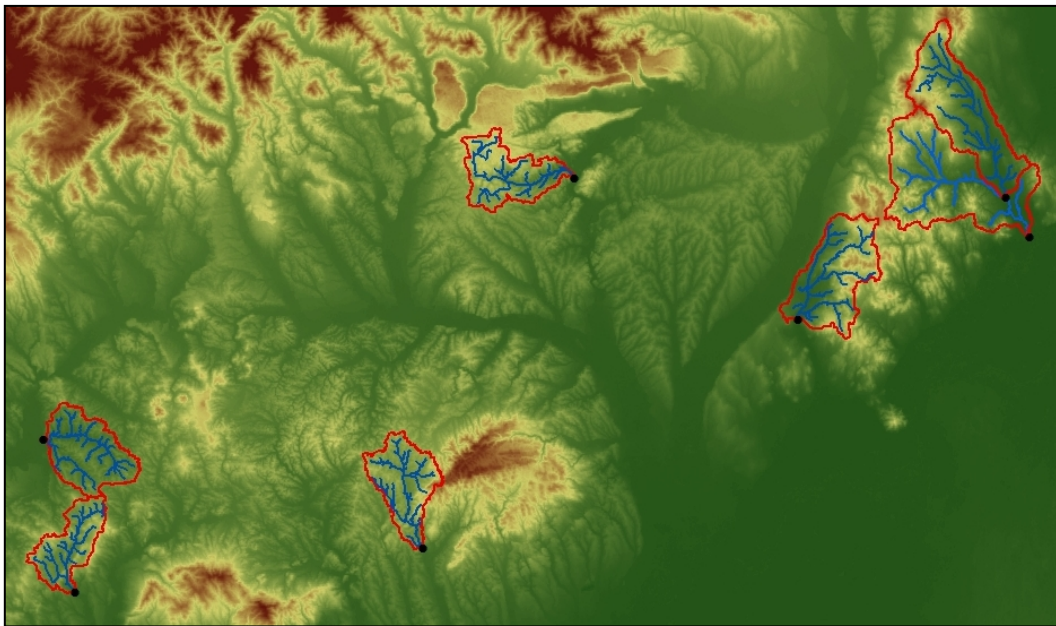


Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

TDK Konferencia 2016

Lefolyás idősorok vizsgálata nem mért vízgyűjtők feltárásának előkészítésére



Készítette:

Nagy Eszter Dóra

Konzulensek:

Dr. Torma Péter

Dr. Bene Katalin

Tartalom

1.	Bevezetés.....	1
2.	Terület bemutatása	2
2.1	Vízgyűjtők kiválasztása.....	2
2.2	Vízrajz, éghajlat.....	3
2.3	Geológia, talajtan.....	3
2.4	Morfológiai viszonyok	4
3.	Kiindulási adatok.....	7
4.	Lefolyás becslése.....	8
5.	Éves vízmérlegek vizsgálata.....	10
6.	Havi vízmérlegek vizsgálata.....	15
7.	Vízhozam idősorok vizsgálata.....	19
7.1	A csapadék-lefolyás modell bemutatása.....	20
7.2	Modell felépítése	21
7.3	Kalibrálás.....	24
7.4	Modellezett idősorok vizsgálata	35
8.	Összefoglalás.....	40
9.	Konklúziók	41
10.	Irodalomjegyzék.....	43
11.	Mellékletek.....	45

1. Bevezetés

A vízgyűjtőn zajló folyamatok megértése és azok vizsgálata napjainkban egyre nagyobb jelentőséggel bír. A szokványos mérnöki feladatok mellett, mint a mértékadó vízhozamok meghatározása, a klímaváltozás hatásának kimutatása is kihívást jelent. A hazai hidrológiában számos olyan terület van, melyek az utóbbi évtizedekben nem kerültek felülvizsgálásra, a rendelkezésre álló adatok, térképek évtizedekkel ezelőtti állapotokat tükröznek. Mindemellát azonban olyan változásokat tapasztalunk, melyek indokolják a vízgyűjtőkkel kapcsolatos ismereteink bővítését, frissítését. A nemzetközi gyakorlatban előtérbe kerülő szemlélet kapcsán alkalmazott módszerek, vizsgálatok hazai alkalmazása célszerű, hiszen ezek által válhatnak világszinten is igazán jól összehasonlíthatóvá a hidrológiában elért eredmények.

Hazánkban ugyan nem a hegy- és dombvidéki vízgyűjtők jelentik a legnagyobb problémát a vízgazdálkodásban, azonban az utóbbi néhány évtizedben megszorodtak ezeken a kisvízfolyásokon is a szélsőséges események. A heves záporok vagy a hosszan tartó, intenzív esőzések révén keletkező árvizek a tározók telítődéséhez, áradásokhoz vezetnek. Ilyen jellegű problémákkal rendelkeznek a Dunántúli-domság, Dunántúli-középhegység és az Északi-középhegység kisvízfolyásai, ezek közül az Északi-középhegység képezi jelen dolgozat tárgyát, mivel erre a régióra állt rendelkezésünkre a legtöbb és legmegfelelőbb adat.

Jelen dolgozat a lefolyásbecslés hazai viszonylatban eddig még nem adaptált módozatát hivatott előkészíteni. A kutatómunka során összegyűjtöttem azokat a kis- és közepes vízgyűjtőket, amelyek rendelkezésre áll legalább egy évtizednyi egyidejű vízhozam és csapadék adat a 2000-es évek elejétől. A vízgyűjtők morfológiai jellemzőinek térinformatikai feltárása után első lépésben az éves és havi mérlegeket vizsgálom olyan módszerekkel, melyek eddig még nem mind kerültek Magyarországon alkalmazásra egyazon időszakra, egyszerre több ugyanazon régióból származó vízgyűjtőre. A csapadék-lefolyás viszonyok részletes, napi léptékű feltárásához, illetve későbbiekben statisztikai és klimatikus vizsgálatok céljából felállítottam minden egyes vízgyűjtőre egy összevont paraméterezésű csapadék-lefolyás modellt. A modelleket igyekeztem minél kevesebb szabadparaméter segítségével kalibrálni. Fő célom egy egységes paraméterezésű, regionálisan kalibrált vízgyűjtőmodell-együttes létrehozhatóságának vizsgálata volt. A futtatások eredményeit nem teljesen szokványos módon – a modellezett és mért vízhozam idősorok közvetlen összevetésén keresztül – értékelem, hanem a dolgozat során bemutatott szemléletnek megfelelően, több szempontból, átfogóan értelmezem és statisztikailag elemzem azokat. A dolgozat végén összefoglalom a régióban vizsgált vízgyűjtőkre kapott eredményeket, valamint kitekintést adok a munka folytatásáról, a jövőben végzendő további vizsgálatokról.

2. Terület bemutatása

Jelen dolgozat készítéséhez olyan régiót volt célszerű választani Magyarországon belül, melyre a lehető legtöbb mért adat rendelkezésre áll a kis- és közepes, domb- és hegyvidéki vízgyűjtőket tekintve. Ez alapján az Északi-középhegység területéről kerültek kiválasztásra vízgyűjtők. Fontos megjegyezni azonban, hogy a vizsgálatokat érdemes kiterjeszteni más régiókra is.

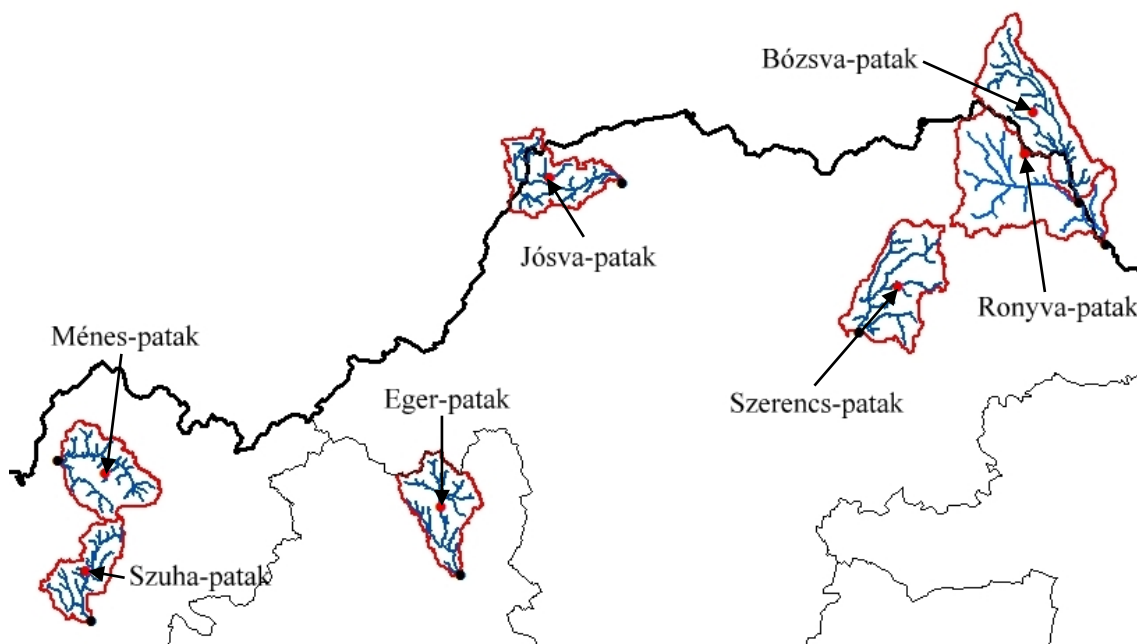
2.1 Vízgyűjtők kiválasztása

A rendelkezésre álló mért vízgyűjtők közül nem mind alkalmas az itt leírt vizsgálatok elvégzéséhez. A vizsgált vízgyűjtők kiválasztásánál szükséges figyelembe venni, hogy a mért vízhozam adatok befolyásolatlanok legyenek, vagyis ne legyen felvízen olyan műtárgy, mely jelentősen módosítaná a vízgyűjtő kifolyási szelvényében kialakuló lefolyás idősort (mint például tározók esetén). Emellett szükség van arra is, hogy a rendelkezésre álló adatok ugyanazon időszakból kerüljenek ki, lehetőleg minimum 10 évre, mely már statisztikailag reprezentatívnak tekinthető.

Fentiek alapján végül 7 olyan vízgyűjtő került kiválasztásra, melyekre különböző forrásokból rendelkezésre állnak a vizsgálatokhoz szükséges adatok (lásd 3. fejezet). A kiválasztott vízgyűjtők a következők (keletről-nyugatra):

- Szuha-patak,
- Ménes-patak,
- Eger-patak,
- Jósua-patak,
- Szerencs-patak,
- Ronyva-patak,
- Bózsua-patak.

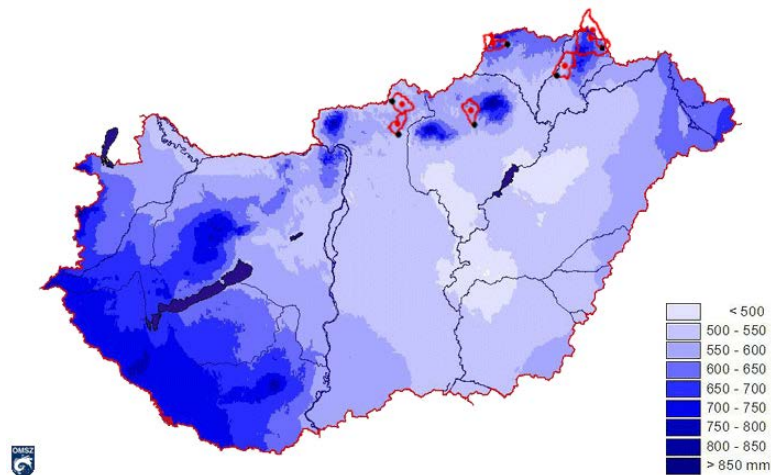
A vízgyűjtők méretét és elhelyezkedését az 1. ábra mutatja.



1. ábra: Vizsgált patakok és elhelyezkedésük

2.2 Vízrajz, éghajlat

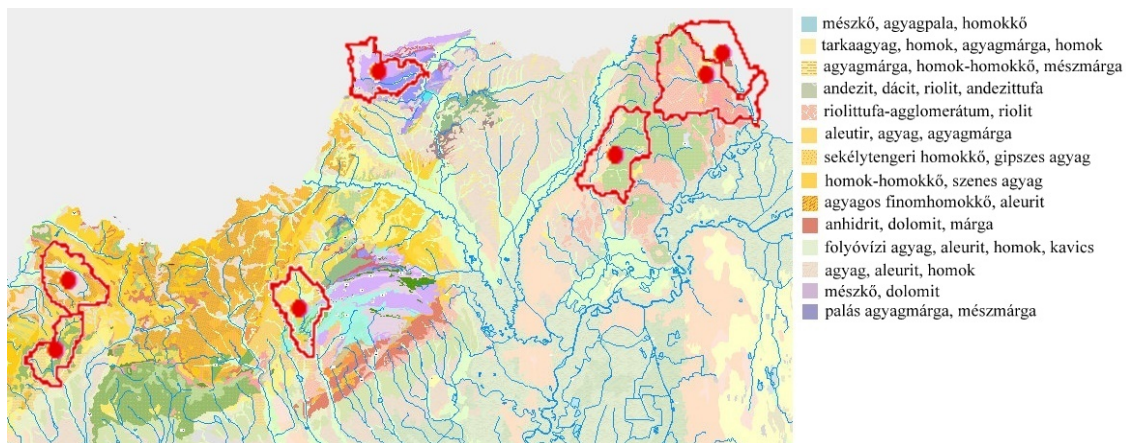
Az Északi-középhegység magasságából és helyzetéből adódóan hazánk leghűvösebb nagytája. Éghajlata jellemzően nedves-kontinentális, hegyvidéki jellegű. Az évi középhőmérséklet általában 9 °C alatti, az éves csapadékösszeg 500-800 mm-ig is terjedhet (2. ábra). Ennek a csapadékmennyiségnek közel negyede hó formájában hullik, ezáltal ez hazánk leginkább hóborított tája. A terület vízfolyásokban gazdag, kifejezetten a vulkáni alapkőzettel rendelkező területeken. A mészkőből álló területek karsztvizekben gazdagok.



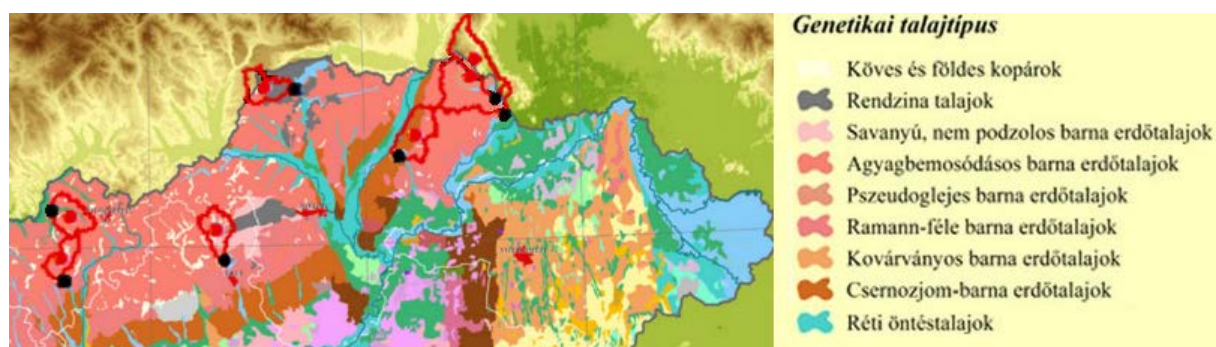
2. ábra: Vizsgált vízgyűjtők elhelyezkedése Magyarország csapadéktérképén (OMSZ, 1971-2000)

2.3 Geológia, talajtan

A belső kárpáti vulkáni koszorú miocén andezites-riolitos vulkanizmusa által képződött a Visegrádi-hegység, a Börzsöny, a Cserhát, a Mátra és a Zempléni-hegység. Foltokban láthatók a pliocén bazaltvulkanizmus nyomai (Salgó, Somoskő, Medves-plató). Középidői mészkő és dolomit került a felszínre a Bükkben és az Aggteleki-karszton. Harmad- és negyedidőszaki üledék (homokkő, homok, agyag, kavics, lösz) borítja a Gödöllői-dombságot, a Cserhátot és az Észak-borsodi-dombvidéket. Folyók szabdalják fel, alakították ki a Nógrádi-medencét, a Borsodi-medencét (Sajó völgye) és a Hernád völgyét. Emellett a területen barna erdőtalaj, a mészkővidékeken a rendzina jellemző (Dövényi, 2010).



3. ábra: Vízgyűjtők elhelyezkedése Magyarország földtani atlaszán (MÁFI, 2010)



4. ábra: Vízgyűjtők elhelyezkedése Magyarország genetikai talajterképén (MTA ATK TAKI, 2014)

A 3. ábrán látható, hogy a keleti vízgyűjtők alapkőzete túlnyomórészt vulkáni eredetű, jellemzően andezit és riolit. A nyugati vízgyűjtők esetében azonban az andezit mellett a homokkő dominál. Északon a Jósua-patak vízgyűjtőjén a mészkő, dolomit, mészmárga jellemző, ez a vízgyűjtő karsztos jellegű. Az Eger-patak vízgyűjtője alatt a legváltozatosabb az alapkőzet, itt található mészkő, homokkő és andezit is. A jellemző talajokat tekintve általánosságban elmondható, hogy a barna erdőtalajok a jellemzők, a Jósua-patak vízgyűjtőterületén van jelen leginkább az említett rendzina talaj (4. ábra).

2.4 Morfológiai viszonyok

A választott vízgyűjtők morfológiai jellemzőinek meghatározásához, illetve később a vízgyűjtőmodell előállításához is szükséges volt a vízgyűjtők lehatárolása. A vízgyűjtőmodellt az ArcGIS térinformatikai szoftver segítségével állítottam elő. Ehhez a szoftverhez fejlesztett ki a HEC egy kiegészítő szoftvert HEC-GeoHMS néven, mellyel lépésről-lépésre, könnyedén elvégezhető a vízgyűjtő lehatárolás és a csapadék-lefolyás modellhez szükséges bemenő vízgyűjtőmodell előállítása. Ehhez a bárki számára hozzáférhető EU-DEM raszter terepmodellt használtam, mely a szenzorok által érzékelt legfelső felületet reprezentálja. Ennek cellamérete 25x25 m, mely elegendően részletes a kis- és közepes vízgyűjtők lehatárolásához.

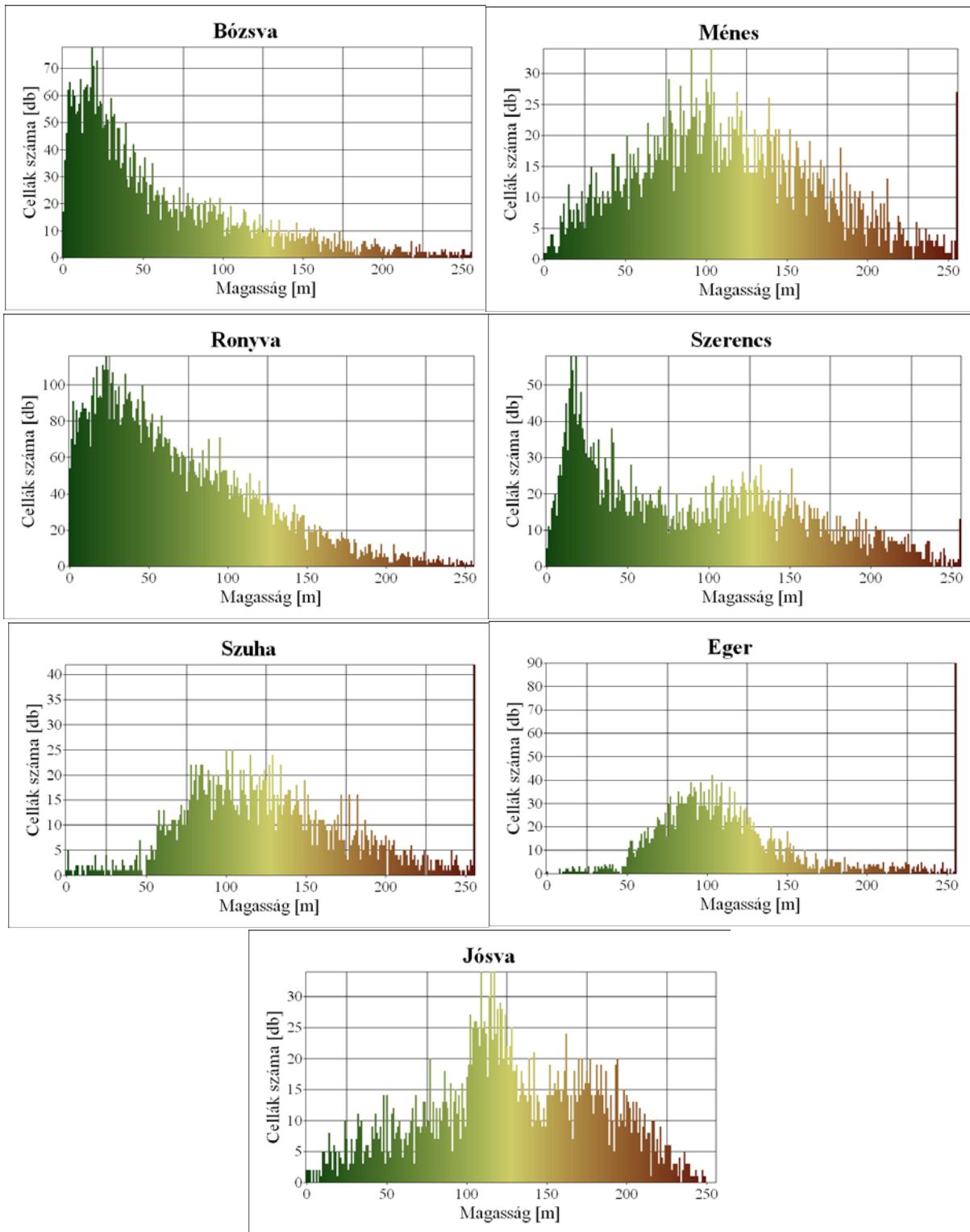
A terepmodell előkészítésének 9 fő lépése van, minden lépésnél külön réteget hoz létre a program. Az egyes lépések angol elnevezését zárójelben tüntetem fel. Elsőként a mélyedések feltöltése szükséges (Fill Sinks). Második lépésben a program hozzárendeli minden cellához a

legmeredekebb lejtő irányát (Flow Direction). Következő lépésben az adott cellákhoz tartozó felvízi cellák számát határozza meg a program (Flow Accumulation). Ezután meghatározható a felhasználó által megadott felvízi cellaszám alapján, hogy mely cellák számítanak medernek (Stream Definition). Következő lépésben a program vízfolyásszakaszokra osztja a mederként meghatározott cellákat (Stream Segmentation). 6. lépésben a meghatározott vízfolyásszakaszokhoz lehatárolásra kerülnek a vízgyűjtők (Catchment Grid Delineation). Az utolsó előtti két lépésben tér át a szoftver raszter formátumról vektor formátumra a részvízgyűjtők határvonalainak és a vízfolyásszakaszoknak a vektorizálásával (Catchment Polygon Processing, Drainage Line Processing). Az utolsó lépés összesíti a részvízgyűjtőket minden torkolatnál, ennél a lépésnél újabb réteg már nem jön létre (Adjoint Catchment Processing) (Nagy, 2016).

Az így kapott vízgyűjtőmodellekből kinyerhető a terület, leghosszabb lefolyási úthossz, esés, illetve a vízgyűjtő középpontjának magassági és vízszintes koordinátái. Ezen felül GIS adatbázisból meghatároztam a lakott területek arányát, melynek később a modell paramétereinek meghatározásánál lesz jelentősége (lásd 7.3 fejezet). Az egyes vízgyűjtőkre vonatkozó adatokat az 1. táblázat tartalmazza, melyből látható, hogy a választott vízgyűjtők jellemzői kellően változékonyak, nem található közöttük két azonos, melynek minden jellemzője közel egyező lenne. Ez a végzett vizsgálatok reprezentativitását növeli. A 5. ábra a vízgyűjtők magassági hisztogramjait szemlélteti.

1. táblázat: Vízgyűjtőkarakterisztikák

	Terület [km ²]	Leghosszabb lefolyási úthossz [km]	Esés [%]	Lakott terület [%]	Szélesség [°]	Hosszúság [°]	Magasság [m B. f.]
Bózsva	258.0	27.9	1.9	0.6	48.5	21.6	205.7
Ménes	137.8	23.0	0.8	8.9	48.1	19.6	223.6
Ronyva	590.7	40.5	1.6	2.8	48.5	21.5	427.3
Szerencs	179.6	26.7	2.3	3.0	48.3	21.3	341.0
Szuha	97.1	21.0	1.0	3.7	48.0	19.6	259.3
Eger	123.2	24.0	1.0	7.5	48.0	20.3	273.5
Jósva	123.9	31.0	1.4	1.6	48.5	20.6	279.2



5. ábra: Vízyűjtők magassági histogramjai (a cellák mérete 625 m^2 , magasságuk a kifolyási szelvény magasságához viszonyított)

3. Kiindulási adatok

A mérlegvizsgálatokhoz és a csapadék-lefolyás modellezéshez mindenképpen szükséges adatsorok a következők:

- vízhozam,
- csapadék,
- hőmérséklet,
- nettó sugárzás.

A vízhozam idősorokat az Észak-Magyarországi Vízügyi Igazgatóság és a Közép-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság bocsájtotta rendelkezésemre, míg a csapadék adatok forrásai a megnevezett Igazgatóságok mellett az Országos Meteorológiai Szolgálat, illetve a CARPATCLIM projekt (<http://www.carpatclim-eu.org/>), melynek keretében a kárpát-medencei országok által rögzített adatokat gyűjtötték össze, homogenizálták és tették széles körben elérhetővé az egyes országok résztvevői. Utóbbi forrás esetén az adatok időbeli felbontása napi, térbeli felbontása $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (11 km x 11 km). A CARPATCLIM projekt keretében több meteorológiai elem is meghatározásra került, így innen beszerezhető volt a hőmérséklet és nettó sugárzás adatsora is. Másik forrásom a hőmérséklet adatokat tekintve az amerikai National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) szervezet, melynek részét képezi a National Climatic Data Center (NCDC). A NCDC a világ minden tájáról gyűjt össze meteorológiai adatokat, melyek a térképes keresőjükön keresztül ingyenesen lekérhetőek. Ezek a mérőállomáshoz tartozó idősorok feltehetően pontosabbak, mint a CARPATCLIM projekt során meghatározott adatok, ezért ahol lehetett a NCDC adatait használtam.

Mivel a CARPATCLIM projekt 2010-ig tartott, ezért csak eddig kérhetőek le ebből a forrásból adatok. Ez limitálta a kiválasztható 10 éves időszak felső határát. Ez azonban beleillett abba az elképzelésbe, miszerint a vizsgálatokat a közelmúltra végezzük és a választott időszak foglaljon magába legalább egy rendkívül csapadékos évet. Némely vízgyűjtő esetében az igazgatóságok által regisztrált csapadék vagy vízhozam idősor kezdete jelentette a vizsgálható időszak alsó határát, így a választott vízgyűjtőkre 9-10 évnnyi idősor adódott, mely a statisztikai reprezentativitást tekintve megfelelő. A vízgyűjtőkre összegyűjtött adatokat és forrásukat a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: Összegyűjtött adatsorok és forrásuk

	Vízhozam		Csapadék		Hőmérséklet		Relatív páratartalom		Minden adat	
	Forrás	Időszak	Forrás	Időszak	Forrás	Időszak	Forrás	Időszak	Időszak	Év
ÉMVIKIZIG										
Bózsva	ÉM	2001-2015	ÉM	2001-2015	CC	2001-2010	CC	2001-2010	2001-2010	10
Ronyva	ÉM	2001-2015	ÉM	2001-2015	CC	2001-2010	CC	2001-2010	2001-2010	10
Eger	ÉM	2001-2013	CC	2001-2010	NOAA	2001-2015	CC	2001-2010	2001-2010	10
Jósva	ÉM	2001-2015	CC	2001-2010	NOAA	2001-2010	CC	2001-2010	2001-2010	10
Szerencs	ÉM	2001-2015	CC	2001-2010	CC	2001-2010	CC	2001-2010	2001-2010	10
KDVIKIZIG										
Ménes	KDV	2002-2015	KDV	2002-2015	NOAA	2002-2015	CC	2001-2010	2002-2010	9
Szuha	KDV	2002-2015	KDV	2001-2015	CC	2001-2010	CC	2001-2010	2002-2010	9

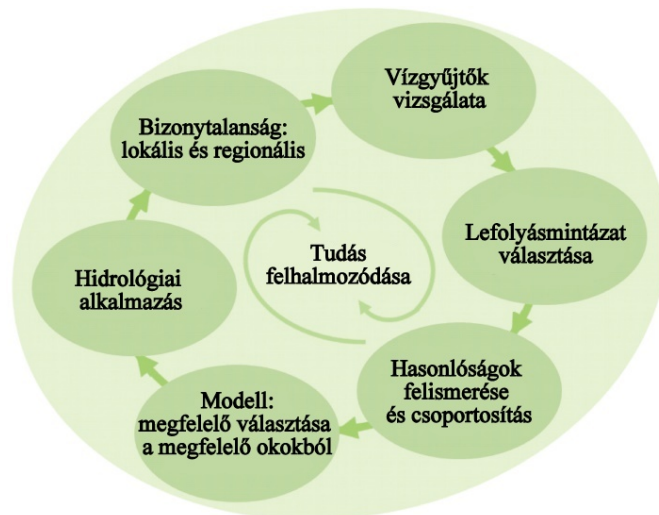
Fenti adatokon túl felhasználtam Kovács Ákos Domonkos doktori disszertációjában meghatározott havi tényleges párolgásösszegeket, melyek MODIS képek alapján kerültek számításra az egész ország területére 1 km x 1 km-es rácshálóban a 2000-2008-ig tartó időszakra (Kovács, 2011). Ezek az adatok képezték a viszonyítási alapot a modellezett párolgáshoz, valamint alapvetően ezen párolgás adatok képezték alapot az éves és havi mérlegszámításokhoz.

4. Lefolyás becslése

A modern hidrológia egyik legnagyobb kihívása a lefolyás becslése. A klímaváltozás következtében egyre szélsőséesebb időjárási körülmények hatására egyre szélsőséesebb lefolyáseseményekkel nézünk szembe, melyek a megfelelő módszerekkel diagnosztizálhatók és előrejelezhetők is lehetnek. A hidrológiában problémát jelent, hogy sok esetben csak tapasztalati képletek állnak rendelkezésre a mértékadó vízhozamok vagy a lefolyás becslésére (emellett persze vannak más jellemzők is, például az összegyülekezési idő, melyre különböző tapasztalati képletek kerültek megállapításra). Fontos lenne olyan átfogó módszer kifejlesztése a lefolyások becslésére, mely világszinten bárhol alkalmazható. A tudományágon belüli megosztottság mérsékli annak fejlődését. Az egységesen használható módszerek ugyanis elősegítik a világszintű együttműködést, ezzel a tudományág fejlődését is.

Ennek kapcsán készült el a *Runoff Prediction in Ungauged Basins - Synthesis across Processes, Places and Scales* című könyv, mely nagyszámú kutatócsoport eddig elért eredményeire épülve mutatja be a lefolyásbecslés lehetséges módjait. Az alkalmazott módszereken túl a területi és léptékbeli felosztás is ismertetésre kerül, a bemutatott esettanulmányok révén a könyv ajánlatot tesz a különböző módszerek alkalmazhatóságára. Emellett magában foglalja az alkalmazandó adatok minőségét, illetve ezek beszerzésére is ismertet olyan forrásokat, melyek bárki számára hozzáférhetők.

A könyv nagy hangsúlyt helyez a vízgyűjtők és lefolyási folyamatok hasonlóságainak megértésére. A 6. ábra szemlélteti, hogy miként fejlődött és fejlődhet a lefolyásbecslésről rendelkezésre álló tudás a könyvben leírtak hatására. A vízgyűjtők és a lefolyási folyamatok megismerésével csoportosíthatók a vízgyűjtők, majd alkalmazható egy megfelelőnek ítélt modell a megfelelő célra. Ennek alkalmazása után – amennyiben bizonytalanságok adódtak – előlről kezdődhet a folyamat a vízgyűjtők és lefolyási folyamatok újraértelmezésével. Tehát legfontosabb a könyvben leírtak alkalmazásához a vízgyűjtők és lefolyási folyamatok kellő mélységben történő megértése.

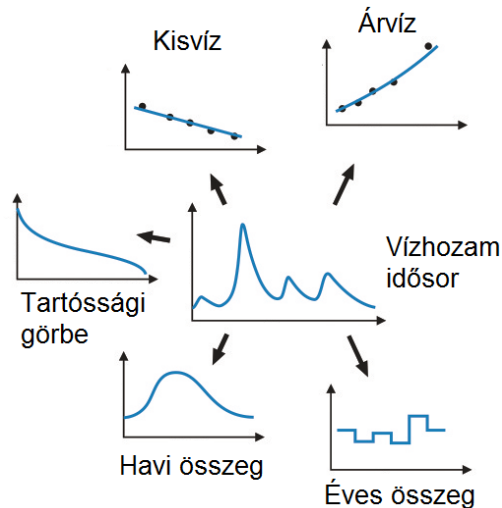


6. ábra: Tudásfelhalmozódás folyamata (Blöschl et al., 2013)

A hasonlóan viselkedő vízgyűjtők kiválasztásával lehetőségünk van arra, hogy mért vízgyűjtők adataiból következtetéseket vonjunk le nem mért vízgyűjtőkre is az adott régióban. Erre lehetőség van különböző léptékben térben és időben, valamint különböző módszerekkel. A következőkben a teljesség kedvéért röviden ismertetem a könyv által vázolt lehetőségeket, illetve azon részeket, melyeket jelen dolgozat készítésekor szándékom volt adaptálni.

A térbeli lépték alapvetően az alkalmazható módszereket és a vizsgálatokhoz beszerezhető adatokat befolyásolja. Minél nagyobb léptékben vizsgálunk vízgyűjtőket, annál több ingyenesen hozzáférhető és elegendően pontos adat áll rendelkezésünkre. A globálistól a kontinentálison át a regionális léptékig egyre pontosabb adatokra van szükség melyek egyre kevésbé hozzáférhetők. Az alkalmazható módszerek is máshogy teljesíthetnek a vizsgált adatbázis nagyságától függően. Fontos megjegyezni, hogy ugyan a regionális vizsgálatok tűnhetnek a leghasznosabbnak és legalapvetőbbnek, a hasonló vízgyűjtők globális szinten történő azonosításával vizsgálhatók lehetnek olyan elmaradott országok vízgyűjtői is ahol alig állnak rendelkezésre mért adatok. Ezzel az ismeretek globális terjedése segíthető elő.

Időbeli léptéken alapvetően a lefolyási adatok időbeli mintázatait értjük. Mért vízgyűjtők esetén előállíthatjuk a rendelkezésre álló idősorokból (nagyobbtól a kisebb felé haladva) az éves majd a havi lefolyást, a tartóssági görbét, valamint a nagyvízi és kisvízi statisztikákat (7. ábra). Az éves lefolyásmennyiség meghatározásával megállapíthatjuk, hogy mennyi víz áll rendelkezésre az adott vízgyűjtőn, ez előkészítő vizsgálatok végzéséhez is nagy segítséget nyújthat vagy alapja lehet egy vízgyűjtő vízkészlet-változási vizsgálatainak. Havi léptékkel vizsgálva a lefolyást már azt is megtudhatjuk, hogy az adott vízgyűjtőn jellemzően mikor áll rendelkezésre a legnagyobb vízmennyiség. Ez már a vízhasználati és vízgazdálkodási kérdésekre is választ adhat, segíthet megérteni a vízgyűjtőn zajló tározási folyamatokat. A tartóssági görbe illetve a kisvízi és nagyvízi statisztikák meghatározása már konkrét vízhasznosítási és vízgazdálkodási kérdésekre adhat választ. Segítséget nyújthat az árvízi tervezésben, vízerőművek és tározók tervezésénél vagy hajózhatósági kérdésekben is. Maga a lefolyás idősor is előállítható, melyből összes előbbi számítható, így ennek előállítása rendelkezik a legtöbb információval. Jelen dolgozatban az éves és havi lépték vizsgálata után kísérletet tettem vízgyűjtőmodellezés segítségével a teljes vízhozam idősor becslésére. A tartóssági görbével csak közvetett módon foglalkoztam (lásd 7.3 fejezet), a kisvízi és árvízi statisztikákra nem tértem ki.



7. ábra: Lefolyási mintázatok (Blöschl et al., 2013)

Az alkalmazható módszerek alapvetően két csoportra oszthatók; statisztikai, azaz nem fizikai alapú és folyamat alapú, azaz fizikai alapú módszerekre. Előbbiek közé tartozik a regresszióanalízis, geostatisztika, index-módszer, de felhasználhatók rövid, mért időszakok adatai is. Folyamat alapú módszernek számít a hosszú idejű lefolyás folyamatos modellezése vagy különböző hidrológiai jelenségek modelljeinek alkalmazása, melyek az egyes hidrológiai elemek közötti összefüggéseket fejezik ki (pl.: Budyko-görbe). Emellett lehetőség van közvetett kapcsolat alapján becsülni a lefolyást. Ekkor egy mért időszakra szükséges vizsgálni a kapcsolatot a lefolyás és egy másik elem között, majd a kapcsolat alapján kibővíthető a lefolyás idősor a mért időszak előtti évekre is. Erre példa az éves lefolyás összefüggése a fák évgűrűivel (NOAA Paleoclimatology, 2011).

Leírtak alapján látható, hogy nagy mennyiségben, igen komplex vizsgálatok végzésére van lehetőség a rendelkezésre álló adatok és elérni kívánt eredmények függvényében. A dolgozat a lefolyásmodellezés ilyen célú hazai alkalmazhatóságát hivatott vizsgálni, melynek előkészítéseként vizsgálja a vízgyűjtők éves és havi vízmérlegét a vízgyűjtőn zajló vízháztartási folyamatok megértésének érdekében.

5. Éves vízmérlegek vizsgálata

Vízgyűjtők hosszú idejű vízmérlegének elemei a csapadék, a lefolyás és a párolgás, melyek között az alábbi egyenlőség áll fent:

$$C = L + P \tag{1}$$

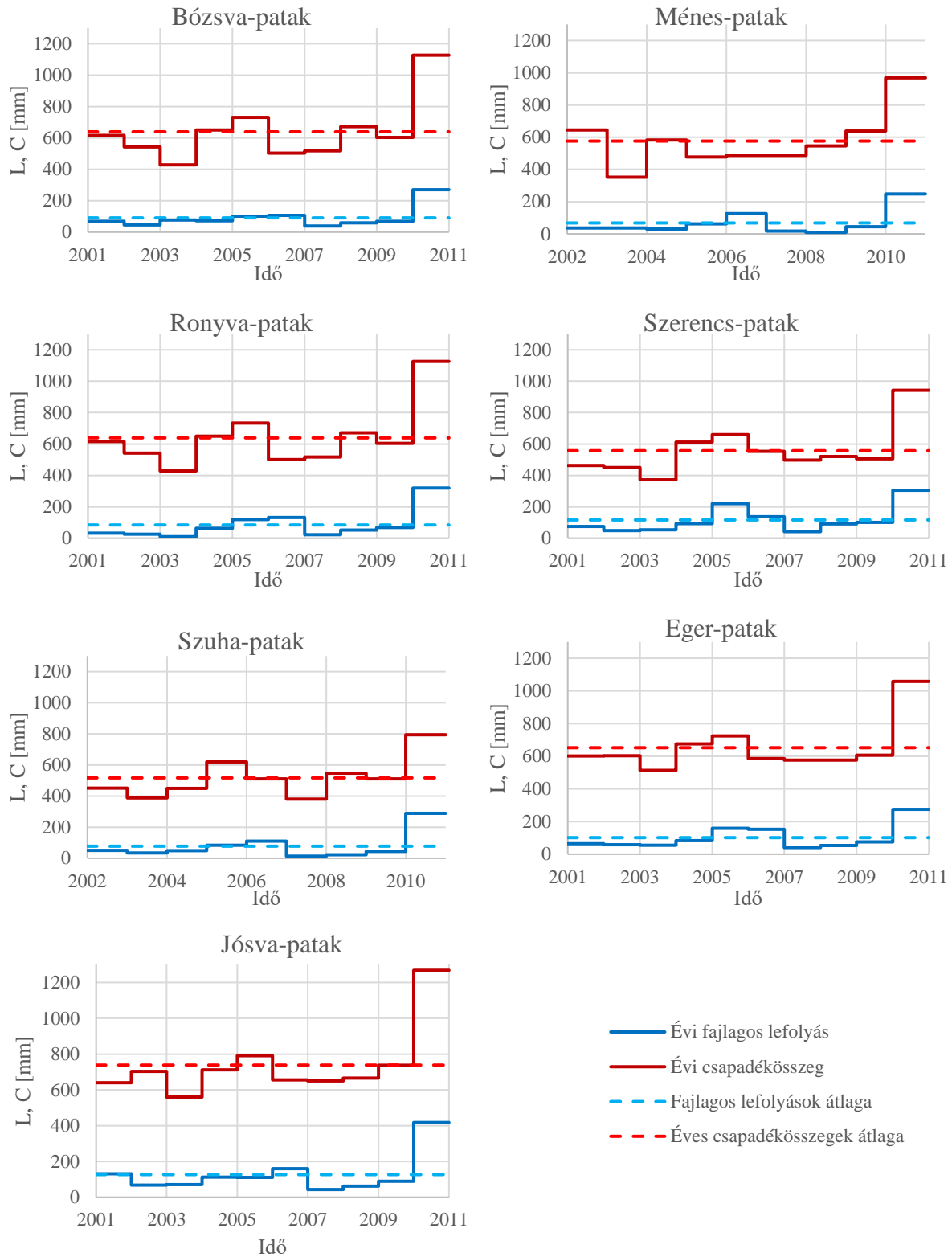
ahol

- C [mm] – éves átlagos csapadékösszeg;
- L [mm] – fajlagos lefolyás sokévi átlaga;
- P [mm] – éves átlagos tényleges párolgás.

Mindhárom mérlegelem számításra került a vizsgált vízgyűjtőkre. A csapadék és lefolyás adatok a mért napi idősorok alapján kerültek számításra. Az éves átlagos csapadékmennyiség az éves napi adatok összegzésével és azok átlagolásával került meghatározásra. A fajlagos lefolyás esetén a napi vízhozam idősor integrálásával megkaptam az éves lefolyó víztérfogatot, majd ezt normáltam a vízgyűjtők területével. Az éves tényleges párolgást a Kovács Ákos által meghatározott raszter formátumú térképekből határoztam meg. Ezek a térképek 2000-2008-ig minden hónapra rendelkezésre állnak, kivéve a téli hónapokat (december, január, február), mivel ekkor a párolgás mértéke elhanyagolhatóan alacsony. Mivel a vízgyűjtők súlypontjainak koordinátái ismertek, MATLAB segítségével automatizáltan lekérhetőek az adott ponthoz tartozó párolgásösszegek minden vízgyűjtőre. Ezen havi értékekből előállíthatók az éves párolgásösszegek majd ezek átlaga. Természetesen nem várható el a mért és számított adatok alapján a mérleg tökéletes zárása, mivel feltehetően mind a mért, mind a számított adatok hibával terheltek. Ezek alapján a mérleg 100 mm-en belüli zárását már elfogadhatónak tekintem. Későbbiekben szükség van az éves átlagos potenciális párolgás (P_0) értékére is, ez a hőmérséklet és páratartalom ismeretében Priestley-Taylor módszerrel került számításra (Priestley and Taylor, 1972). Az egyes mérlegelemeket és ezek alapján az mérlegegyenletben lévő hiányt/többletet a 3. táblázat tartalmazza, az éves lefolyás és csapadékösszegek alakulását az 8. ábra mutatja.

3. táblázat: Vízgyűjtők éves mérlege

	L [mm]	C [mm]	P [mm]	P_0 [mm]	Hiba [mm]	Hiba [%]
Bózsva	91	639	559	701	-11	-2
Ménes	68	576	522	707	-13	-2
Ronyva	84	639	588	705	-33	-5
Szerencs	116	558	554	699	-113	-17
Szuha	78	517	492	733	-53	-9
Eger	102	653	536	714	15	2
Jósva	127	738	498	697	114	18



8. ábra: Az éves lefolyás és csapadék alakulása az egyes vízgyűjtőkön

A táblázatból jól látható, hogy a kapott mérleg negatív és pozitív irányban is eltér a tökéletes egyensúlyi állapottól, valamint hogy két vízgyűjtőre nem érvényesül a 100 mm-es elfogadhatósági kritérium. Ennek oka a méréseket terhelő hibalehetőségekben kereshető. A vízhozam idősorok $Q-h$ görbéből származtatott idősorok, emiatt ezeket jelentős hiba terhelheti. A csapadék idősorok csak egy pontban állnak rendelkezésre, a csapadék területi eloszlása a vízgyűjtőn nincs figyelembe véve. Emellett kiemelendő, hogy az Eger-, Jósva- és Szerencs-patakok esetén a csapadék idősor forrása a CARPATCLIM modell, mely egy területileg átlagolt adatbázis. Ehhez mérten az Eger-patak vízmérlege kifejezetten jónak tekinthető, a Jósva- és Szerencs-patakoknál a nem megfelelő egyezés feltehetően a csapadékatadatoknak köszönhető. A tényleges párolgásösszegeket tekintve fontos megjegyezni, hogy ugyan rendelkezésünkre állt a teljes raszter állomány, a párolgásadatokat csak a vízgyűjtő súlypontjára kértük le ahelyett, hogy kiátlagoltuk volna a teljes vízgyűjtő területén található cellák értékeit. Ezen számítás pontosítására szükség lehet. Összességében azonban a mérlegek nem sokkal haladják meg a 100 mm-es elfogadhatósági határt és az eltérés nem éri el a 20%-ot. Legrosszabbul a Jósva-patak mérlege teljesít, legjobb egyezést a Bózsva-, Eger- és Ménes-patakoknál tapasztalhatunk.

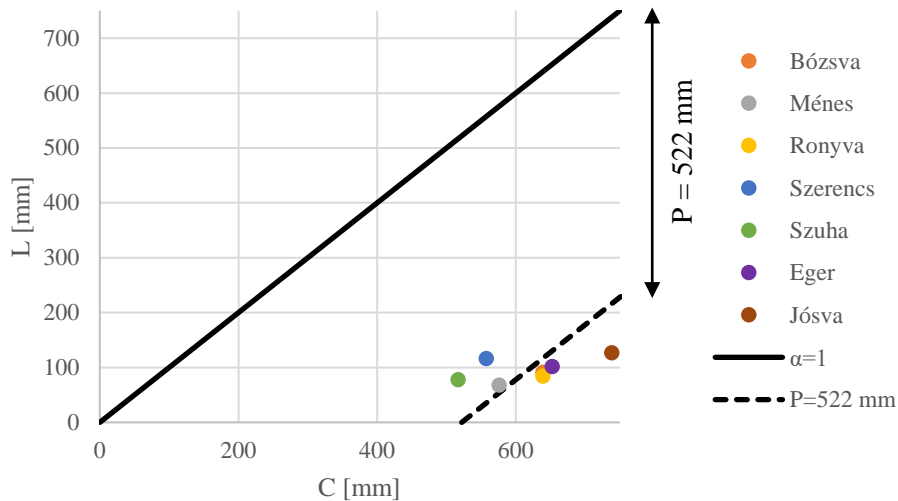
A vízgyűjtők vízháztartását jól tükrözi a lefolyó vízmennyiség és a csapadék aránya. A 8. ábrán látható, hogy a vizsgált időszakban száraz (2003) és csapadékos (2010) év is volt. Megfigyelhető az is, hogy az egyes vízgyűjtőket más lefolyási hányad jellemzi. Ennek kapcsán számításra került a lefolyási hányad és az ariditási tényező minden vízgyűjtőre (4. táblázat). Ezek összehasonlításra kerültek a Magyarország területére meghatározott sokéves átlagokkal (Kontur et al., 2003).

4. táblázat: Lefolyási hányad és ariditási tényező értékei

	Számított		Leolvasott	
	Lefolyási hányad α [-]	Ariditási tényező β [-]	Lefolyási hányad α [-]	Ariditási tényező β [-]
Bózsva	0.14	1.10	0.15	0.98
Ménes	0.12	1.23	0.20	0.90
Ronyva	0.13	1.10	0.15	0.98
Szerencs	0.21	1.25	0.15	0.92
Szuha	0.15	1.42	0.20	0.95
Eger	0.16	1.09	0.40	1.00
Jósva	0.17	0.94	0.25	0.85

A lefolyási hányad értékei néhány esetben jól közelítik a térképről leolvasott értékeket (Bózsva- és Ronyva-patakok), van azonban jelentős eltérés is (Eger-patak). A lefolyási tényező viszonylag gyakran használt tényező bizonyos hidrológiai számításokban (mértékadó vízhozamok számítása, árvízszámítás), emiatt fontos pontos ismerete. Szembetűnőbb az ariditási tényezők eltérése. A számított értékek rendre nagyobbak a Bózsva-, Ménes-, Ronyva-, Szerencs-, és Szuha-patakok esetében 1.00-nél, a térképről leolvasott értékek pedig rendre kisebbek. Ennek jelentősége, hogy míg a térképről leolvasott értékek alapján ezek a vízgyűjtők nedvesnek tekinthetők, a számított értékek alapján a száraz zónába tartoznak (lásd később Budyko-görbe).

Érdeemes ábrázolni továbbá a lefolyást a csapadék függvényében minden vízgyűjtőre (9. ábra). Ebben az esetben a 45°-os egyenestől való eltérés (vagyis attól az esettől való eltérés, amikor a lefolyás egyenlő a csapadékkal, tehát a lefolyási hányad $\alpha=1$) mutatja az evapotranspiráció mértékét. Ha az ábrázolt pontok illeszkednek egy egyenesre, mely párhuzamos a 45°-os egyenessel, a vízgyűjtőket a két egyenes közötti távolságnak megfelelő éves átlagos tényleges párolgás jellemzi, esetünkben ez 522 mm-nek felel meg (9. ábra), ami a 3. táblázatba foglalt párolgásértékek átlaga.



9. ábra: Fajlafos lefolyás sokéves átlaga az éves átlagos csapadék függvényében

Az éves léptékű vizsgálat részeként megvizsgáltam azt is, hogy az egyes vízgyűjtőkre kapott párolgás és csapadék értékek alapján azok pontjai illeszkednek-e a Budyko-görbére (Budyko, 1974). A görbe egyenlete a következő:

$$\frac{P}{C} = 1 - \exp\left(-\frac{P_0}{C}\right) \quad (2)$$

ahol

P [mm] – éves átlagos tényleges párolgás;

C [mm] – éves átlagos csapadékösszeg;

P_0 [mm] – éves átlagos potenciális párolgás.

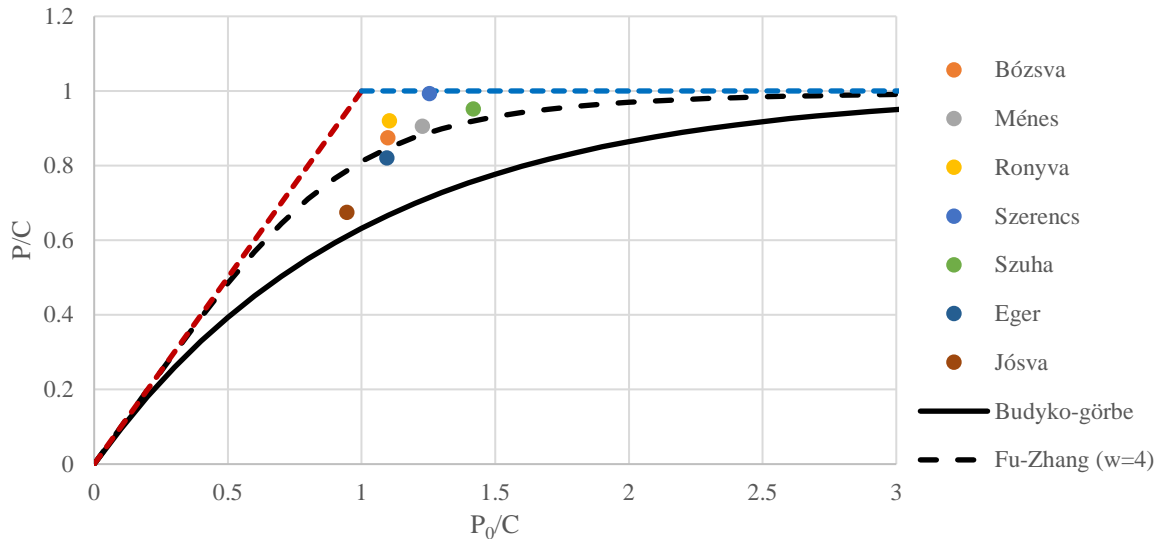
A görbe tulajdonképpen a nedves és száraz éghajlat közötti átmenetet írja le. Nedves éghajlat esetén a párolgás folyamata energialimitált, a tényleges párolgás közel egyenlő a potenciális párolgással. Száraz éghajlat esetén a párolgás mennyiségét a rendelkezésre álló vízmennyiség, vagyis a lehullott csapadék limitálja. Ekkor a tényleges párolgás mértéke már a lehullott csapadék mértékéhez közelít. Az általam vizsgált vízgyűjtők közül egyedül a Jósva-patak vízgyűjtője esik a nedves zónába. Ennek a vízgyűjtőnek a legnagyobb az éves átlagos csapadékmennyisége. A kapott pontok nem illeszkedtek a Budyko-görbére, azonban rendelkezésre állnak a szakirodalomban a görbe meghatározására más összefüggések is. Ezek közül alkalmaztam az alábbi összefüggést (Zhang et al., 2004):

$$F(\beta) = 1 + \beta - (1 + \beta^w)^{w^{-1}} \quad (3)$$

ahol

- β [-] – ariditási tényező;
 w [-] – görbe paramétere.

A görbe alakja a w tényező megválasztásától függ. A görbe annál jobban simul a határegyenesekhez, minél nagyobb w értéke. Ebben az esetben $w=4$ esetén kaptam a legjobban illeszkedő görbét (10. ábra).



10. ábra: Budyko-görbe

Fentiek alapján felvetődhet a kérdés, hogy mely ariditási illetve lefolyási tényezőket érdemes figyelembe venni. Lehetséges, hogy az évtizedekkel ezelőtt készített térképek olyan mérési/számítási módszerekre épültek, melyek nem adtak elegendően pontos eredményt. Azonban elképzelhető, hogy a klímaváltozás hatására az utóbbi évtizedben valóban megváltozott a vízgyűjtők vízmérlege.

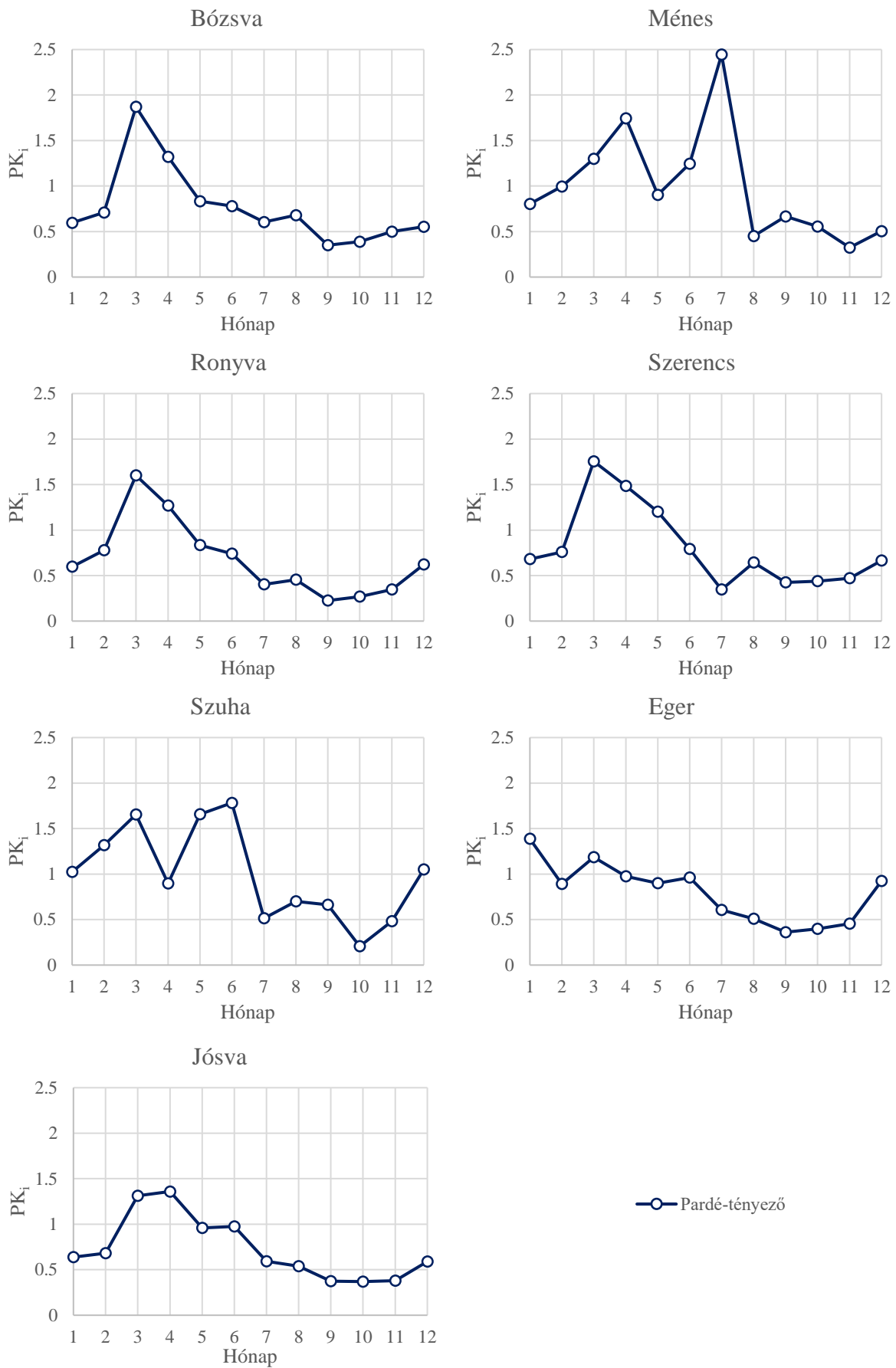
6. Havi vízmérlegek vizsgálata

Ezen vizsgálatok célja, hogy láthatóvá váljanak az éven belüli tározási folyamatok, illetve hogy jellemzően mely évszakban jelennek meg árvizek a vízgyűjtőn. Ennek kifejezésére ábrázolható a Pardé-tényező éves alakulása (11. ábra). Ez a tényező az adott havi átlagos vízhozam és az éves átlagos vízhozam hányadosa (Pardé, 1933):

$$PK_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}} \quad (4)$$

ahol

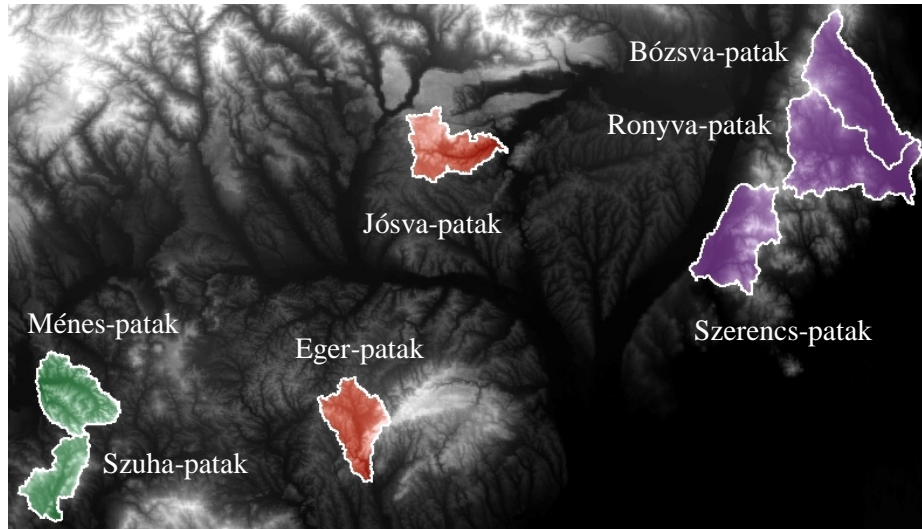
- PK_i [-] – az adott hónapra jellemző Pardé-tényező;
 Q_i [m³/s] – havi átlagos vízhozam;
 \bar{Q} [m³/s] – éves átlagos vízhozam.



11. ábra: Pardé-tényező éves alakulása

Fenti diagramok alapján 3 csoport hozható létre a következők szerint:

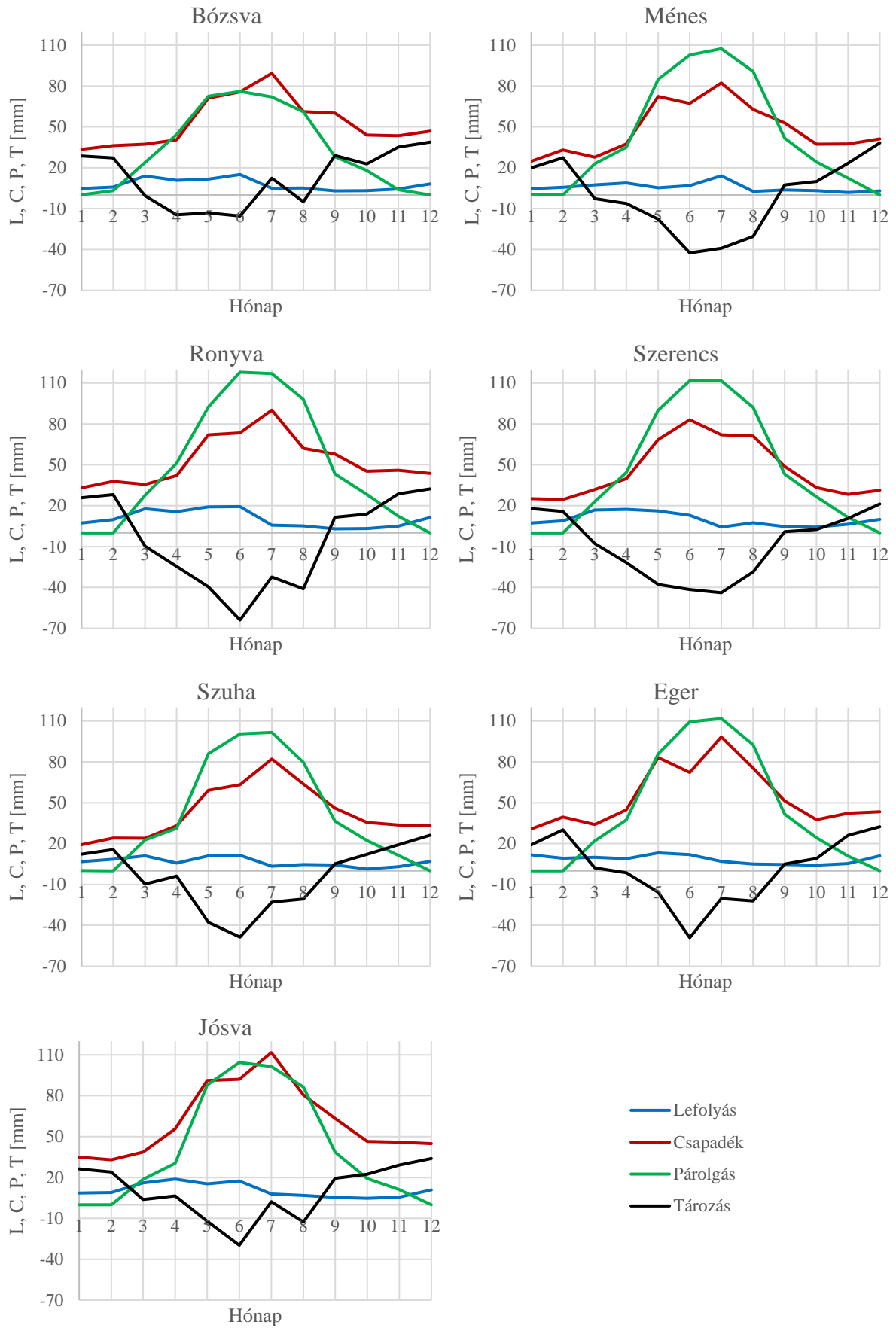
- 1) tavaszi áradások dominálnak, az őszi időszak pedig csapadékhiányos (Szerencs-, Bózsva-, Ronyva-patakok),
- 2) áradások tavasszal és nyáron is jellemzőek (Ménés-, Szuha-patakok),
- 3) egyenletesebb vízjárás, tavaszi hónapok vízben gazdagabbak, őszi hónapok vízben szegényebbek (Eger-, Jósva-patakok).



12. ábra: Vízyűjtőcsoportok

Ahogy az a 12. ábrán látható, ezek a csoportok területileg jól elkülönülnek egymástól. Ennek egyrészt magyarázata lehet az alapkőzet. A nyugati régióra a homokkő, a középsőre a mészkő, míg a keleti régióra a vulkáni alapkőzet jellemző. Emellett megfigyelhető hasonlóság, hogy a Bózsva-, Ronyva- és Szerencs-patakok hisztogramjai alakilag hasonlóak, ezek a vízyűjtők rendelkeznek a legnagyobb eséssel (5. ábra).

Következő vizsgálatként az ún. Wundt-diagramokat ábrázoltam minden vízyűjtőre (13. ábra). Ez a diagram a vízyűjtő hosszú távú mérlegelemeinek havi alakulását ábrázolja, a diagram tartalmazza azonban az éven belüli tározás alakulását is (Wundt, 1953).



13. ábra: Vízyűjtők Wundt-diagramjai

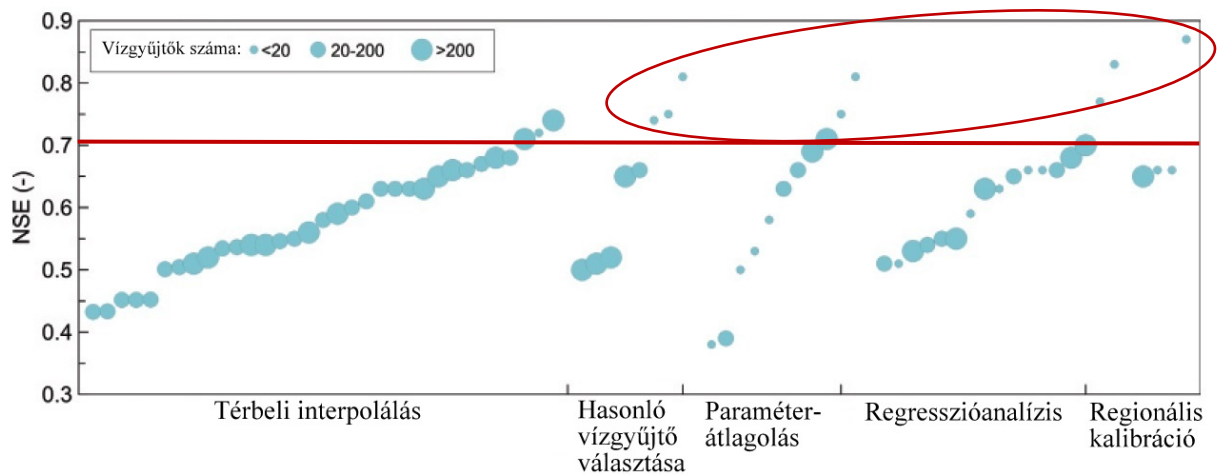
A talaj víztározásának éven belüli alakulása kevésbé eltérő, mint a Pardé-tényező alakulása. Bizonyos esetekben a tározás időszaka hosszabb és mértéke nagyobb, azonban általánosságban elmondható, hogy a talaj június környékén éri el a maximális kimerültséget és a téli hónapokban töltődik fel teljesen.

7. Vízhozam idősorok vizsgálata

Bemutatott vizsgálatok után és azok eredményeit szem előtt tartva következő lépésként egy-egy csapadék-lefolyás modellt állítottam fel minden vízgyűjtőre. Mivel a vizsgált időszak 9-10 év vízgyűjtőnként, hosszú idejű futtatások végzése szükséges. Normál esetben a modellt a vizsgált időszak első felére szükséges kalibrálni, második felére pedig validálni. Mivel azonban jelen esetben regionálisan alkalmazható modellegyüttes létrehozása a cél (amennyiben lehetséges), az egyes modelleket minden vízgyűjtőre, a teljes vizsgált időszakra szükséges kalibrálni. Ebben az esetben a keresztvalidációval lehet igazolni a modell működését. Eszerint sorra ki kell emelni a modellek közül egyet, melyet a többi modell paramétereinek valamilyen módon történő összevonásával újra felparáméterezünk. Ha az új paraméteregyüttesel végzett futtatások kellő egyezést mutatnak, a modell igazoltnak tekinthető. A paraméterösszevonás lehetséges módjai a következők:

- paraméterátlagolás: paraméterenként venni kell a kalibrált vízgyűjtők paramétereinek számtani átlagát;
- térbeli interpolálás: figyelembe veszi a vízgyűjtők elhelyezkedését egymáshoz képest a paraméterek átlagának képzésénél;
- regresszióanalízis: kapcsolatkeresés a kalibrált paraméterek és a vízgyűjtő jellemzői között – nem valószínű, hogy akad jó kapcsolat, a vizsgálat bonyolult a nagyszámú vizsgálandó elem miatt;
- hasonló vízgyűjtő kiválasztása: a leghasonlóbb kalibrált vízgyűjtő kiválasztása és annak kalibrált paramétereinek átvétele – legjobb egyezésre vezető módszer, alkalmazásához azonban a vízgyűjtők kellő mélységű ismerete szükséges;
- regionális kalibráció: olyan paraméteregyüttes keresése a régióra, mely minden vízgyűjtőre a legjobb egyezést adja – csapadék-lefolyás modellek esetén nem gyakran használatos módszer.

A csapadék-lefolyás modell folyamat alapú vizsgálati módszer, emellett a nem mért vízhozam idősor előállítására is léteznek statisztikai módszerek. Leginkább említésre méltó a Top-Kriging interpoláció, melyet már sikeresen alkalmaztak ilyen célból (Skøien et al., 2006). Ez a módszer azonban 2 mérőállomás/1000 km² felett teljesít megfelelő megbízhatósággal. Ez a kritérium jelen esetben nem teljesül. Összességében az is kijelenthető, hogy a statisztikai módszerek jobban teljesítenek az információban gazdag területeken, míg a folyamat alapú megoldások jobban alkalmazhatók a kevésbé mért területeken. Emellett az eddigi tapasztalatok azt mutatják (14. ábra), hogy a paraméterösszevonás módjai közül a hasonló vízgyűjtő választása, a regresszióanalízis és a paraméterátlagolás jól teljesít kisebb adatbázisok (<20 vízgyűjtő) esetén (Blöschl et al., 2013).



14. ábra: A Nash-Sutcliffe mutató alakulása különböző paraméterösszevonási módszerek és adatbázisméreték esetén

7.1 A csapadék-lefolyás modell bemutatása

A HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) csapadék-lefolyás folyamatok szimulálására kifejlesztett vízgyűjtő modellező szoftver, amelyet a HEC már több mint 30 éve fejleszt. Ezek a fejlesztések ugyanakkor bárki számára elérhetőek, ingyenesen és legálisan internetről letölthetőek.

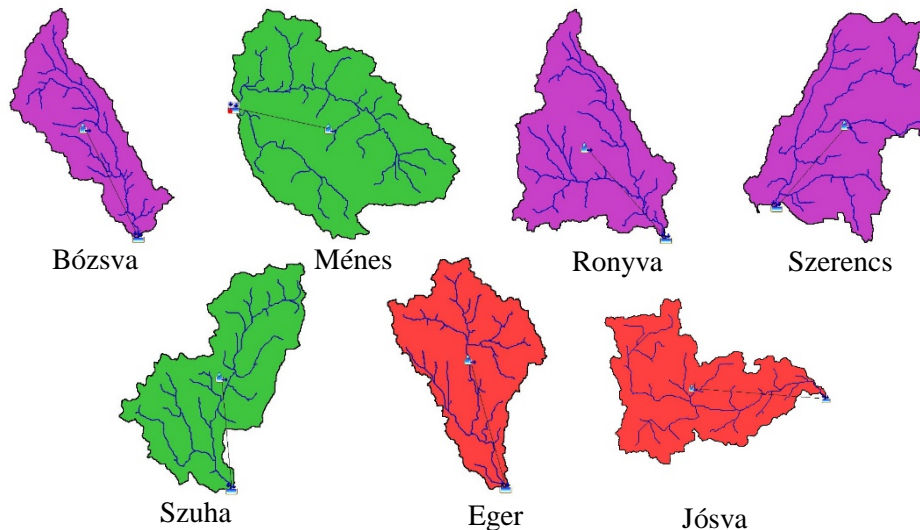
A HEC-HMS grafikus felhasználói felületet, saját adatbázis kezelőt valamint szöveges és ábrákkal illusztrált eredménykijelzést kínál a felhasználók számára. Fa alakú vízgyűjtő hálózattal rendelkező vízgyűjtő terület esetén rengeteg hidrológiai és hidraulikai számítási módszer közül választva szimulálható a csapadék-lefolyás folyamata. Ezen kívül a program segítséget nyújt a földhasználat változásának, urbanizáció vízgyűjtőre gyakorolt hatásának modellezéséhez; hidraulikai műtárgyak vízfolyást befolyásoló hatásainak vizsgálatához (építendő műtárgyak méretezéséhez); árhullám szimulációhoz; árvíz előrejelzéshez (Széles, 2011).

Ez a vízgyűjtőmodell determinisztikus, tehát nem rendelkezik véletlenszerű elemekkel, azonos paraméterekkel minden futtatás azonos végeredményre vezet. A modell emellett összevont paraméterű, vagyis nem diszkrét elemekre osztva kezeli a vízgyűjtőt, hanem egy-egy nagy egységre (részvízgyűjtőre) szükséges csak definiálni a paramétereket. A szoftver által alkalmazott számítási módszerek fizikai-alapúak, azaz nem tapasztalati módszerekre építenek (Nagy, 2016). A modellt már többször sikeresen alkalmazták hazai körülmények között is (Bene et al., 2015, Torma et al., 2014, Koch and Bene 2013).

7.2 Modell felépítése

A HMS modell fő részei a vízgyűjtőmodell, a meteorológiai modell, a futtatási paraméterek, és a bemeneti, illetve ellenőrző adatsorok. Emellett ki kell választani a futtatások végzésekor alkalmazott számítási módszereket.

A vízgyűjtőmodellt a 2.4 fejezetben leírtak szerint állítottam elő. A vízgyűjtőket nem osztottam egyik esetben sem részvízgyűjtőkre. A lehatárolt vízgyűjtőket az Országos Vízügyi Főigazgatóság adatbázisával vettem össze, az eltérés minimális volt. A vízgyűjtők modelljeit a 15. ábra szemlélteti.



15. ábra: Vízgyűjtőmodellek a HEC-HMS programban (csoportosítás a 12. ábra szerint)

A meteorológiai modellben szükség volt a csapadék mellett a párolgás és hóolvadás figyelembevételére, mivel hosszú idejű futtatások esetén ezen tényezők nem elhanyagolhatók. A hóolvadás és párolgás számítási mechanizmusát részletesen ismertettem korábbi dolgozatomban (Nagy, 2015). A potenciális párolgást a modell a Priestly-Taylor módszerrel számítja, a hóolvadás figyelembevételére a hőmérséklet index módszerrel van lehetőség.

A futtatások végzéséhez szükséges megadni a csapadék idősort [mm], valamint a hőmérséklet [°C] és nettó sugárzás [W/m²] idősorokat a potenciális párolgás számításához. Szükséges továbbá megadni az ún. növényi párolgási együttható éves alakulását is. Ez az arányszám megadja, hogy a növényzet által elpárologtatott vízmennyiség hogyan aránylik az éves átlagos potenciális párolgáshoz. Értéke a területet borító növényzet típusától függ. Esetemben lombhullató erdők a jellemzőek, így ennek a tényezőnek az értéke 0-1.5 között változik. Ezen értékeket hazai és külföldi szakirodalmak tanulmányozásával vettem fel (Koch, 2015, Rao et al., 2011). Utóbbi adatok mind napi léptékben kerültek megadásra. A hóolvadás számításához szükséges megadni egy ún. olvadási rátát is.

A modell összesen 7 hidrológiai elem figyelembevételére ad lehetőséget, ezek közül néhány alkalmazása opcionális. A különböző elemekre több számítási módszer is alkalmazható. Mivel a szoftver amerikai fejlesztésű, szükséges a módszerek körültekintő megválasztása az eltérő éghajlati és domborzati viszonyok miatt. A szoftver által kínált elemek a következők:

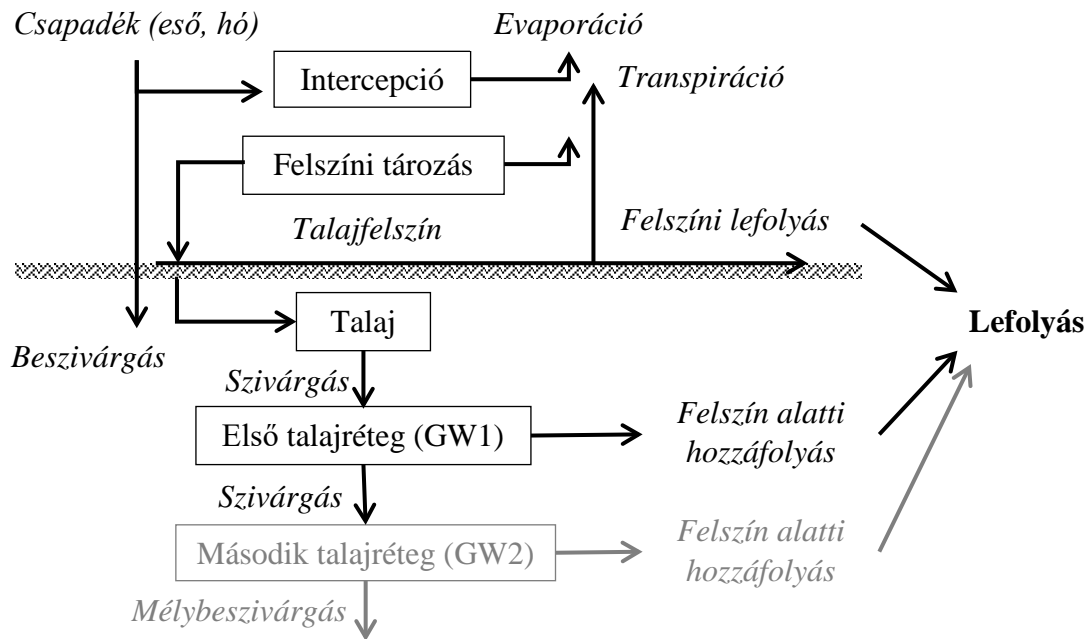
- növényzet vízfelvétele, párologtatása (Canopy),
- talajfelszín vízfelvétele, párologtatása (Surface),
- alsóbb talajrétegekbe beszivárgó vízmennyiség, veszteség (Loss),
- árhullám-transzformáció (Transform),
- alaphozam (Baseflow),
- mederbeli lefolyás késleltető hatása (Routing),
- meder szivárgási vesztesége (Loss/Gain).

A fenti elemek közül a meder szivárgási veszteségével és a mederbeli lefolyással nem számoltam, utóbbi elhagyása abból következik, hogy minden modell csak egy részvízgyűjtőből áll, vagyis nem kerültek definiálásra mederszakaszok.

A növényzet hatásának figyelembevétele az evapotranspiráció számítása miatt fontos, hiszen hosszú távú futtatás esetén jelentős a párologás szerepe a vízgyűjtők vízháztartásában (Feldman, 2000). Számítási módszernek a dinamikus módszert (Dynamic Canopy) alkalmaztam, mivel ez az egyszerű módszerrel (Simple Canopy) ellentétben figyelembe veszi a növényzet vízfelvevő-képességének alakulását a hónapok során. A számítási módszerhez szükséges megadni a növényzet kezdeti telítettségét [%], azt a csapadékmennyiséget, melyet a növényzet képes felvenni [mm], illetve egy függvényt, amely megadja, hogy miként változik a növényi párologási együttható havi szinten. Emellett be lehet állítani a növényzet vízfelvételének módját, melyet az SMA (Soil Moisture Accounting) modellhez javasolt ún. *tension reduction* módszernek választottam (Scharffenberg, 2016). Ennek a módszernek a lényege, hogy a növényzet a feszültség alatti zónából (melyből a nedvesség csak párologás útján távozhat) csak redukált mértékben veszi föl a nedvességet a gravitációs zónához képest (mely rétegből felszín alatti hozzáfolyásként is távozhat a nedvesség). Emellett beállítható, hogy a modell számítson párologást a csapadékos időszakok esetén is, ne csak a csapadékmentes időszakokban.

A talajfelszín párologtatásához szintén a kezdeti telítettség [%] és a talajfelszín által felfogható csapadékmennyiség [mm] megadása szükséges.

A veszteségek és a talajban történő szivárgások számításához a hosszú távú futtatáshoz javasolt SMA módszert használtam, mely a HMS-ben az egyetlen lefolyás számítási modell, mely két csapadék esemény között folyamatosan számítja a talajban tározott víz mennyiségét a szimuláció során. Adott csapadék, hőmérséklet és potenciális evapo-transpiráció esetén a modell számítja az ún. veszteségeket: felszíni lefolyást, tározást, az alsóbb rétegekbe történő szivárgást, felszín alatti lefolyást, elszivárgást. A csapadék útját a vízgyűjtőn át öt rétegre osztja; intercepció, talajfelszín tározás, talaj tározás, mélyebb talajrétegek tározása, mely két részre osztható. Az SMA modellt a 16. ábra mutatja be. A futtatások során ez az elem adja a legtöbb szabad paramétert. Szükséges megadni minden réteg kezdeti telítettségét [%]; az egyes rétegek tározási kapacitását [mm]; a felső talajréteg esetén azt a talajvastagságot, melyből csak evaporáció formájában távozhat a víz, tehát felszín alatti hozzáfolyást nem képez [mm]; az egyes rétegek közötti szivárgás sebességét [mm/óra]; a vízgyűjtőn található burkolt felületek arányát [%]; illetve a mélyebb rétegekre egy együtthatót, mely a víz továbbszivárgásának késleltetését határozza meg [ó]. A szabad paraméterek számának csökkentése érdekében két mélyréteg helyett csak egyet vettem figyelembe.



16. ábra: Az SMA modell elemei (Koch, 2015)

Árhullám-transzformáláshoz a Clark-féle transzformációs módszert alkalmaztam, mivel ehhez a módszerhez viszonylag kevés szabad paraméter tartozik. Szükséges az egyes vízgyűjtők összegyülekezési idejének meghatározása [óra] és egy tározási együttható megadása [óra].

Alaphozam számítására a lineáris tározási rendszert használtam, mely általában az SMA-val együtt alkalmazott. A lineáris tározó modellben a tározás időegység alatti megváltozása ($\Delta S/\Delta t$) megegyezik a belépő (I_t) és kilépő vízhozamok (O_t) különbségével;

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = I_t - O_t \quad (5)$$

A tározás és kifolyás között egyszerű lineáris kapcsolat áll fenn;

$$S_t = R * O_t \quad (6)$$

A (6) egyenletet a (5) egyenletbe behelyettesítve megkapjuk a lineáris tározási modellt:

$$Q_t = C_A * I_t + C_B * Q_{t-1} \quad (7)$$

ahol C_A és C_B együtthatók, melyek segítségével, illetve a rendszerbe beérkező pillanatnyi vízhozam alapján a rendszert elhagyó vízhozam megállapítható.

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5 * \Delta t} \quad (8)$$

ahol

Δt [nap] – a számítási lépcső ideje;

R [nap] – a lineáris tározó együttható.

$$C_B = 1 - C_A \quad (9)$$

Az alaphozam meghatározásánál szintén két talajréteg adható meg, a szabad paraméterek csökkentése érdekében azonban ez esetben is csak egy réteget vettem figyelembe.

7.3 Kalibrálás

A modellek kalibrálása alapvetően a mért vízhozam idősorokra történik. A kalibráció során azonban figyelemmel kísértem azt, hogy a modell által számolt tényleges párolgás közelíti-e a már elemzett éves tényleges párolgásösszegeket. Mivel a párolgásösszegek havi átlaga is rendelkezésemre állt, a növényi párolgási együttható változtatásával kalibrálni tudtam a modellezett havi párolgásösszegek alakulását is. Emellett vizsgáltam az integrálgörbékét, valamint az eloszlásfüggvényeket, hiszen a modellezés célja, hogy statisztikailag reprezentatív módon tudjuk reprodukálni a valós vízhozam idősort.

A kalibráció során meglehetősen sok a szabad paraméter, melyek ráadásul erősen hatnak is egymásra. A meghatározandó paramétereket az 5. táblázat tartalmazza. Dőlt betűvel jelöltem azon paramétereket, melyek majd a kalibráció végeredményeként feltüntetésre kerülnek. Többi paraméter vagy számított, vagy valamilyen megfontolásból egységesen lett felvéve.

5. táblázat: Az alkalmazott csapadék-lefolyás modell paraméterei

Számítási metódus	Paraméter megnevezése	Mértékegysége
Növényzet	Maximális tározás	mm
	Kezdeti telítettség	%
	Növényi tározási együttható	-
Talaj	Maximális tározás	mm
	Kezdeti telítettség	%
Beszivárgás, veszteség	Talaj kezdeti telítettsége	%
	Mélyebb talajréteg kezdeti telítettsége	%
	Maximális beszivárgás a talajba	mm/óra
	Burkolt felületek aránya	%
	<i>Talaj tározási kapacitása</i>	mm
	Ebből felszín alatti hozzáfolyást nem képez	mm
	Szivárgási sebesség a talaj és a mélyebb talajréteg között	mm/óra
	Mélyebb talajréteg tározási kapacitása	mm
	<i>Elszivárgás sebessége a mélyebb talajrétegből</i>	mm/óra
	Mélyebb talajréteg tározási tényezője	óra
Árhullám-transzformáció	Összegyülekezési idő	óra
	Tározási együttható	óra
Alaphozam	Kezdeti alaphozam	m ³ /s
	Alaphozam időtényezője	óra
	Tározók száma	db

Az árhullám-transzformáció két paramétere számítható, a két érték közötti összefüggés az alábbi:

$$S_c = c * T_c \quad (10)$$

ahol

S_c [óra] – tározási tényező;

T_c [óra] – összegyülekezési idő;

c [-] – arányossági tényező, mely a területhasználattól függ. Városi környezet esetén $c=1,1-2,1$, erdős terület esetén $c=8-12$ (Straub at al., 2000).

Az összegyülekezési idő értékét Temez összefüggése alapján számítottam (Temez, 1978, Mata-Lima et al., 2007), mely megelőző vizsgálataim alapján közelebbi egyezést adott a modellben kalibrált értékekkel, mint a Wisnovszky-képlet (Nagy et al., 2016). A használt összefüggés:

$$T_c = 0.3 * \left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.76} \quad (11)$$

ahol

T_c [óra] – összegyülekezési idő;

L [km] – leghosszabb lefolyási úthossz;

S [-] – vízgyűjtő átlagos esése.

Emellett számítható a burkolt felületek aránya is, melyet a lakott terület harmadának felételeztem. A tározási tényező számításához szükséges c tényező értékét a fent megnevezett 1.1-12 határok között vettem fel az erdős terület arányának függvényében. A számítást és eredményét a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat: Összegyülekezési idő és tározási tényező számítása

Vízfolyás	Erdős terület [%]	c [-]	Leghosszabb lefolyási úthossz [km]	Esés [-]	T_c [óra]	Tározási tényező [óra]	Lakott terület [%]	Burkolt felületek aránya [-]
Bózsva	3	1.5	27.9	0.024	7.6	11.1	0.6	0.2
Eger	47	6.3	24.0	0.010	8.1	50.8	7.5	2.5
Jósva	55	7.1	31.0	0.014	9.1	64.8	1.6	0.5
Ménés	28	4.1	23.0	0.008	8.2	33.7	8.9	2.9
Ronyva	5	1.6	40.5	0.010	12.0	19.5	2.8	0.9
Szerencs	1	1.2	26.7	0.023	7.4	8.7	3.0	1.0
Szuha	76	9.4	21.0	0.010	7.3	68.6	3.7	1.2

A számított paraméterek mellett a kezdeti értékeket is felvettem, minden kezdeti telítettségi százalékot zérusnak tekintettem. A növényzet és a felszín tározási kapacitását 5-5 mm-nek választottam. A kezdeti alaphozamot a mért adatok alapján vettem fel az idősor első vízhozamértékével egyezőre. Ezek után már csak az alaphozam és az SMA paraméterei közül maradtak kalibrálhatók, azonban ez továbbra is **9 kalibrálandó paramétert** jelent.

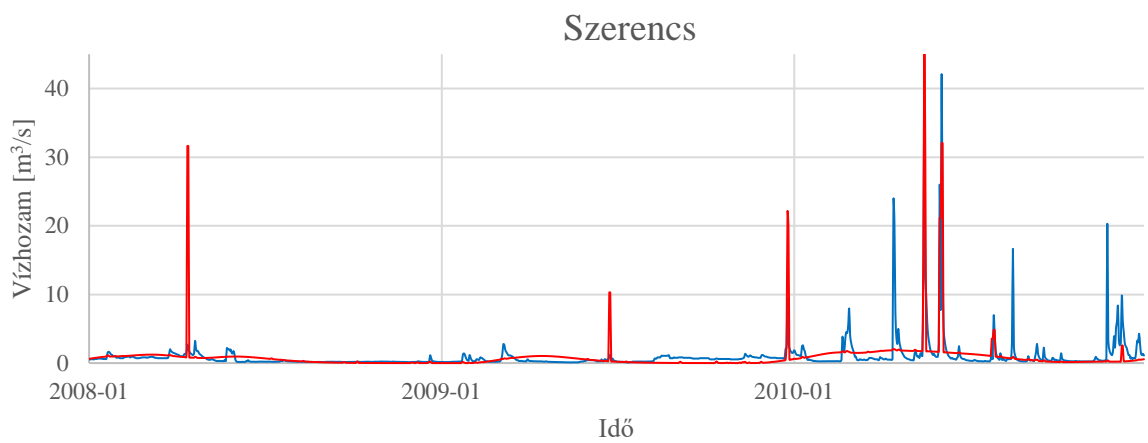
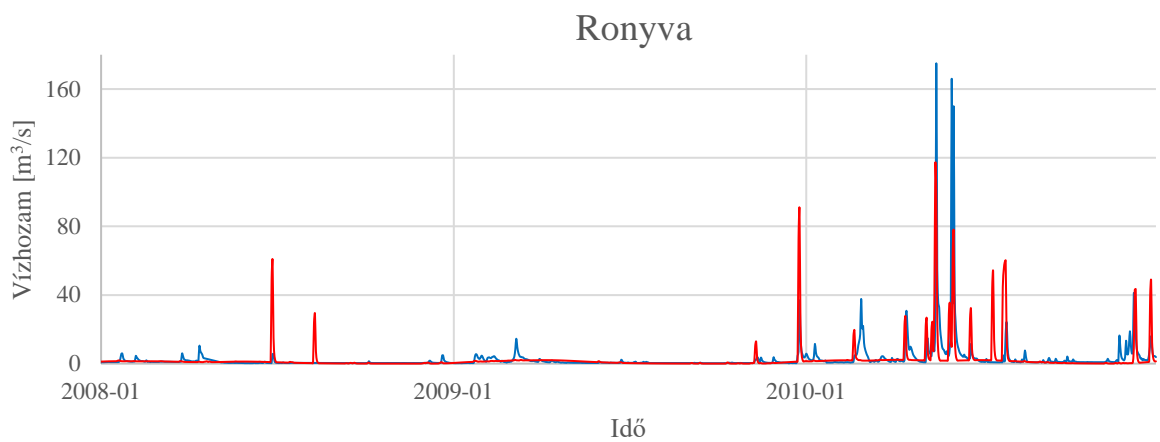
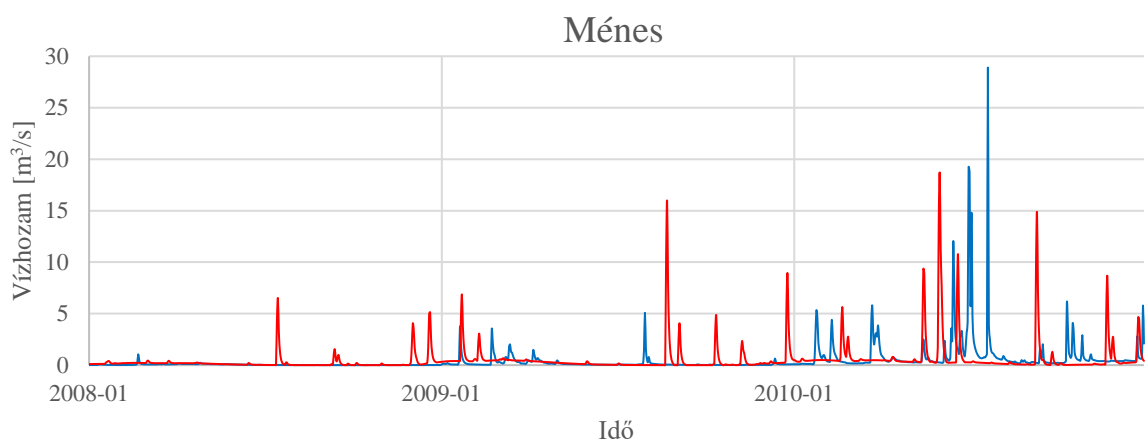
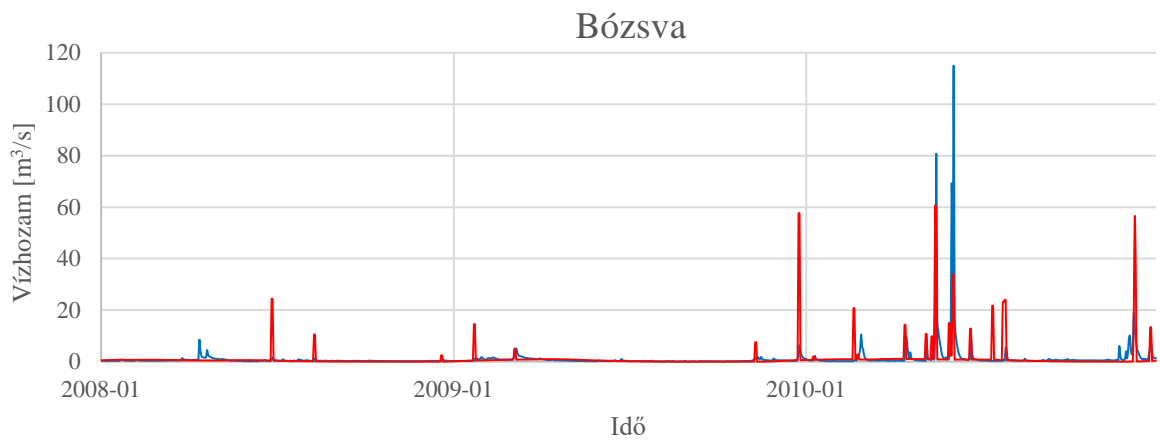
Továbbiakban regionális parametrizációra törekedtem. Ez meglehetősen időigényes és bonyolult, iterációs folyamat, végeredményként azonban mindössze két olyan paraméter maradt, mely eltérő az egyes vízgyűjtők esetén.

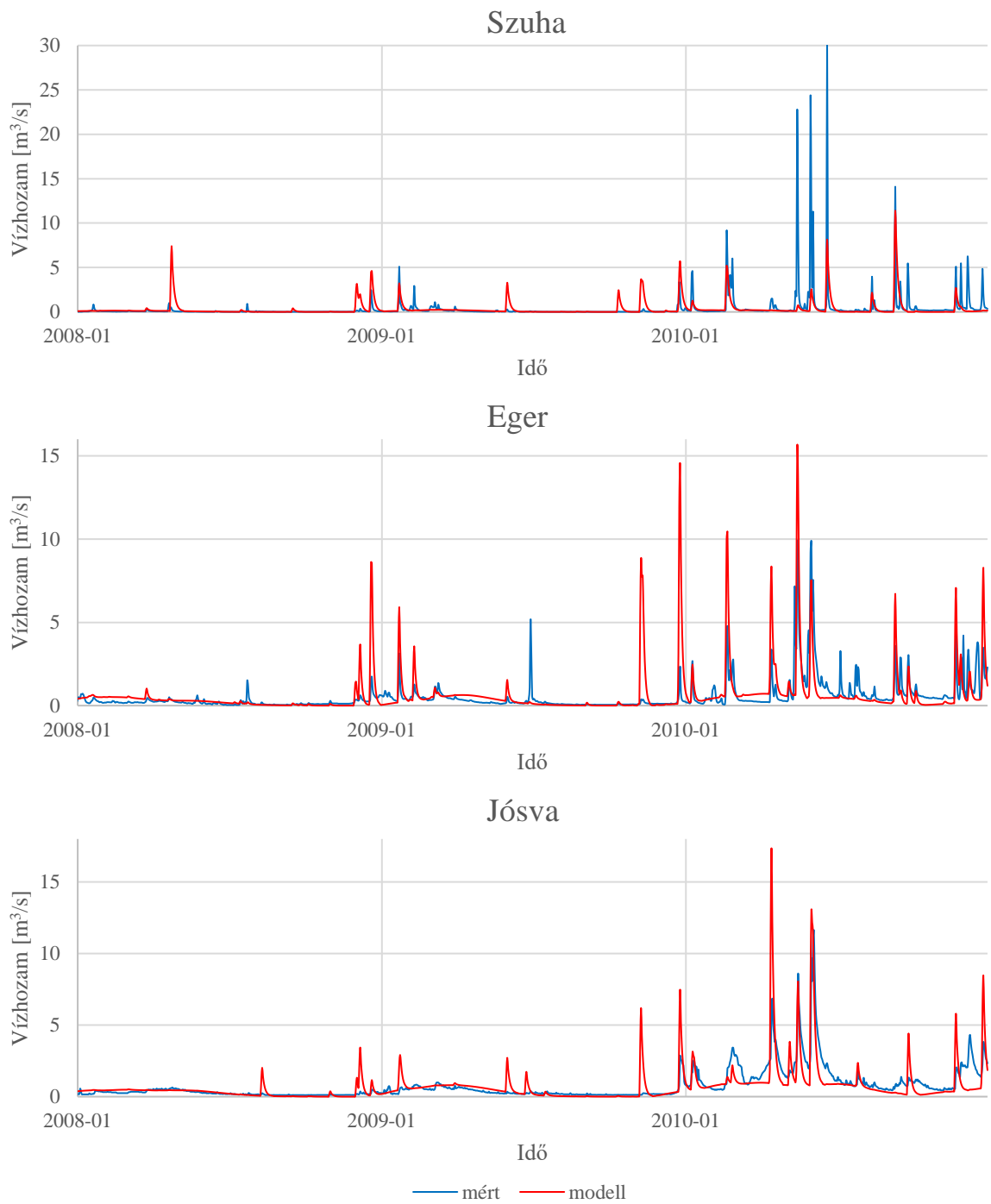
Elsőként az alaphozam esetén határoztam meg az alaphozam időtényezőjének és a tározók számának optimális értékét. Így az alaphozam időtényezője 400 órára, a tározók száma 4 db-ra adódott. Az alaphozam bizonyos esetekben jobban közelíthető lenne különálló paraméterek beállításával, azonban az eloszlás tekintetében ezen értékek esetén kaptam a legoptimálisabb eredményt.

Az SMA modellben vannak paraméterek, melyek változtatása közel ugyanazt a változást eredményezi a modellezett vízhozam idősorban. Ebből kifolyólag több olyan paraméterkombináció is előállhat, melyek ugyanazt a modellezett vízhozam idősort eredményezik. A kalibrált modellek jobb összehasonlíthatósága érdekében ezen paraméteregyütteseknek fixáltam bizonyos elemét/elemeit, úgy hogy ezután egy paraméter változtatásával érjem el a kívánt eredményt. Az egyik ilyen paramétercsoport a két szivárgási tényezőt és a talaj tározási kapacitását tartalmazza, a másik paramétercsoport az alsó talajréteg három paraméterét. Előbbi esetben a talajba történő maximális beszivárgás mértéke 0.7 mm/órára, a talaj és a mélyebb réteg közötti szivárgás mértéke 1.5 mm/órára adódott úgy, hogy a modellezett eredmények alapján fokozatosan közelítettem egymáshoz a beállított paraméterek értékeit. Végül a talaj tározási kapacitásával tudtam jól közelíteni az vízhozam idősor ingadozásának mértékét, vagyis azt, hogy mekkora felszíni lefolyások keletkezzenek. A másik paraméteregyüttes esetében az alsó talajréteg vastagságát 30 mm-re, tározási tényezőjét 200 órára vettem fel. Így a felszín alatti lefolyást képző vízmennyiséget az elszivárgás mértékével tudtam befolyásolni.

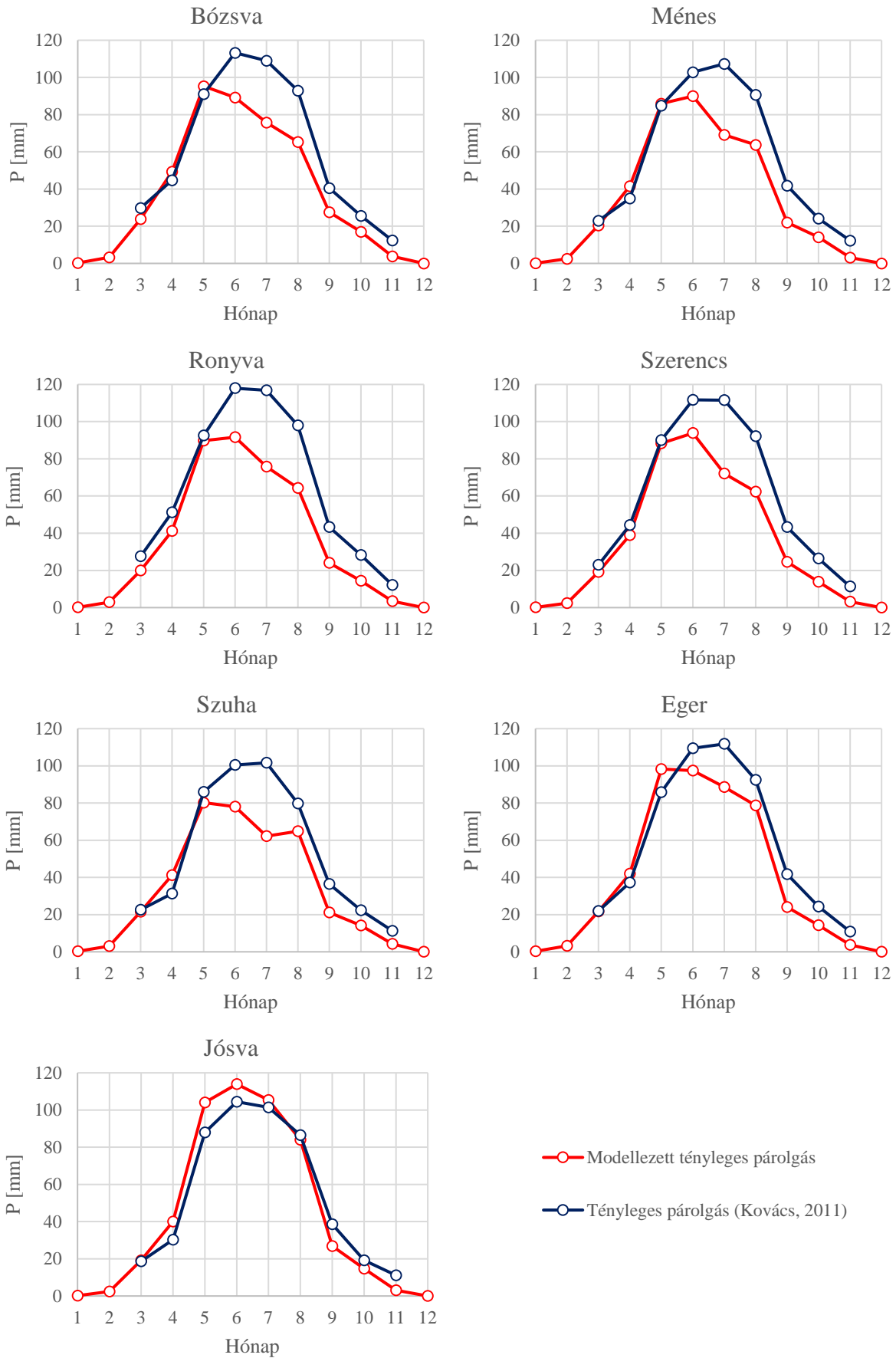
Annak a talajrétegnek a vastagságát, melyből csak párolgás útján távozhat a nedvesség, az éves tényleges párolgásösszeg alapján állítottam be. 80 mm esetén minden vízgyűjtőn kellő mértékűnek adódott a párolgás.

A kalibráció eredményeként a vízhozam idősorok és a havi tényleges párolgásösszegek alakulása kerül bemutatásra a 17. és 18. ábrán. A jobb láthatóság érdekében csak a 2008-2010 évekre ábrázoltam a vízhozamok idősorait, mely időszak csapadékos és száraz évet is magába foglal. (A teljes vízhozam idősorokat az 1. számú melléklet tartalmazza.)





17. ábra: Mért és modellezett vízhozam idősorok (2008-2010)



18. ábra: Tényleges párolgások átlagos havi összege

A 17. ábrán jól látható, hogy a modellel jól közelíthetők a lefolyási mintázatok. Az alaphozamok kielégítőbben közelíthetők, mint a felszíni lefolyásból keletkező árhullámcsúcsok. Ennek több oka lehet. Egyrészt a mért csapadékadatok nem feltétlen tökéletesen reprezentatívak a vízgyűjtőkre nézve, egyes csapadékesemények korábban vagy később jelentkezhetnek a mért adatsorban, mint az általuk okozott árhullámok. Pontatlanság forrása továbbá, hogy a legtöbb esetben nem álltak rendelkezésre pontos, mért hőmérséklet adatsorok, ezáltal feltehetően sok, olvadásból keletkező árhullám nem jelenik meg a modellezett eredményekben. Ez a legtöbb adatsornál 2006 januárjában volt jellemző, ekkor feltehetően volt egy erős enyhülés, ami az általam beszerzett idősorokban nem tükröződik. Szintén hibaforrás lehet a Vízügyi Igazgatóságok által alkalmazott $Q-h$ görbék pontossága, korábban már volt példa arra, hogy a levonuló tetőző vízhozamokat jelentősen túlbecsülték (Széles et al., 2013). Utóbbi révén lehetséges, hogy a 2010-es év árhullámain sok esetben nem közelíti meg a modell. A kapott párolgás értékeknél pedig minden esetben a nyári maximumokat nem tudja kellően közelíteni a modell, ez azonban nem okoz elfogadhatatlanul nagymértékű eltérést.

A modell jóságának vizsgálatára a szokványos statisztikai mutatókként csak az átlag, a maximum és a szórás értékét vizsgáltam, emellett az integrálgörbék és eloszlásfüggvényeket ábrázoltam, mivel alapvetően az a célom, hogy a modellezett idősor a mért vízhozam idősort mennyiségileg és statisztikailag jól közelítse. Az eloszlásfüggvények alapján meghatároztam az egyes előfordulási valószínűségekhez (1-10-50-90 %) tartozó mértékadó vízhozamokat is (8. táblázat). A statisztikai jellemzőket a 7. táblázat tartalmazza. Az integrálgörbék és eloszlásfüggvényeket a 19. és 20. ábra szemlélteti.

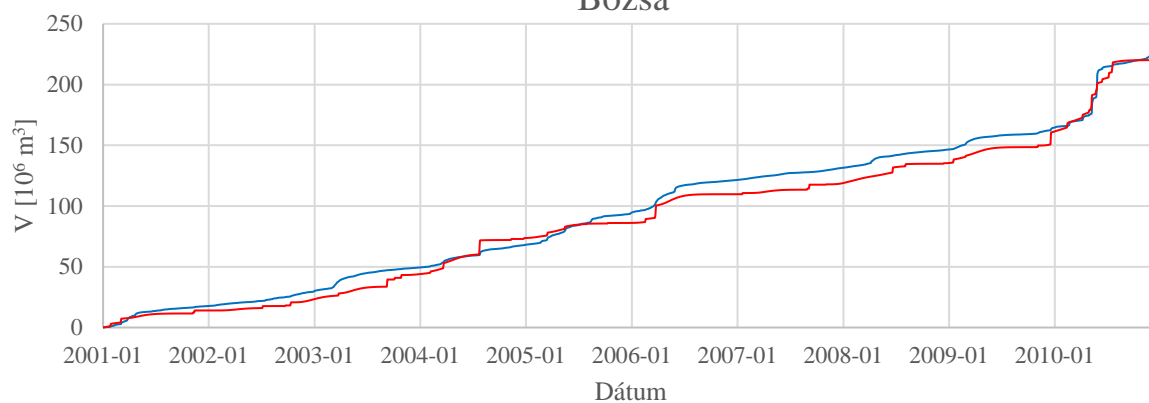
7. táblázat: Modellezett és mért vízhozam idősorok statisztikai jellemzői

	Átlag		Maximum		Szórás	
	Mért	Modell	Mért	Modell	Mért	Modell
Bózsva	0.74	0.74	115	60	2.83	3.46
Ménes	0.30	0.30	29	19	1.01	1.04
Ronyva	1.53	1.49	175	121	5.65	6.27
Szerencs	0.67	0.63	42	45	1.73	2.33
Szuha	0.24	0.23	30	18	1.07	0.93
Eger	0.40	0.40	10	15	0.69	1.01
Jósva	0.50	0.47	12	17	0.71	0.90

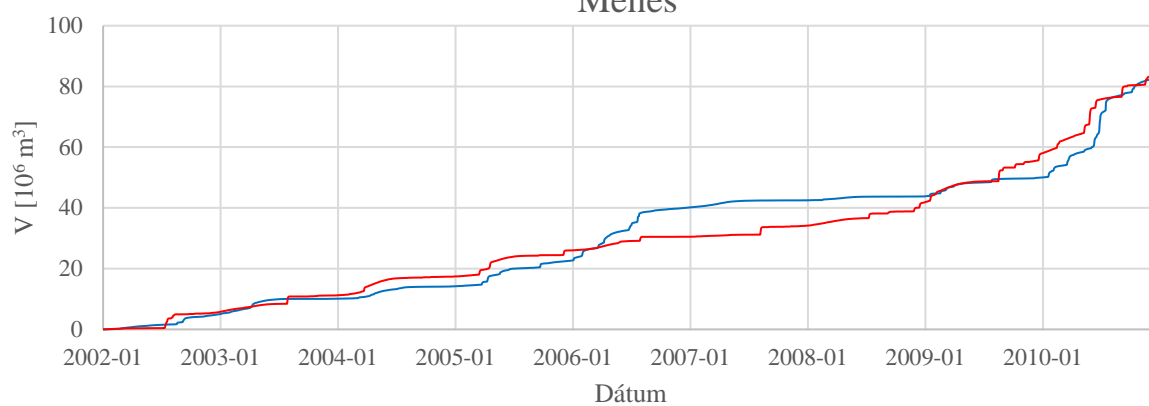
8. táblázat: Mértékadó vízhozamok a modellezett és mért vízállások esetén

	Q _{1%} [m ³ /s]		Q _{10%} [m ³ /s]		Q _{50%} [m ³ /s]		Q _{90%} [m ³ /s]	
	Mért	Modell	Mért	Modell	Mért	Modell	Mért	Modell
Bózsva	6.10	14.49	1.25	0.85	0.36	0.21	0.17	0.00
Ménes	3.88	5.22	0.51	0.45	0.10	0.07	0.01	0.00
Ronyva	15.38	26.42	1.80	1.89	0.69	0.54	0.09	0.01
Szerencs	5.11	4.29	1.35	1.23	0.25	0.22	0.16	0.00
Szuha	3.96	4.40	0.35	0.27	0.06	0.03	0.01	0.00
Eger	3.37	5.50	0.79	0.65	0.22	0.16	0.07	0.01
Jósva	3.25	4.28	1.00	0.95	0.26	0.27	0.13	0.01

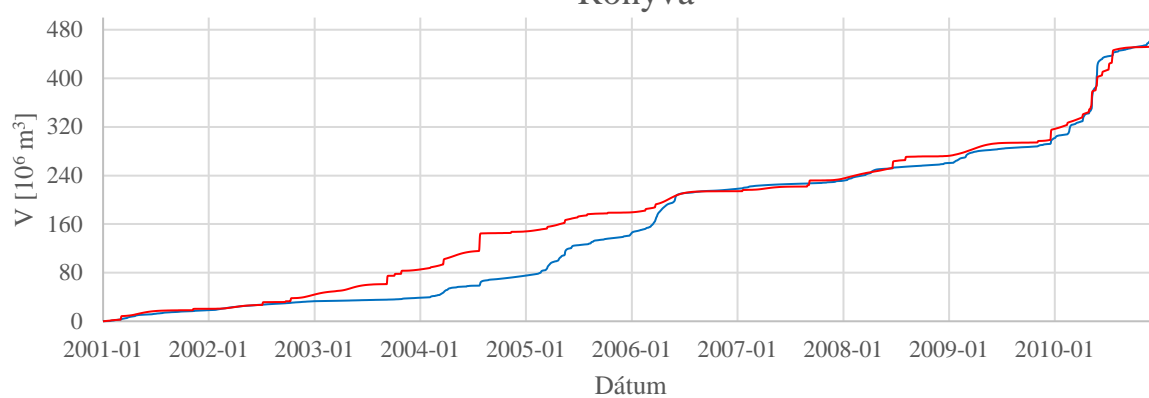
Bózsa



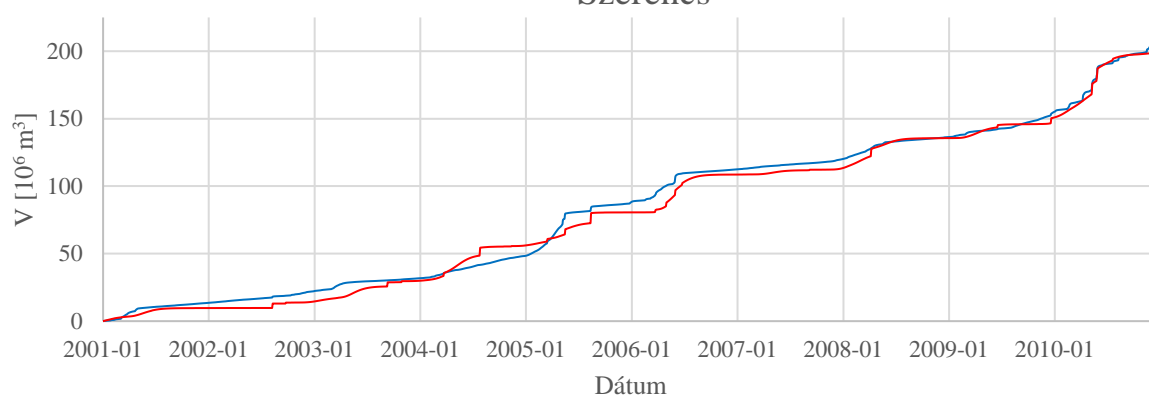
Ménés

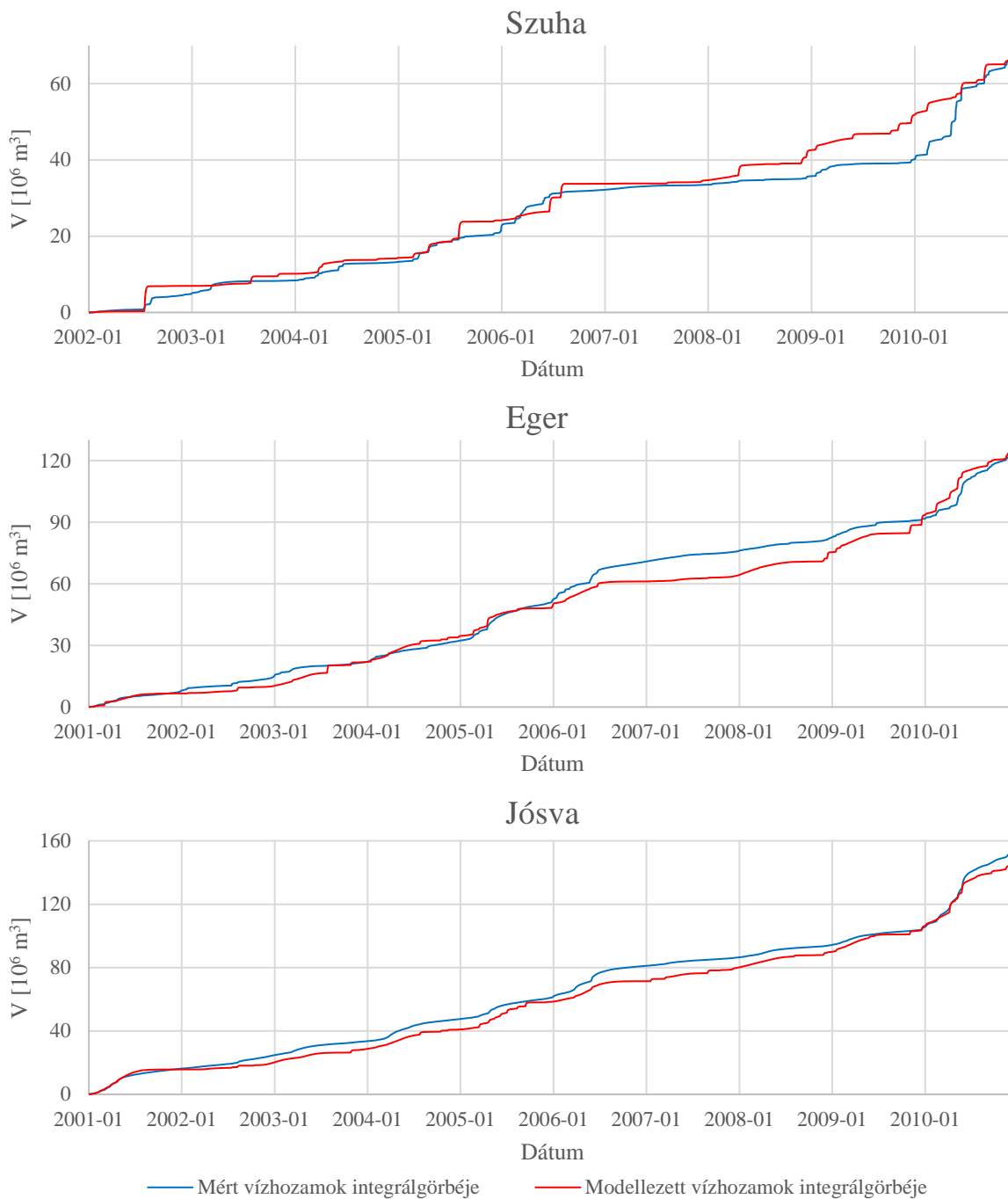


Ronyva

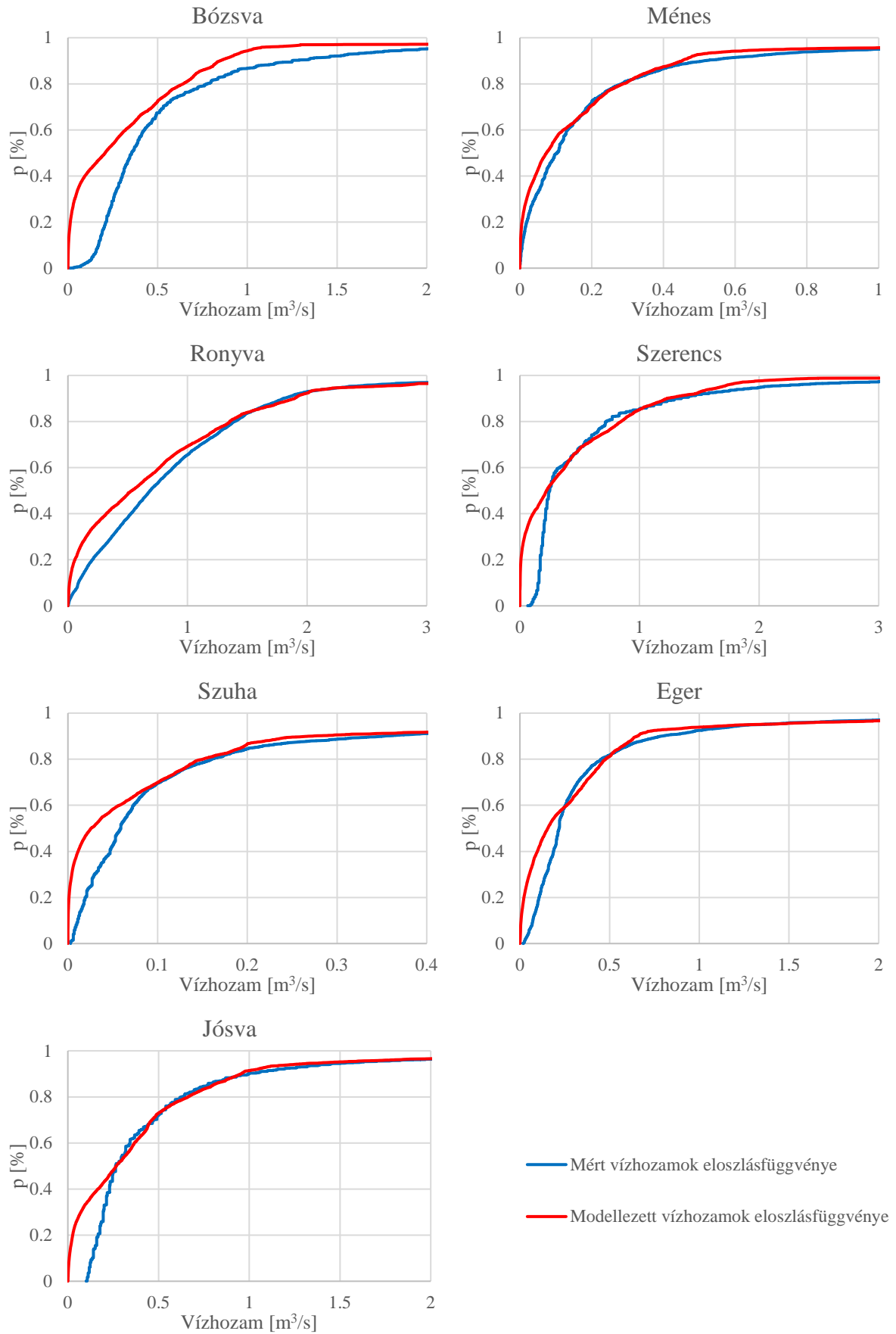


Szerencs





19. ábra: Modellezett és mért vízhozamok integrálgörbéi



20. ábra: Eloszlásfüggvények a mért és modellezett vízhozamok esetén

A 19. ábrán látható, hogy a sokéves mérleg minden esetben közel ugyanakkora lefolyó vízmennyiséggel zár a mért és a modellezett vízhozamok esetén. Az integrálgörbéken is jól láthatók azok az időszakok, amikor a modellezett vízhozamokból elmaradnak a hóolvadásból keletkezett árhullámok. Az eloszlásfüggvényeken látható (20. ábra), hogy az alsó vízhozamtartomány különösebben nem közelíthető jól a modellezett értékekkel. Ennek hátterében az áll, hogy a megfelelő mennyiségű modellezett tényleges párolgás csak úgy érhető el, ha a talajnak azt a rétegvastagságát, melyből csak párolgás útján távozik a nedvesség, kellően vastagra vesszük. Ugyanis a modellezett tényleges párolgást utóbbi paraméteren felül csak a növényzet tározásával vagy a növényi párolgási tényező változtatásával lehet érdemben befolyásolni, azonban ezeknek nem ildomos meghaladni az elméleti maximumát (ami a növényzet tározását tekintve 5-6 mm, a párolgási tényezőt tekintve 1.5 körüli). A tározási réteg vastagságának növelésével azonban a párolgás az alaphozam „kárára” következik be, ez abban nyilvánul meg, hogy a zérus és ahhoz közeli vízhozamértékek gyakorisága a modellezett vízhozam idősorban megnő, a modell sok esetben teljesen elpárologtatja az alaphozamot a száraz, nyári időszakokban. Utóbbi eltérések a meghatározott mértékadó vízhozamok esetén is tükröződnek (8. táblázat). Mindemellert az eloszlásfüggvények a legtöbb esetben kielégítően kerültek közelítésre. A statisztikai jellemzőkből (7. táblázat) is tükröződik, hogy az alaphozamokat jól tudtam közelíteni, míg a tetőző vízhozamokat kevésbé. Ez abban nyilvánul meg, hogy az átlagok közel egyezők a maximum értékek azonban bizonyos esetekben erősen eltérnek.

A kalibrált paramétereket az egyes vízgyűjtőkre a 9. táblázat tartalmazza, a növényi párolgási tényező éves kalibrált alakulása a 21. ábrán látható.

9. táblázat: Kalibrált paraméterek (csoportosítás a 12. ábrának megfelelően)

Vízfolyás	Talaj tározási kapacitása mm	Elszivárgás sebessége a mélyebb talajrétegből mm/óra
Bózsva	200	0.35
Ménes	200	0.55
Ronyva	250	0.5
Szerencs	200	0.03
Szuha	120	0.45
Eger	125	0.2
Jósva	200	0.2



21. ábra: Növényi párolgási együttható kalibrált értéke

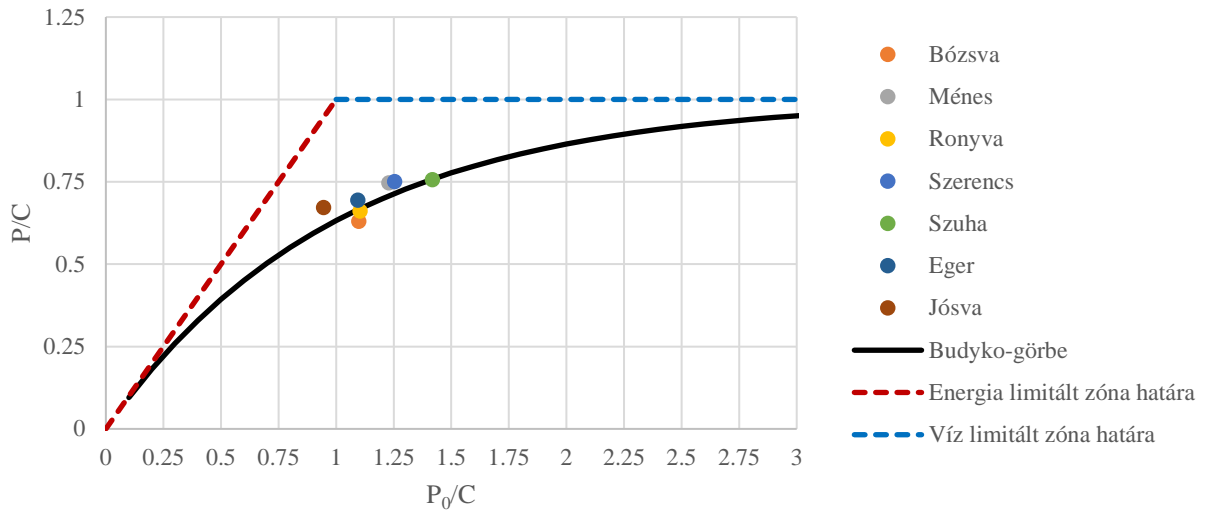
A kalibrált paraméterek esetén (9. táblázat) tapasztalhatók ugyan hasonlóságok az általam elkülönített csoportok esetén, nem jelenthető ki azonban, hogy teljes egyezés lenne a vízgyűjtőcsoportokat tekintve. Továbbiakban regresszióanalízis végezhető, mellyel vizsgálható, hogy áll-e fenn valamilyen kapcsolat a kalibrált értékek és a vízgyűjtők jellemzői között.

7.4 Modellezett idősorok vizsgálata

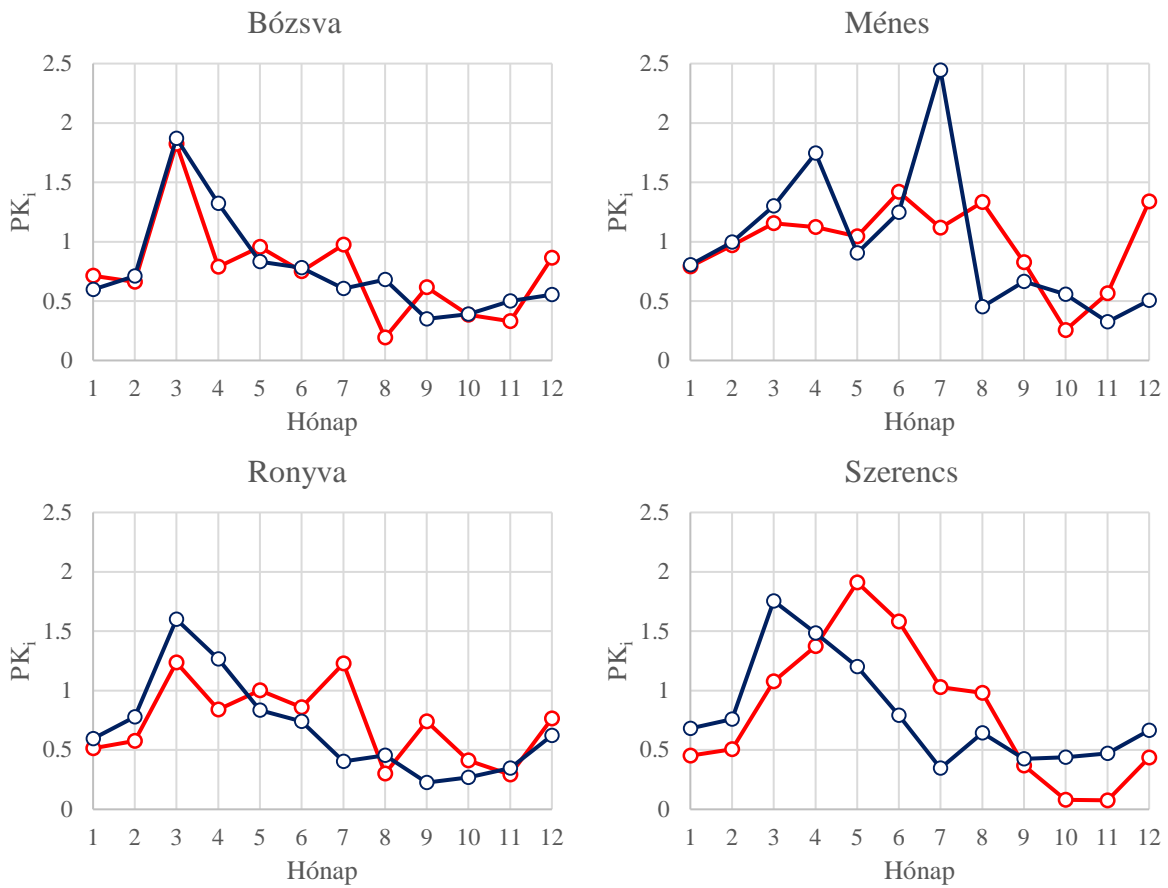
A modellezett idősorok esetén is számítottam az éves mérleg alakulását (10. táblázat), valamint megvizsgáltam, hogy az egyes vízgyűjtők pontjai hogyan helyezkednek el a Budyko-görbéhez képest (22. ábra). A Pardé-tényezőket is újraszámítottam a modellezett vízhozam idősorok alapján, mivel eredetileg ez alapján csoportosítottam a vizsgált vízgyűjtőket (23. ábra).

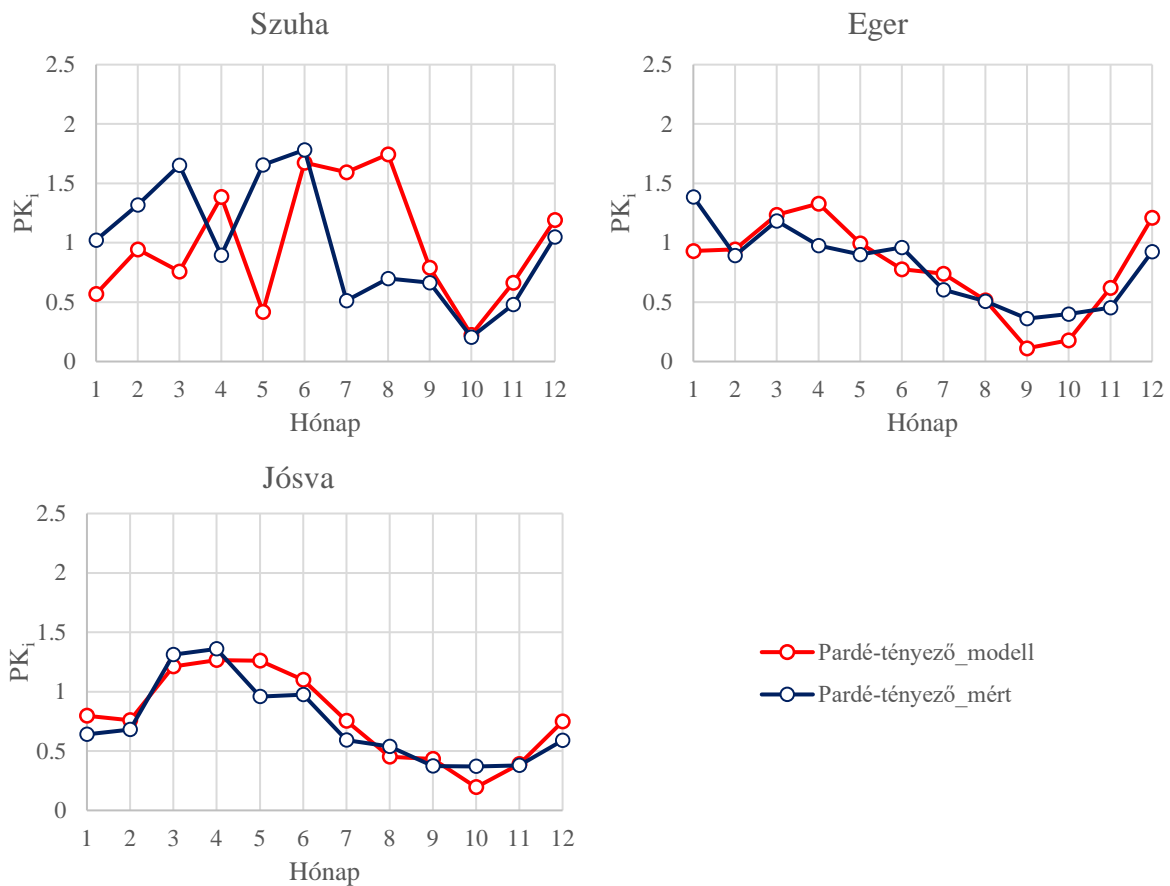
10. táblázat: Vízgyűjtőmérleg változása
(mért adatok vízgyűjtőmérlegét a 3. táblázat tartalmazza)

	L_{modell} [mm]	C [mm]	P_{modell} [mm]	$Hiba_{modell}$ [mm]	$Hiba_{mért}$ [mm]
Bózsva	90	639	451	98	-11
Ménes	69	576	413	94	-13
Ronyva	83	639	428	128	-33
Szerencs	111	558	419	28	-113
Szuha	76	517	391	50	-53
Eger	103	653	472	78	15
Jósva	119	738	514	105	114



22. ábra: Budyko-görbe és a modellezett éves tényleges párolgásösszegekkel kapott pontok

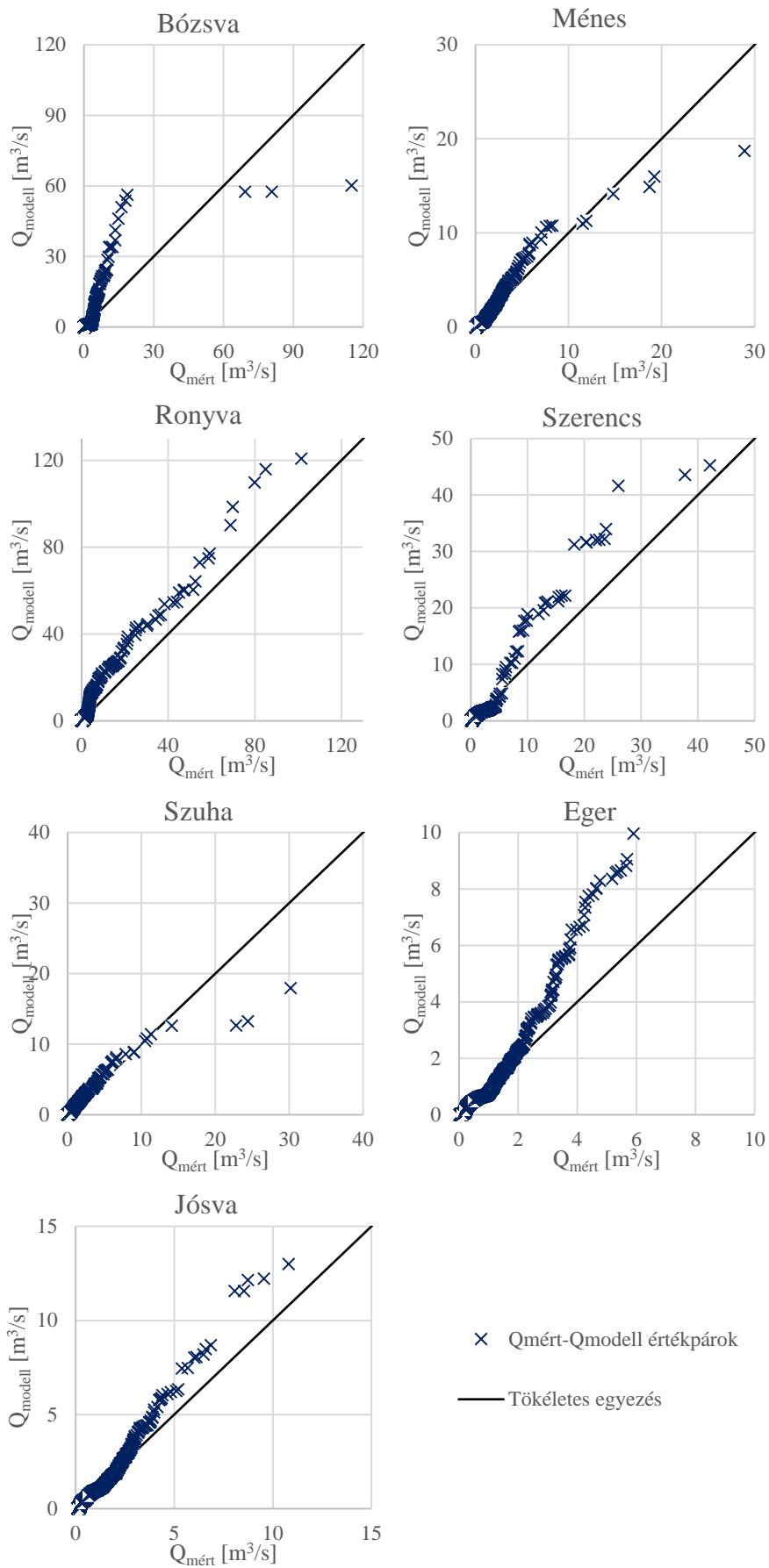




23. ábra: Pardé-tényező a modellezett és mért vízhozam idősorokra

A 10. táblázatból látható, hogy a modellezett értékek esetében is csak két olyan vízgyűjtő van, melyeknél nem teljesül a mérleg 100 mm-en belüli zárása. A hiba mértéke azonban általánosságban nagyobb, a 22. ábrán azonban látható, hogy az így kapott pontok jobban illeszkednek a Budyko-görbére. Ennek kapcsán megfontolandó, hogy a párolgást a Budyko-görbéhez vagy az általam használt forrásból nyert értékekhez érdemes-e igazítani. A 23. ábrán látható, hogy a modellezett vízhozam idősorok Pardé-tényezői nem minden esetben közelítik a mért értékekét. Legtöbb esetben megfigyelhető hasonló jelleg, azonban mértékbeli és időbeli eltolódással. Nagyon jó egyezést az Eger- és Jósua-patakok esetén kaptam.

Az eloszlásfüggvénynél szemléletesebb, ha a sorba rendezett idősorokat egymás függvényében ábrázoljuk. Ekkor az értékpároknak 45° -os egyenesre kéne esniük tökéletes egyezés esetén. Az így kapott értékpárokat a 24. ábra mutatja.



24. ábra: Modellezett vízhozamok a mért vízhozamok függvényében

Összességében a modellezés során a következőket tapasztaltam. Ilyen hosszú idejű futtatások végzésénél nemcsak olyan mutatók – mint például a Nash-Sutcliffe mutató – értékére érdemes hagyatkozni. Fontosabb, hogy a vízgyűjtő vízjárásának jellegét leíró statisztikai jellemzőket vizsgáljuk, így a vízhozamok eloszlását kell jól közelíteni.

A kalibráció során rengeteg döntési szituáció adódik. A figyelembe vehető értékek közül ki kell választani a prioritást élvezőket. Esetemben az volt a cél, hogy minél több paramétert egyezőre tudjak választani minden vízgyűjtőre úgy, hogy az éves tényleges párolgás is megfelelő legyen. Ez azonban nem minden szempontból a legeredményesebb megközelítés. Az eloszlásfüggvények jobban közelíthetők, ha nem célunk, hogy a párolgást is tökéletesen kapjuk vissza a modelltől. Emellett azonban az alaphozam jobban közelíthető a modellel, mint az árvízcsúcsok.

A regionális kalibráció sikeressége erősen függ a rendelkezésre álló adatok pontosságától. Fontos, hogy az adatokkal minden árhullám modellezhető legyen (hóolvadásból keletkező és tavaszi-nyári zivatarokból keletkező árhullámok egyaránt). A párolgás havi alakulásának ismeretében jól kalibrálható a növényi párolgási tényező értéke.

További vizsgálatokat igényel, hogy létrehozható-e a HEC-HMS keretein belül területileg egységes paraméterrendszer. Átfogó regresszióanalízis rávilágíthat bizonyos összefüggésekre a kalibrált paraméterek, morfológiai jellemzők vagy vízháztartási elemek között. Emellett lehetőség van bizonyos talajfizikai paraméterek mérésére is, ezzel szűkítve a szabad paraméterek körét.

Mindenképp érdemes több vízgyűjtőt bevonni a vizsgálatokba. Megfontolandó, hogy bevonhatók-e a vizsgálatokba azon vízgyűjtők, melyeken tározó létesült. A modellezett eredmények az Eger- és Jósua-patakokra adták a legjobb eredményeket, így ennek a régiónak további vizsgálata a leginkább javasolt.

8. Összefoglalás

A végzett futtatások és vizsgálatok eredményeként elmondható, hogy a vizsgált tényezők jósága nem feltétlen következik egymásból. Jó eloszlás nem feltétlen eredményezi a havi eloszlás megfelelő alakulását és fordítva, stb. Következőkben röviden összefoglalom az egyes vízgyűjtők esetén kapott eredményeket.

A Bózsva-patak esetén az eloszlás és a statisztikai mutatók adták a legrosszabb eredményt, azonban a Pardé-tényező havi alakulása szempontjából az egyik legjobb egyezést kaptam. A modellezett vízhozamok az alsó tartományban viszonylag erősen felülbecslik, a nagyvízi felső tartományban erősen alulbecslik a mért értékeket.

A Ménes-patak esetén az eloszlásfüggvény közelítése kielégítő, azonban a Pardé-tényező alakulása nem követte a nyári csúcst a modellezett értékek esetén. A modell a kis- és középvízi tartományt jól közelíti, a nagyvízi értékeket rendre alulbecsli. Feltehetően ez vezet a nyári Pardé-tényező eltolódásához.

A Ronyva-patak esetén a legtöbb vizsgálat kielégítő eredményre vezetett, bár a Pardé-tényező kiegyenlítettebb vízjárást mutat, és a modellezett vízhozamok valamelyest felülbecslik a mért értékeket.

A Szerencs-patak esetén a modell a Ronyva-patakhhoz hasonlóan csak kissé becsli felül a mért vízhozamértékeket és az eloszlás is megfelelő. A Pardé-tényező maximuma azonban a tél végéről a modellezett értékek esetén májusra tolódik. Ennek oka a hóolvadás nem megfelelő modellezésében keresendő.

A Szuha-patak esetén az eloszlásfüggvény a többi vízfolyáshoz hasonlóan jól közelíthető, a modellezett Pardé-tényező alakulása azonban nem megfelelő. A tavasz eleji és nyári csúcsok nem jelennek meg megfelelően a modellezett értékek esetén, bár az őszi - tél eleji időszak közelítése megfelelő. A modellezett vízhozamértékek a nagyvízi tartományban alulbecslik a mért értékeket.

Az Eger- és Jósua-patakok esetén mind az eloszlás, mind a Pardé-tényező alakulása hasonlóan kielégítő, a Jósua-patak esetén kevésbé becsli felül a modell a mért vízhozam értékeket, mint az Eger-patak esetében.

9. Konklúziók

A vizsgálatok végzése során tapasztalható volt, hogy jelentős szerepe van a felhasznált adatoknak, az azokat terhelő hibákat figyelembe kell venni az eredmények értékelésénél. A vízhozam értékek előállításánál használt $Q-h$ görbék megfelelősége felülvizsgálandó, mindenképpen további mérésekre van szükség, azok igazolásához Vízállással egyidejű vízhozammérést a kis vízfolyásokon csak expedíószerűen végeznek és szinte csak kis- és közép vizes időszakban. A vízhozamgörbéken ezért árhullámok idején extrapolációt kell végeznünk, amelynek hibája 50%-ot is meghaladhat (Széles et al., 2013).

Csapadékadatok esetén megfontolandó a CARPATCLIM adatok használata, az innen nyert idősorok összehasonlítása javasolt olyan esetekre, ahol mérőállomás adatai is rendelkezésre állnak az adott vízgyűjtőre. Fontos megjegyezni, hogy a csapadékállomások egyes esetekben nem a vízgyűjtőn, hanem annak közelben helyezkedtek el, illetve, hogy egyik vízgyűjtő esetében sem volt lehetőség a csapadék térbeli eloszlásának figyelembe vételére. Ennek hatása számottevő lehet.

A hőmérsékletadatok megfelelősége a hóolvadás modellezése szempontjából kulcsfontosságú. A hóolvadásból keletkező árvizek nem kerültek megfelelően modellezésre, ennek javítása érdekében további vizsgálatok végzése és pontosabb hőmérséklet idősorok beszerzése szükséges.

A vízmérlegek kapcsán mérvadónak tekinthető tényleges párolgásmennyiség kérdéses, az arra hazai viszonylatban alkalmazható összefüggés tisztázása célszerű. A lefolyás és ariditási tényezők aktuális értékének további vizsgálata is javasolt. A Pardé-tényező a vízgyűjtők csoportosítására jónak bizonyult, vizsgálatának kiterjesztése további eredményekre vezethet. A Wundt-diagramok ábrázolása nem vezetett további következtetések levonásához.

A HEC-HMS modellen belül a Kovács Ákos által számított tényleges párolgásra jól kalibrálható a növényi párolgási együttható, ezzel jól reprezentálható a modellel a tényleges párolgás éves alakulása. A modellel jól közelíthető az alaphozam változása, kifejezetten abban az esetben, ha nem célunk egységesíteni az ezt befolyásoló paramétereket és teljesen lekövetni a Kovács-féle párolgás értékeket.

A nagyobb vízhozamok kevésbé jól közelíthetők, ez azonban újragondolandó a $Q-h$ görbék felülvizsgálatának fényében. A modell kalibrálásakor jelentős mennyiségű talajt jellemző paraméter kerül beállításra, ezek meghatározása mérésekkel csökkentheti a kalibrálandó paraméterek számát. A kalibrált paraméterek és a vízgyűjtők jellemzői közötti összefüggések feltárása érdekében regresszióanalízis végzése célszerű.

Az itt végzett vizsgálatok bővítése javasolt, mind a vizsgált régiókat, mind a vizsgált időszakot tekintve. Az éves vízmérleg vizsgálata hosszabb idősorok esetén a vízkészlet változását is kimutathatja. Ilyen jellegű vizsgálatok, már nem csak kis-, hanem közepes vízfolyásainkra is végezhetők. A régióban található tározóval beépült vízfolyások vizsgálatokba való bevonhatósága kérdéses, azonban növelhetné a végzett vizsgálatok reprezentativitását. Továbbiakban vizsgálható az itt létrehozott csoportosítás helytállósága, annak megfelelősége esetén az egyes időbeli lefolyásmintázatok becslésének fizikai alapú és nem fizikai alapú módszerei nem mért vízgyűjtők esetére.

Kis- és közepes vízgyűjtők lefolyásbecslésére sok évtizeddel ezelőtt lettek módszerek kidolgozva és lefolyási térképek megszerkesztve. Ezek felülvizsgálata, az elmúlt évtizedek mérési adataival való ellenőrzése és pontosítása szükséges lenne. Napjainkban, a nemzetközi szakirodalom már számos módszert ajánl több száz év hosszúságú csapadék idősorok generálására. Ezek birtokában és jól kalibrált lefolyás-modellek segítségével elvégezhető lenne több száz év lefolyásának sztochasztikus modellezése, amellyel már pontosabban meghatározhatjuk a különböző visszatérési idejű mértékadó vízhozamokat és árhullámképeket, mivel a lefolyás idősorok kellően hosszúak és statisztikailag reprezentatívak lennének. Ezzel az eljárással egyúttal az adott értékekhez megbízhatósági intervallumokat is rendelni tudnánk.

A mért vízgyűjtők részletes feltárásán, modellezésén és regionalizálásán keresztül pedig remélhetjük, hogy olyan vízgyűjtőkre is adaptálhatjuk modelljeinket, amelyek vízrajzi állomással nem rendelkeznek és így azok lefolyására is fizikai alapon tudnánk immáron pontosabb becslést adni.

Végül szeretném megemlíteni, hogy egy vízgyűjtő vízjárásának eloszlását jól visszaadó modell segítségével lehetőség van a klímaváltozás hatásának becslésére is, hiszen az éghajlat módosulása első körben a meteorológiai jellemzők, vagyis a csapadék, hőmérséklet stb. megváltozását fogja okozni, amelyek a lefolyás modelleink bemenő és nem kalibrálandó paraméterei.

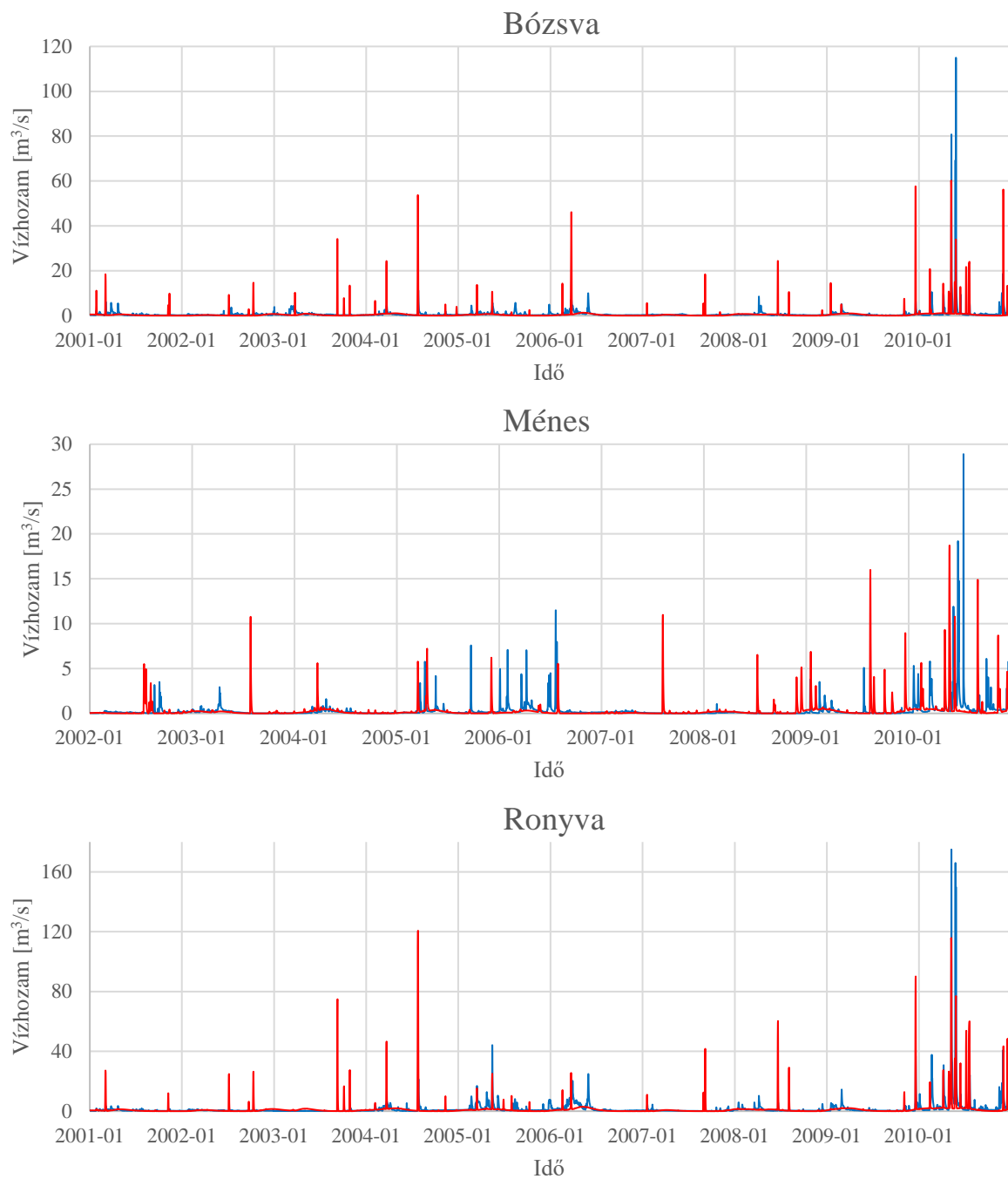
10. Irodalomjegyzék

- Bene K., Torma P., Keve G., Hajnal G. (2015): *Impact of climate change on the Eger Creek Watershed*, In: Gribovszki, Z., Hlavčová, K., Kalicz, P., Kohnová, S., and Carr G. (eds.) HydroCarpath-2015, Catchment processes in regional hydrology: Linking experiments and modelling in Carpathian drainage basins. Vienna, Austria, October 29. 2015
- Blöschl G., Sivapalan M., Wagener T., Viglione A., Savenije H. (2013): *Runoff Prediction in Ungauged Basins, Synthesis across Processes, Places and Scales*, Cambridge University Press, United States of America, New York.
- Budyko M. I. (1974): *Climate and Life*, translated from Russian by D. H. Miller, San Diego, CA: Academic Press
- Dövényi Z. (szerk.) (2010): *Magyarország kistájainak katasztere*, MTA Földrajztudományi Kutatóintézet, Budapest
- Feldman A. D. (2000): *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*, Technical Reference Manual, California.
- Koch R. (2015): *Karsztforrások hidrológiai vizsgálata*, Doktori értekezés, Széchenyi István Egyetem, Győr.
- Koch R., Bene K. (2013): *Continuous Hydrologic Modelling with HMS in the Aggtelek Karst Region*, Hydrology, 1(1), pp:1-7.
- Kontur I., Koris K., Winter J. (2003): *Hidrológiai számítások*, Limnográf, Budapest
- Kovács Á. D. (2011): *Tó- és területi párolgás becslésének pontosítása és magyarországi alkalmazásai*, Doktori értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudomány Egyetem, Budapest.
- Mata-Lima H., Vargas H., Carvalho J., Gonçalves M., Caetano H., Marques A., Raminhos C. (2007): *Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso*, Revista Escola de Minas, v. 60, n. 3.
- Nagy E. (2016): *Vízgyűjtő-modellzés gyakorlati alkalmazhatóságának vizsgálata a Tarján-patak vízgyűjtőjén*, Bsc diplomadolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudomány Egyetem, Budapest.
- Nagy E., Torma P., Bene K. (2016): *Comparing methods for computing the time of concentration in a medium-sized hungarian catchment*, HydroCarpath-2016, Catchment processes in regional hydrology: From plot to regional scales – Monitoring catchment processes and hydrological modelling. Vienna, Austria, October 27. 2016
- NOAA Paleoclimatology (2011): *Climate Reconstructions*, NOAA Satellite and Information Service.
- Pardé M. (1933): *Fleuves et Rivières*, Paris: Armand Colin.

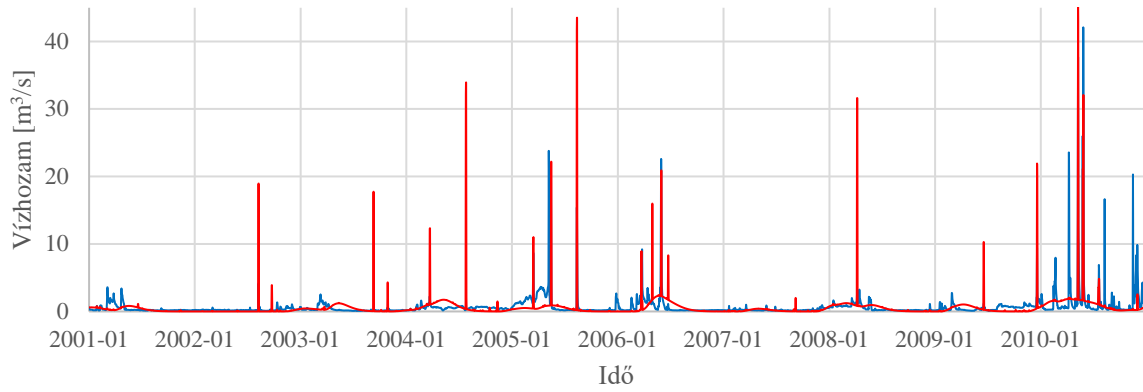
- Priestley C. H. B., Taylor R. J. (1972): *On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters*, Monthly Weather Review, 100 pp. 81-92.
- Rao L. Y., Sun G., Ford C. R., Vose J. M. (2011): *Modeling Potential Evapotranspiration of Two Forested Watersheds in the Southern Appalachians*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 54 (6). pp. 2067-2078.
- Scharffenberg W. A. (2016): *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*, User's Manual, California.
- Skøien J. O., Merz R., Blöschl G. (2006): *Top-kriging – geostatistics on stream networks*, Hydrology and Earth System Sciences, 10 pp., 277-287.
- Straub T. D., Melching C. S., Kocher K. E. (2000): *Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois*, Water-Resources Investigations Report 00-4184, Urbana, Illinois.
- Széles B. (2011): *A Bükkös-patak vízgyűjtőjének átfogó hidrológiai vizsgálata*, TDK dolgozat, BME, Budapest.
- Széles B., Torma P., Hajnal G. (2013): *Hydrological model analyses on the watershed of Bükkös Creek*, In: Péter Kalicz, Zoltán Gribovszki, Kamila Hlavcová, Silvia Kohnová (szerk.), HydroCarpath-2013, Catchment Processes in Regional Hydrology: Experiments, Modeling and Predictions in Carpathian Drainage Basins. Vienna, Austria, October 27. 2013
- Grimaldi S., Petroselli A., Tauro F., Porfiri M. (2012): *Time of concentration: a paradox in modern hydrology*, Hydrological Sciences Journal, 57:2, 217-228.
- Torma P., Széles B., Hajnal G. (2014): *Applicability of different hydrological model concepts on small Hungarian basins: case study of Bükkös Creek*, Acta Silvatica et Lignaria Hungarica, 10 (1). pp. 77-90.
- Wundt W. (1953): *Gewässerkunde*, Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer.
- Zhang L., Hickel K., Dawes W. R., et al. (2004): *A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration*, Water Resources Research, 40(2), 1-14.

11. Mellékletek

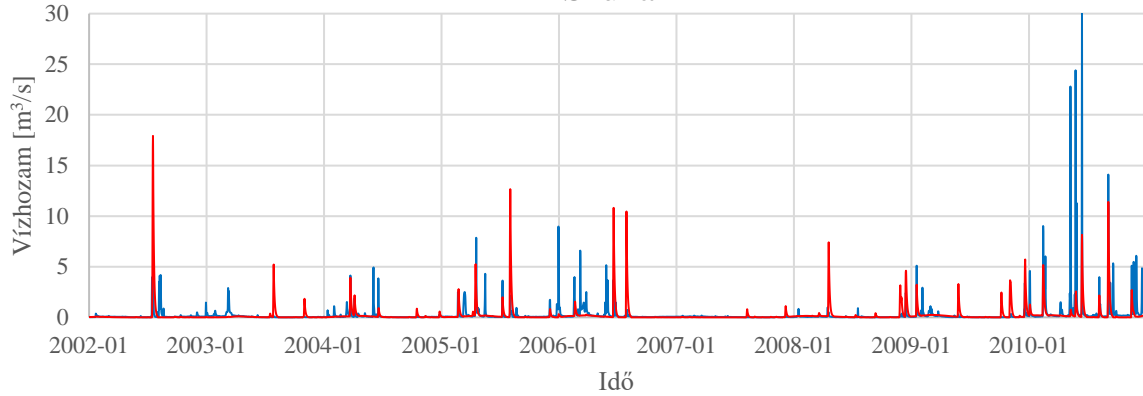
1. számú melléklet: Teljes modellezett vízhozam idősorok



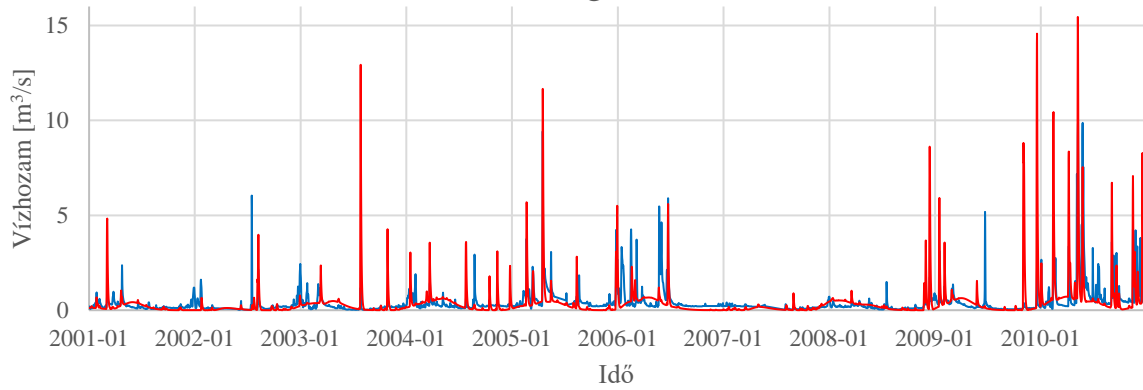
Szerencs



Szuha



Eger



Jósva

