

Szerzők: Nagy Eszter Dóra; Dr. Szilágyi József

Munkahely: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék; Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Cím: 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3. KMf15; 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3. KMf12/8

# Tározóvízállás előrejelezhetőségének vizsgálata magyarországi kis és közepes vízgyűjtőkön

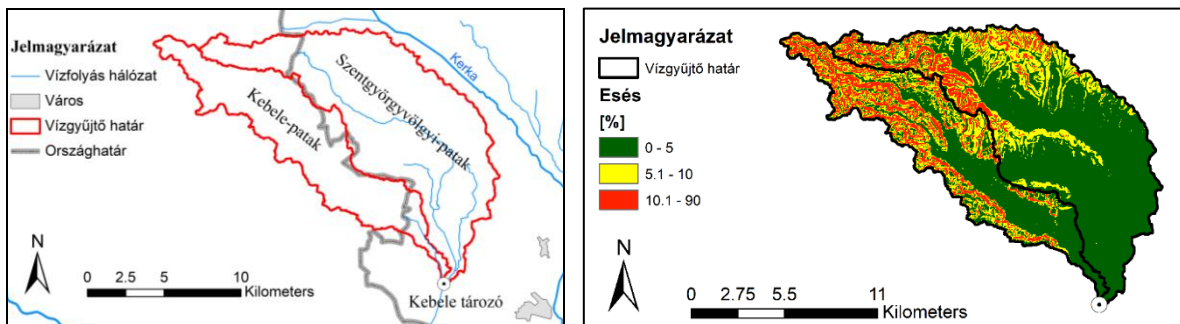
## 1. Bevezetés

Az Új Nemzeti Kiválóság Program keretében megfogalmazott kutatási cél annak vizsgálata, hogy hazai kis és közepes vízgyűjtőinken létesített tározók esetén lehetséges-e a tározók vízállásának előrejelzése csapadék-lefolyás modellezés segítségével. A téma aktualitását indokolja, hogy az elmúlt 20-25 évben megszorodtak azon események, melyek szélsőséges terhelésnek tették ki tározóinkat országszerte. Ugyan nagyobb vízfolyásainkra létezik operatív előrejelző rendszer, azonban kisvízfolyásaink esetében nem rendelkezünk előrejelzési információkkal, annak ellenére, hogy a döntéshozók, üzemeltetők számára kisvízfolyások tározóin való védekezéskor is fontos többletinformációkkal szolgálhat a megfelelő megbízhatóságú előrejelzés. A modellezéshez természetesen szükséges a megfelelő minőségű és mennyiségű adatok rendelkezésre állása.

Jelen kutatás során egy mintaterület vizsgálata történt meg. A megfelelő adatellátottság mellett is kihívást jelentett a modellezési feladat az adatok minősége és a tározó összetettsége miatt. A kapott eredmények azonban biztatóak. A csapadék-lefolyás modell kalibrálása mellett a modell igazolásának egy lehetséges módja is kijelölésre került, valamint maga az előrejelzés is jó eredményekre vezetett. A kutatómunka eredményeként természetesen számos tovább lépési lehetőség is felmerült, így a jövőben remélhetőleg tovább javulnak az itt bemutatott eredmények.

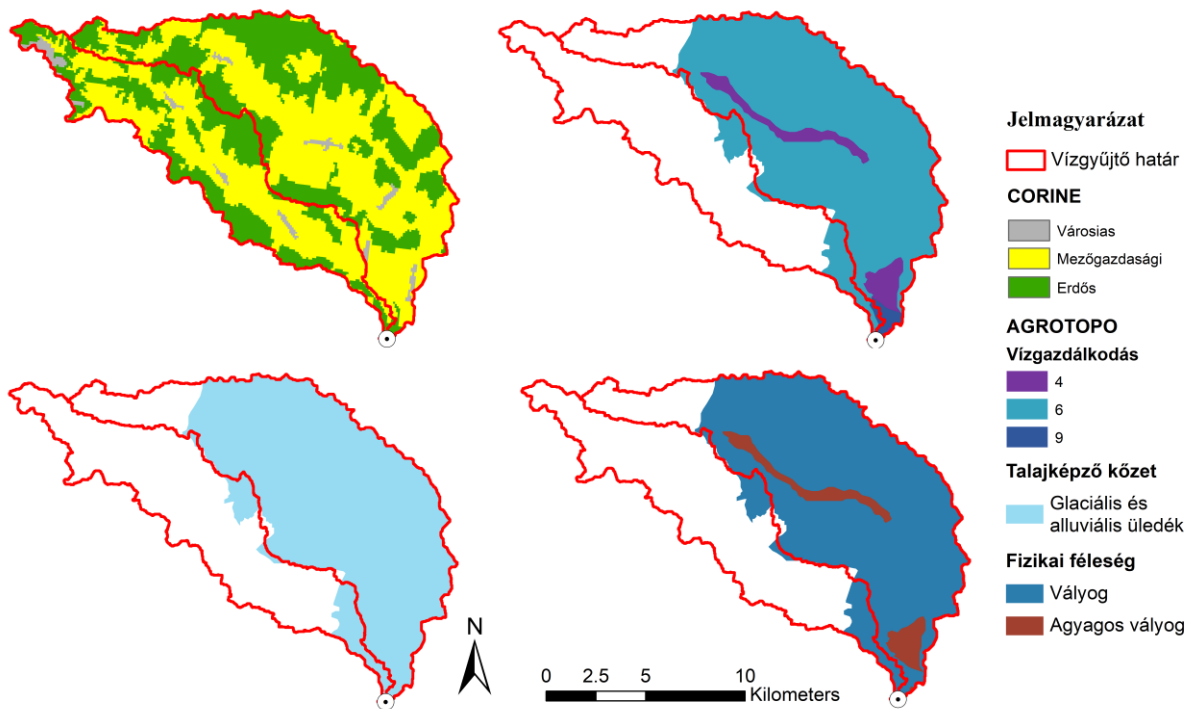
## 2. Vizsgált terület bemutatása

A vizsgált terület a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság területén található Kebele tározó és annak vízgyűjtője. A tározóba érkező vízfolyások a Kebele- és a Szentgyörgyvölgyi-patakok, melyek vízgyűjtő területe rendre 66 és 114 km<sup>2</sup> (1. ábra). A tározó alatt Kebele-patakként egyesülő vízfolyás befogadója a Lendva. Mind alvízi, mind felvízi oldalon részben Szlovéniában terül el a vízfolyás vízgyűjtője, így a tározó üzemeltetése nemzetközi együttműködést igényel.



1. ábra: Kebele tározó vízgyűjtője és eséstérképe

A vízgyűjtőn a területhasználat közel 1:2 arányban erdős, illetve mezőgazdasági jellegű, a városias területek aránya elenyésző (CORINE, 2. ábra). A talajképző kőzetet glaciális és alluviális üledékek alkotják, a jellemző fizikai talajféleség vályog, mely típus szerint a „gyenge víznyelésű, igen gyenge vízvezető-képességű, erősen víztartó, igen kedvezőtlen, extrémén szélsőséges vízgazdálkodású talajok” csoportjába tartozik (AGROTOPO, 2. ábra).



2. ábra: Területhasználat és talajjellemzők

A teljes vízgyűjtő terület  $180 \text{ km}^2$ , melyhez  $34 \text{ km}$ -es leghosszabb lefolyási úthossz és  $195 \text{ m}$  szintkülönbség mellett átlagosan  $0.6\%$  esés tartozik. Alak és esés viszonyok (1. ábra) tekintetében a két patak vízgyűjtője eltér. A Kebele-patak nagyobb esésű, elnyúltabb vízgyűjtőjén feltehetően gyorsabb az összegyülekezés és ebből adódóan fajlagosan nagyobbak a tetőző vízhozamok, mint a laposabb, szélesebb vízgyűjtőjű Szentgyörgyvölgyi-patak esetében.

Éghajlatát tekintve a vizsgált terület az országon belül csapadékosnak tekinthető, az éves átlagos csapadékösszeg  $700\text{-}750 \text{ mm}$  körüli. A területen megfigyelhető az őszi másodmaximum kialakulása a júniusi/júliusi éves maximum mellett. Jellemzően április 26. és október 15. között nem kell fagyra számítani. A terület ariditási tényezője  $1,15\text{-}1,20$  körüli. (Ariditási tényező alatt jelen esetben a megszokottól eltérően a csapadék és potenciális párolgás hányadosa értendő.) Domb- és hegyvidéki vízgyűjtőink közül a villámárvíznek való kitettsége gyengének/közepesnek számít (Bede-Fazekas et al. 2016).

A vízgyűjtőn található tározó elsődleges célja az alvízi mezőgazdasági területek árvízi elöntésének mérséklése és az érintett területek árvízi veszélyeztetettségének csökkentése a mértékadó árvizek mintegy  $60\%$ -os csökkentésével. Kiemelendő, hogy a tározó zöldtározóként üzemel, tehát az árvízmentes időszakok során a tározótér üres. A tározó területe nincs teljes egészében a Vízügyi Igazgatóság által kisajátítva. A magánterületek elöntése esetén a tulajdonosoknak kártérítés fizetendő az elöntési idő alapján. A tározó vízállás előrejelzés legfőbb gyakorlati hasznát tehát az jelentené, hogy előre becsülni tudnák a várható anyagi kárt és gazdasági szempontokat is figyelembe tudnák venni a tározó üzemeltetésekor.

A két vízfolyáson azok vízhozamaival arányos méretű bukóaknás, áttereszes, síktáblás elzárással szabályozható műtárgyak találhatóak árapasztó bukókkal ellátva. A csillapító hatás a tetőző vízhozamokat 30-40 m<sup>3</sup>/s-ra redukálja. A tározó méretezésekor figyelembe vett tározóba érkező vízhozamok (és tározott térfogatok) a következők:

- NQ20% = 39,0 m<sup>3</sup>/s (2,8 Mm<sup>3</sup>),
- NQ10% = 48,0 m<sup>3</sup>/s (3,6 Mm<sup>3</sup>),
- NQ1% = 94,0 m<sup>3</sup>/s (7,5 Mm<sup>3</sup>),
- NQ0,5% = 118,5 m<sup>3</sup>/s (9,6 Mm<sup>3</sup>).

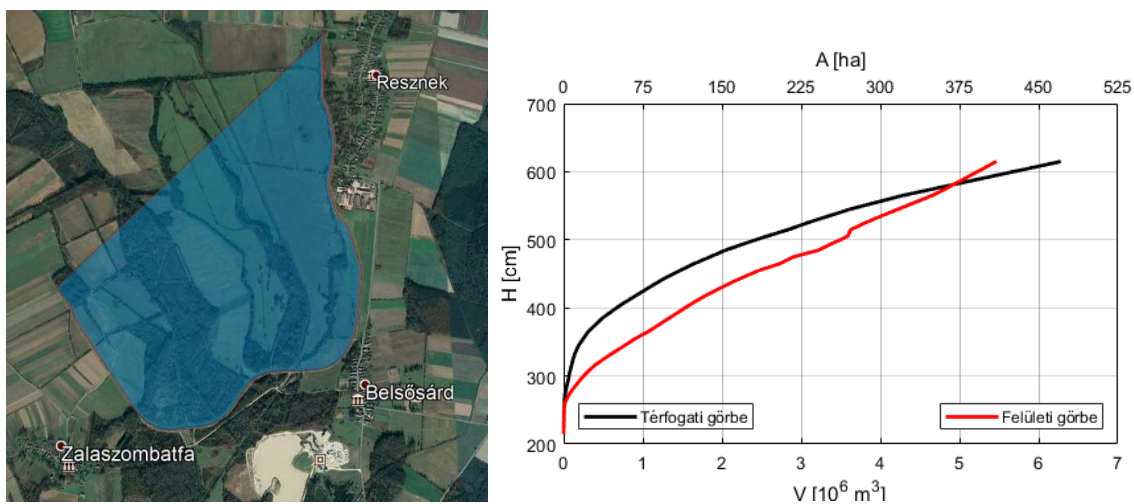
Ezek közül tervezéskor a mértékadó állapotot a 100 éves gyakoriságú árhullám jelentette, mely 130 mm-es 24 órás csapadékösszeg által kiváltott lefolyásnak felel meg, a Kebele-patakon 0,35-os, a Szentgyörgyvölgyi-patakon 0,27-os lefolyási hányad ( $\alpha$ ) mellett.

## 2.1 Vízyűjtő terepmodellje

A vízyűjtő lehatárolásához a közel egész Európa területére ingyenesen rendelkezésre álló EU-DEM terepmodellt használtam, mely 25x25 m-es rácsfelbontással rendelkezik. A lehatárolt részvízyűjtő területek, illetve a lehatárolás során meghatározott vízfolyáshálózat megfelelőségét a vízügyi térinformatikai adatbázis adatai alapján ellenőriztem.

## 2.2 A tározó morfológiája, műtárgyai és üzemeltetési rendje

A tározó különlegessége, hogy két vízfolyás hozama két külön műtárgy segítségével kerül átvezetésre a tározó töltésén, mely a Kebele-patak 9+170 km, illetve a Szentgyörgyvölgyi-patak 1+182 km szelvényében létesült 5469 fm hosszon. A tározó befogadóképességét az 3. ábrán látható morfológiai jelleggörbék szemléltetik. A tározó töltését Google Earth-ben digitalizáltam műholdkép alapján (3. ábra).



3. ábra: Tározó területe műholdfelvételen (Google Earth) és morfológiai jelleggörbéi

A tározón található műtárgyak főbb méreteinek ismerete a hidraulikai számításokhoz elengedhetetlen volt. A két műtárgy a vízfolyások hozamával arányosan került kialakításra. A Kebele-patakon két, míg a Szentgyörgyvölgyi-patak három 1,5x2,0 m-es nyílás található. Utóbbi esetén a középső nyílás szabad, míg a fennmaradó négy zsilippel szabályozható. Az árapasztó bukók élhossza rendre 15,3 és 18,3 m. A körbukók koronaszintje egységesen 168,0 m B.f., de a műtárgyak fenékszintjei nem azonosak (rendre 164,0 és 163,4 m B.f.). A tározó töltésének koronaszintje a bukó koronaszintje felett egy méterrel (169,0 m B.f.) került kialakításra. A nyílásokról és a bukóról érkező vizet a nyílásokéval egyező számú csőáteresz vezeti át a töltés alatt, melyek átmérője egységesen 2,0 m.

A tározó üzemeltetési szabályzatában 3 üzemiállapotot különböztetnek meg:

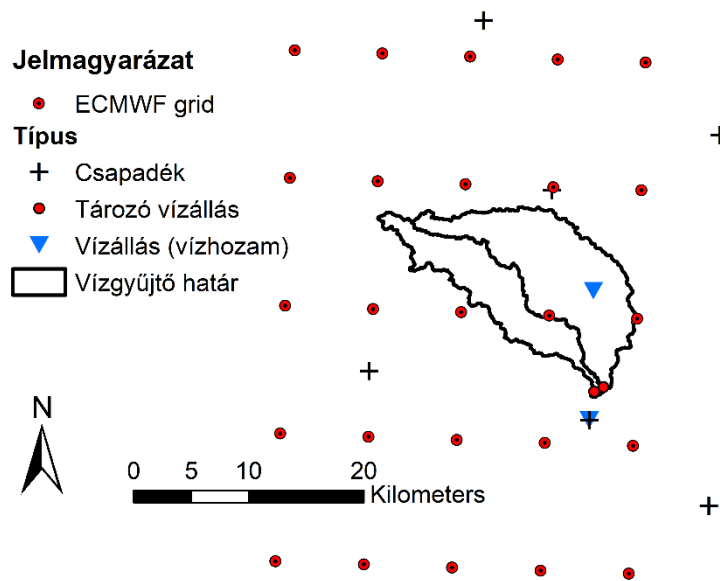
Normál állapot: nyitás a Szentgyörgyvölgyi-patakon 2x45 cm, nyitás a Kebele-patakon 2x120 cm.

Egyidejűleg a Lendván is árhullám vonul le:

- meteorológiai előrejelzés szerint 5%-os, vagy ennél kisebb valószínűségű csapadék várható: minden zsilippel ellátott nyílást zárni kell,
- meteorológiai előrejelzés szerint 3%-os valószínűségű csapadék várható: Szentgyörgyvölgyi-patak zsilipjeit teljes mértékig zárni, Kebele-patak zsilipjeit 20 cm-ig nyitni

### 2.3 Vízirajzi adatok

A vízgyűjtő és annak közvetlen környezete jó adatellátottságúnak tekinthető (4. ábra). A tározó felvizen a Szentgyörgyvölgyi-patak márokföldi szelvényéből, illetve alvizen a Kebele-patak rédicsi szelvényéből állt rendelkezésre vízhozam idősor. A vízhozam adatok mért vízállásból, kalibrált Q-h görbe segítségével előállított, származtatott idősorok. A tározó mindkét műtárgyánál kiépítésre került lapvízmerce és rajzoló vízmerce is. Előbbi esetén kézi leolvasások állnak rendelkezésre, míg utóbbi folytonos tározó vízállás idősort szolgáltat. Az Igazgatóság több csapadékmérő állomást is üzemeltet a vízgyűjtő környezetében. Ezek mellett egy szlovén és egy magyar szinoptikus meteorológiai állomásról került beszerzésre (NCDC, NOAA) 6 órás csapadékösszeg idősor.



4. ábra: Állomások a vízgyűjtőn és környékén, valamint az ECMWF adatbázisból lekért adatok rácsból (a pontok a cellák észak-nyugati sarkát jelölik)

A felszíni csapadékmérő állomások hiányos adatai miatt végső megoldásként egységesen, az ECMWF adatbázisból nyert mért és előrejelzett csapadék idősorok kerültek felhasználásra a modellezés során. Az adatok raster alapon,  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ -os (7,6x11,1 km-es) rácsfelbontással állnak rendelkezésre. A lekérdezett térbeli tartomány a 4. ábrán látható.

A rendelkezésre álló adatokat az 1. táblázat foglalja össze.

		Kezdőév	Záróév	Időbeli felbontás [perc]	Forrás
Vízhozam	Szentgyörgyvölgyi-patak, Márokföld	2005	2017	5	NYUDUVIZIG
	Kebele-patak, Rédics	2001	2017	5	NYUDUVIZIG
Vízállás	Tározó felvíz, Kebele-patak, Zalaszombatfa	2009	2017	15	NYUDUVIZIG
	Tározó alvíz, Kebele-patak, Zalaszombatfa	2009	2017	15	NYUDUVIZIG
	Tározó felvíz, Szentgyörgyvölgyi-patak, Belsőárd	2009	2017	15	NYUDUVIZIG
	Tározó alvíz, Szentgyörgyvölgyi-patak, Belsőárd	2009	2017	15	NYUDUVIZIG
	Rédics	2011	2017	5	NYUDUVIZIG
	Bajánsenye	2002	2016	5	NYUDUVIZIG
	Tormafölde	2006	2017	15	NYUDUVIZIG
Csapadék	Zalalövő	2011	2017	15	NYUDUVIZIG
	Szentgotthárd	2000	2017	360	NOAA
	Murska Sobota	2000	2017	360	NOAA
	Long: 16.1-16.5; Lat: 46.9-46.5	2005	2017	60	OMSZ (ECMWF)

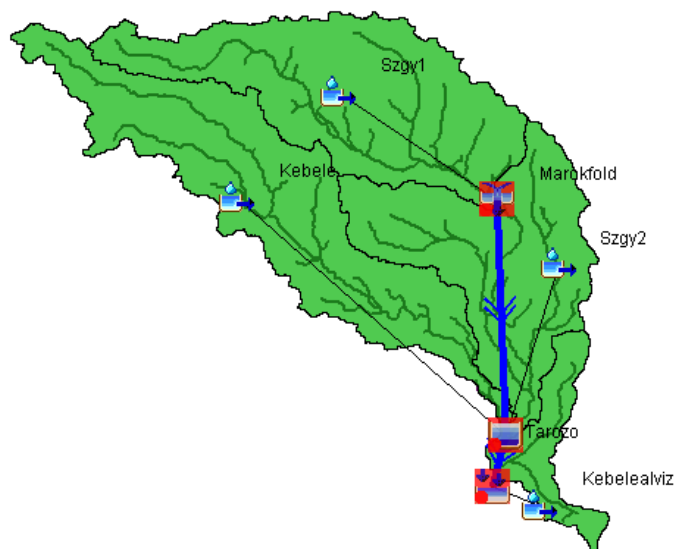
1. táblázat: Rendelkezésre álló adatok összefoglaló táblázata

### 3. Módszertan

A modellfejlesztés folyamata három fő részből tevődött össze. Elsőként kalibráltam egy csapadék-lefolyás modellt a mintaterületre, mellyel számíthatók a tározóba érkező vízhozamok idősorai. Ezután következett a saját programozású tározó modul összeállítása, mely a beérkező vízhozam idősorok felhasználásával számítja a tározó vízállás idősorokat és elöntés térképeket. Ezután következett az előrejelzett csapadékidősorok felhasználása a tározó vízállásának előrejelzéséhez.

#### 3.1 Csapadék-lefolyás modell

A cél a tározóhoz tartozó vízgyűjtő csapadék-lefolyás kapcsolatának modellezése volt esemény szinten, összevont paraméterű, determinisztikus modellel. Ehhez a US Army által fejlesztett HEC-HMS szoftvert használtam, mely bárki számára ingyenesen elérhető. A vízgyűjtő geometriai modelljét a szintén ingyenesen hozzáférhető HEC-GeoHMS toolbox segítségével végeztem ArcGIS-ben. A modell sematikus váza a 5. ábrán látható. Összesen 4 részvízgyűjtő került lehatárolásra. A Szentgyörgyvölgyi-patak mért (*Szgy1*) és méretlen (*Szgy2*) felvizi részvízgyűjtője, illetve a Kebele-patak teljes felvizi részvízgyűjtője (*Kebele*). A negyedik területet a Kebele-patak rédicsi szelvényéig, a tározó alvízén található részvízgyűjtő adta (*Kebelealviz*).



5. ábra: Vízyűjtő sematikus leképezése a HEC-HMS modellben

A HMS-ben alkalmazható számítási modulok közül, melyek az egyes hidrológiai folyamatokat írják le, a következőket alkalmaztam (a felszíni tározás és az intercepció hatását a hatékony csapadék meghatározásán keresztül vettem figyelembe):

- felszíni tározás hatása (surface): nem alkalmazott,
- intercepció hatása (canopy): nem alkalmazott,
- hatékony csapadék meghatározása (loss): exponential loss,
- árhullám transzformáció (transform): Clark unit hydrograph,
- alaphozam számítása (baseflow): recession,
  
- mederbeli lefolyás számítása (routing): Muskingum-Cunge.
- mederbeli veszteség (loss/gain): nincs.

A felsorolt modulok közül az első csoport a vízyűjtőn történő összegyülekezés, míg a második csoport a mederbeli lefolyás számítására szolgál. Előbbi esetén összesen 9 meghatározandó paraméter, utóbbi esetén 6 meghatározandó paramétert tartalmaz a modell. A modulok és paraméterek részletes leírása megtalálható a modell segédanyagai között (Scharffenberg 2016; US Army Corps of Engineers 2000).

A paraméterek egy része meghatározható közelítő számításból vagy terepmodellből. Az összegyülekezési időket Wisnovszky összefüggésével határoztam meg (Wisnovszky 1958). A mederbeli összegyülekezés számításához szükséges geometriai paramétereket a terepmodellből nyertem ki, míg a mederérdesség értékét közepesre vettem fel szakirodalmi értékek alapján (US Army Corps of Engineers 2000).

A fennmaradó paramétereket úgy választottam meg, hogy összesen egy szabad paraméter maradjon, mely kezdeti feltételként minden eseményre kalibrálható. Ez célszerűen a hatékony csapadék meghatározásánál szükséges, talaj kezdeti telítetlenségét jellemző paraméter (Initial range, IR).

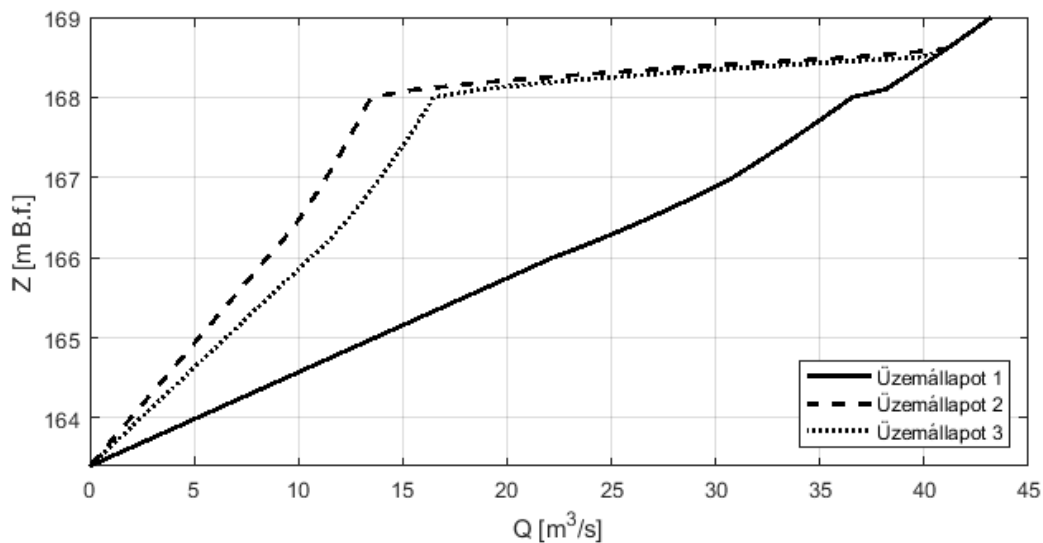
### 3.2 Műtárgy hidraulika

Saját programozású tározás számító modul készítésére a tározótér és a műtárgyak összetettsége miatt volt szükség. A terepmodell alapján egy magaslat található a két műtárgy között, emiatt a tározótér két pontban kezd el tölteni közel 140 cm-es tározóvízállásig. A külön betározható térfogat 93 és 340  $\text{em}^3$  a Szentgyögyvölgyi- és Kebele-patakokon.

A műtárgyak teljesítőképességi görbéje az adott üzemállapotnak megfelelő zsilipnyitásokat figyelembe véve került számításra. A hidraulikai számításokat a tervezővel egyeztetve, azonos módszerekkel végeztem. A számítás metodikája a következő:

- zsilip alsó éléig számítás szűkületként,
- zsiliptábla éle felett számítás zsiliptábla alatti kifolyásként, egészen a bukó küszöbszintjéig,
- bukó küszöbszintje felett számítás zsiliptábla alatti kifolyásként és bukóképlettel,
- zsilipről és bukóról érkező vízhozamok összegének összehasonlítása az áteresz vízszállító képességével, mivel a bukó működésbe lépése után nem feltétlen képes az áteresz akkora vízhozamot szállítani, mint ami a bukón és a zsilipeken keresztül érkezne.

A számítások során alkalmazott fontosabb hidraulikai paramétereket a tervezéskor figyelembe vettekkel azonosra választottam meg. A három ismert üzemállapotra számított teljesítőképességi görbét a 6. ábra mutatja.



6. ábra: Műtárgyak teljesítőképességi görbéi a 3 ismert üzemállapotra

### 3.3 Tározó modell

A modul programozása MATLAB-ban történt. A tározásváltozás számítása explicit, időben retrográd, 0D differencia sémával történt:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{be}^{t-1} - Q_{ki}^{t-1}(H^{t-1})$$

ahol:

- $dV = V(H^{t-1}) - V(H^t)$  – tározásváltozás az adott  $dt$  időegység alatt [ $m^3$ ],
- $V(H^{t-1})$  és  $V(H^t)$  – tározott térfogat a tározó vízállás függvényében [ $m^3$ ],
- $H^{t-1}$  és  $H^t$  – tározó vízállás értékei [cm],
- $dt$  – számítási időlépés [s],
- $Q_{be}^{t-1}$  – a tározóba érkező vízhozam [ $m^3/s$ ],
- $Q_{ki}^{t-1}(H^{t-1})$  – az adott zsilipnyitások melletti teljesítőképességi görbéből, a tározó vízállás függvényében meghatározott átbocsájtott vízhozam [ $m^3/s$ ].



A modul szükséges bemenő adatai:

- tározóba érkező vízhozam idősorok külön a Kebele- és Szentgyörgyvölgyi-patakokra,
- tározó vízállás idősor legalább az egyik műtárgyra,
- alvízi mért vízhozam idősor.

A modulban számításra kerül:

- tározó vízállás idősora,
- alvízi vízhozam idősor,
- mért alvízi vízhozamból és tározó vízállásból visszszámított felvízi (összegzett) vízhozam idősor.

A modell alapján tehát számításra kerülnek a felvízi és alvízi összegzett vízhozam idősorok és a tározó vízállás is. Emellett előrejelzés esetén az előtési idők térképei is megjelenítésre kerülnek minden előrejelzési időpontban.

### 3.4 Előrejelzés

A csapadékmezők előrejelzése 12 óránként készül, órás időlépésben, Nyugat-európai idő (UTC+0) szerint 0 és 12 órakor. Az egyes események 6 időlépésben került futtatásra, tehát mindegyik 3 napot ölel fel.

Az előrejelzett csapadék idősorok felhasználásával történt a vízhozam idősorok előrejelzése. A HEC-HMS programban lehetőség van előrejelzés készítésére. A kezdeti paraméterbeállítások egyeztek a kalibráció során felvett értékekkel, a további időlépések pedig meleg indítással kerültek futtatásra, tehát a modell által számolt és a következő előrejelzés időpontjában eltárolt paraméterekkel indult minden előrejelzésnél a modell.

Az előrejelzett vízhozam idősorok előállítását követően, azok felhasználásával került futtatásra a tározó vízállásának előrejelzése. A futtatások a csapadék-lefolyás modellezéshez hasonlóan meleg indítással készültek, tehát a tározó vízállás az adott előrejelzés kezdeti időpontjában nem a mért, hanem az előző előrejelzés során modellezett vízállásról indult.

## 4. Eredmények

Elsőként a csapadék-lefolyás modell kalibrálására és igazolására került sor. Ezt követően a kalibrált modell által szolgáltatott vízhozamokból számításra került a tározóba érkező, illetve onnan távozó vízhozamok idősora és maga a tározó vízállás is. A kalibrált modellel megvizsgáltam a tározó vízállás számításának érzékenységét a csapadék-lefolyás modell egyetlen kalibrálandó paraméterére. Végül a csapadék előrejelzések feldolgozása és ezekből a lefolyás és tározó vízállás idősorok előrejelzése történt meg.

### 4.1 Csapadék lefolyás modell kalibrálása

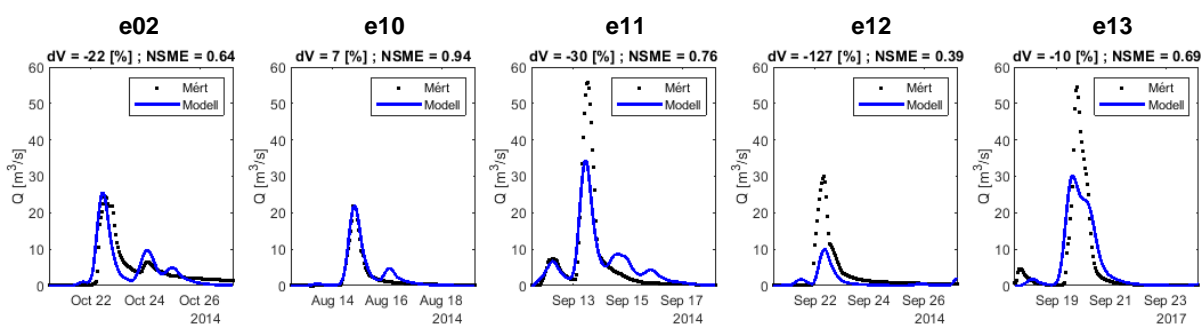
A csapadék-lefolyás modellezés csak bizonyos kritériumoknak megfelelő eseményekre volt megvalósítható. Szükséges feltétel, hogy rendelkezésre álljanak mért vízhozam és csapadék idősorok (illetve a későbbi tározás számításához vízállás idősorok is) az esemény teljes időtartamára. Kitétel volt továbbá, hogy az esemény a hómentes, nyári (április-október) időszakba essen. Ezzel a hóolvadásból keletkező árhullámok modellezésének kiküszöbölése volt a cél. Ennek két oka, hogy a hóolvadásból történő lefolyás számítás merőben különbözik a csapadékból keletkező árhullámok számításától (Singh, Singh, and Haritashya 2011), illetve a dokumentált mértékadó állapot nem hóolvadásból keletkezett. Feltétel volt továbbá, hogy a tetőző vízhozam meghaladjon egy bizonyos küszöbszintet, mely a meder normál üzemenél vett vízszállítóképességével azonos  $13 \text{ m}^3/\text{s}$ -ot jelentette. A felsorolt feltételeknek összesen 5 esemény felelt meg a mért időszakban, melyek főbb jellemzőit a 2. táblázat tartalmazza. A mértékadó állapotot az *e11* esemény jelentette 2014 őszén, míg egy ehhez közeli tetőző

vízhozamú árhullámot tartalmaz az *e13* esemény. A maradék három eseménynél (*e02*, *e10* és *e12*) lényegesen kisebbek a tetőző vízhozamok. Az árhullámok kivétel nélkül az augusztus-október időszakba esnek. Egy kivétellel minden esemény hasonló lefolyási hányaddal rendelkezik (mely lényegesen nagyobb, mint a tervezésnél figyelembe vett értékek). Az *e12* eseménynél a mért csapadék kevesebb, mint a mért lefolyás, feltehetően a csapadék adatok hibájából adódóan. (A mért és modellezett adatokat bemutató ábrákon a bemutatott események jelölése minden esetben balról jobbra: *e02*, *e10*, *e11*, *e12*, *e13*.)

	Esemény kezdete	Esemény vége	$Q_{\max}$ [m <sup>3</sup> /s]	$\Sigma P$ [mm]	$\Sigma R$ [mm]	$\alpha = \Sigma R / \Sigma P$ [-]
<i>e02</i>	2014.10.20. 13:00	2014.10.27. 07:00	25	59	39	0.67
<i>e10</i>	2014.08.12. 13:00	2014.08.17. 07:00	22	29	19	0.66
<i>e11</i>	2014.09.11. 13:00	2014.09.18. 07:00	56	76	53	0.70
<i>e12</i>	2014.09.20. 13:00	2014.09.27. 07:00	30	16	28	1.78
<i>e13</i>	2017.09.17. 13:00	2017.09.24. 07:00	55	78	48	0.61

2. táblázat: Modellezett események jellemzői ( $Q_{\max}$  – tetőző vízhozam,  $\Sigma P$  – csapadékösszeg,  $\Sigma R$  – lefolyás,  $\alpha$  – lefolyási hányad a modellezett időszakban)

A modelleredmények jóságának jellemzésére a százalékos térfogati eltérést és a Nash-Sutcliffe modellhatékonysági mutatót (NSME) alkalmaztam (Nash and Sutcliffe 1970). Utóbbi értéke elfogadható egyezést mutat a 0,5 – 1,0 tartományban, nem kielégítő egyezést a 0,0 – 0,5 tartományban, míg a negatív értékek jelentése, hogy a mért idősorok átlaga jobb közelítést adna a modelleredményeknél. A kézi kalibrálás során a cél a térfogati és alaki eltérések közötti optimum keresése volt (az NSME értékek számítása az alaki egyezés minősítését szolgálja). Kielégítően pontos tározás számításhoz azonban elsődlegesen nem az árhullámok alakját kell pontosan leírni a csapadék-lefolyás modellel, hanem a lefolyásra kerülő térfogatokat. Az 5 kiválasztott eseményre kalibrált kezdeti telítetlenséget jellemző értékeket ( $IR_c$ ) a 3. táblázat tartalmazza. A kalibráció során kapott idősorokat és mutatókat a 7. ábra mutatja. A vizsgált 5 esemény közül az *e12*-es eseménynél a megfigyelt csapadék mennyiség kevesebb, mint a megfigyelt lefolyás, így ez esetén nem várható a továbbiakban sem kielégítő eredmény. A többi esemény esetén elfogadhatók a modelleredmények, kiemelendően jó eredményt az *e10* és *e13* eseményeknél adott a modell. A kalibráció összességében sikeresnek mondható.



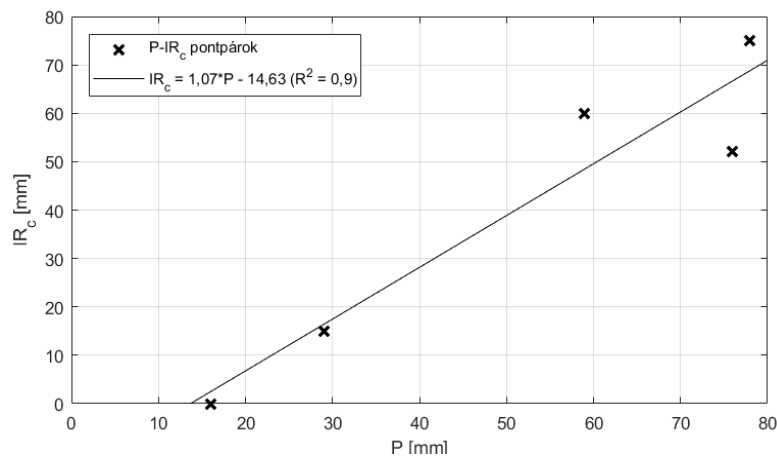
7. ábra: Modelleredmények a Szentgyörgyvölgyi-patak részvízgyűjtőre

A modell igazolása érdekében egyszerű, lineáris összefüggést kerestem könnyen meghatározható, a futtatás elején is ismert, eseményspecifikus jellemzőkkel. A talaj nedvességtartalma ( $SMC$ ) ingyenesen hozzáférhető műhold produktumokból meghatározható (EUMETSAT, H-SAF). A megelőző csapadékindex ( $API$ ) szintén széleskörben alkalmazott paraméter a vízgyűjtő telítettségének jellemzésére (Descroix, Nouvelot, and Vauclin 2002). Emellett ismertnek tekintetem az eseményre vonatkozó csapadékösszeget ( $P$ ), annak ellenére, hogy ennek csak előrejelzett ( $P_{fc}$ ) értékét ismerhetjük

a futtatás kezdetekor. Ahogy az a 8. ábrán is látható, a csapadékmennyiséggel igen szoros összefüggést mutatott a kalibráció során felvett telítetlenséget jellemző paraméter. A másik két mennyiséggel azonban nem volt kimutatható kapcsolata a vizsgált paraméternek. A felállított kapcsolat és az egyes eseményekre legelső lépésben előrejelzett csapadékösszeg alapján meghatároztam egy becsült ( $IR_e$ ) paraméter értéket, melynek eltérése az eredetileg kalibrált értéktől ( $\Delta IR$ ) maximálisan 59%-ra adódott. A modell igazoltsága ilyen kevés pontpár mellett nem kijelenthető, de az igazolás egy lehetséges iránya az itt bemutatott eredményekkel kijelölésre került. Az érzékenység vizsgálatot a későbbiekben ezekre az eredményekre alapozva végeztem.

	$IR_c$ [mm]	SMC [%]	API [mm]	P [mm]	$P_{fc}$ [mm]	$IR_e$ [mm]	$\Delta IR$ [%]
e02	60	34	189	59	44	32	46
e10	15	31	186	29	24	11	25
e11	52	42	266	76	34	21	59
e12	0	36	250	16	4	0	0
e13	75	43	223	78	64	54	28

3. táblázat: Eseményspecifikus mennyiségek és a kezdeti telítetlenség becsült értékei



8. ábra: Vízyűjtő telítetlenség és csapadékösszeg összefüggése

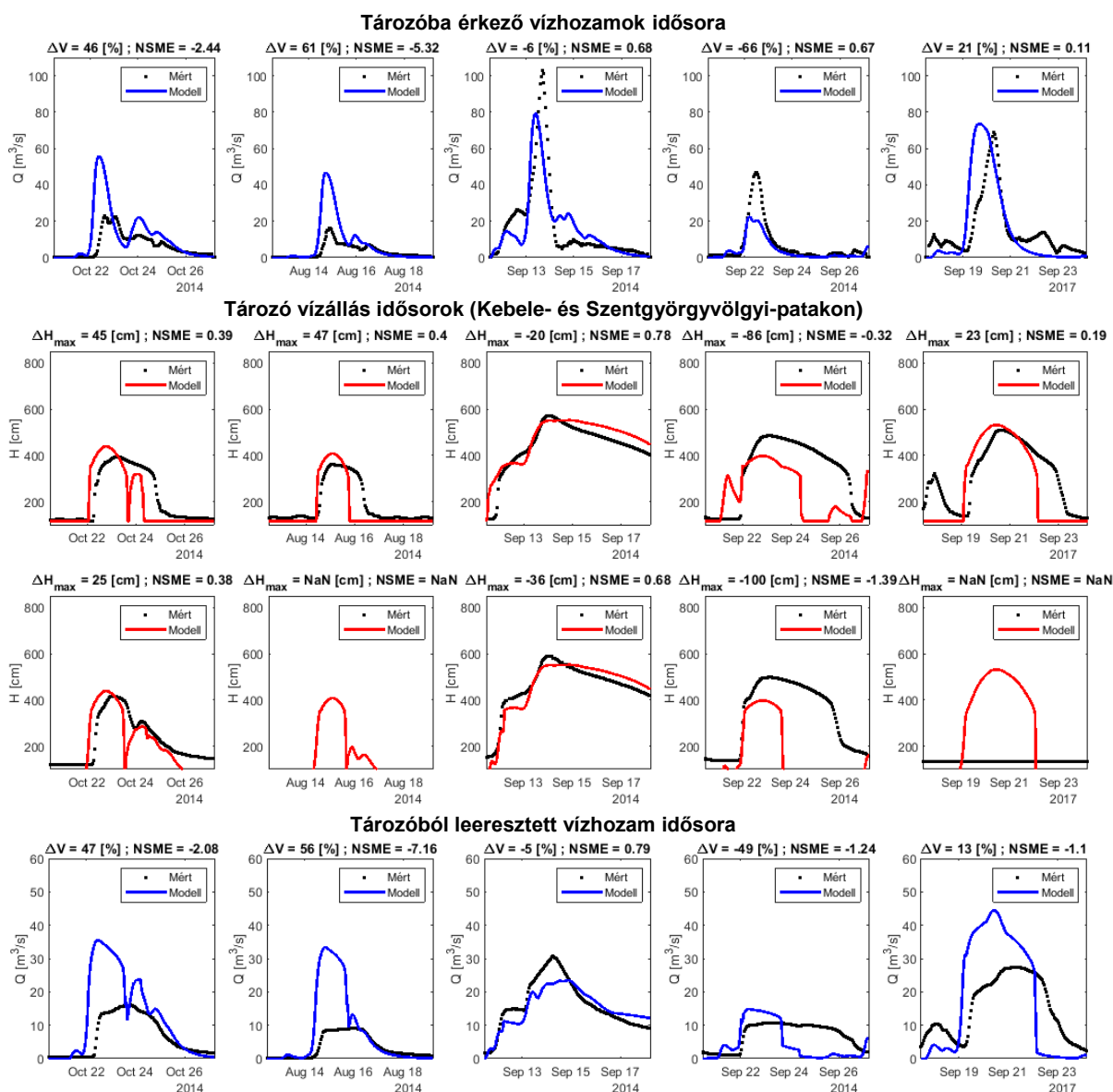
#### 4.2 Tározó vízállás számítása

Következő lépésben a Szentgyörgyvölgyi-patak részvízgyűjtőjére kalibrált csapadék-lefolyás modell paramétereit átveve a nem mért részvízgyűjtőkre (hidrológiai analógiát feltételezve) előálltak a tározóba érkező vízhozamok idősorai. Ezekből számítottam a tározó vízállás idősorát és az alvízi vízhozam idősort. A modellezett tározó vízállás megfelelőségét a tetőző vízállások különbségével és az NSME számításával jellemeztem. Az alvízi vízhozamok esetén a rédicsi szelvény idősorával hasonlítottam össze az átbocsátott vízhozam idősor és az alvízi részvízgyűjtő modellezett vízhozam idősorának összegét. A tározóba érkező, modellezett vízhozam idősorok összegét és a visszszámított felvízi idősort is összehasonlításra került. A vízhozam idősorok esetén a térfogatkülönbségek és az NSME mutatók szolgáltak az összehasonlítás alapjául. Az eredményeket a 9. ábra szemlélteti.

Annak ellenére, hogy a részvízgyűjtőre kalibrált csapadék-lefolyás modell legtöbb esetben alábecsülte a lefolyás mennyiségét, a tározóba érkező teljes vízhozamot 3 esetben túlbecsli a modell. Mindhárom esetben látható, hogy a tetőző tározó vízállásokat is felülbecsli a modell. Emellett a vízállások esetén szembevetendő, hogy az árhullámok lényegesen gyorsabban vonulnak át a tározón, mint a mért értékek szerint. Ezt magyarázza, hogy a modellezett alvízi vízhozamok lényegesen nagyobbak a mértnél.

A modelleredmények azonban így is jól közelítik a valóságot, hiszen egy ilyen modelltől nem a vízállás centiméteres pontossággal történő modellezése az elvárt. A modell a jelenlegi eredmények alapján (amennyiben nagyságrendileg megfelelő csapadékadatok állnak rendelkezésre) túlbecsli a vízhozamokat és a vízállásokat, így a biztonság javára téved.

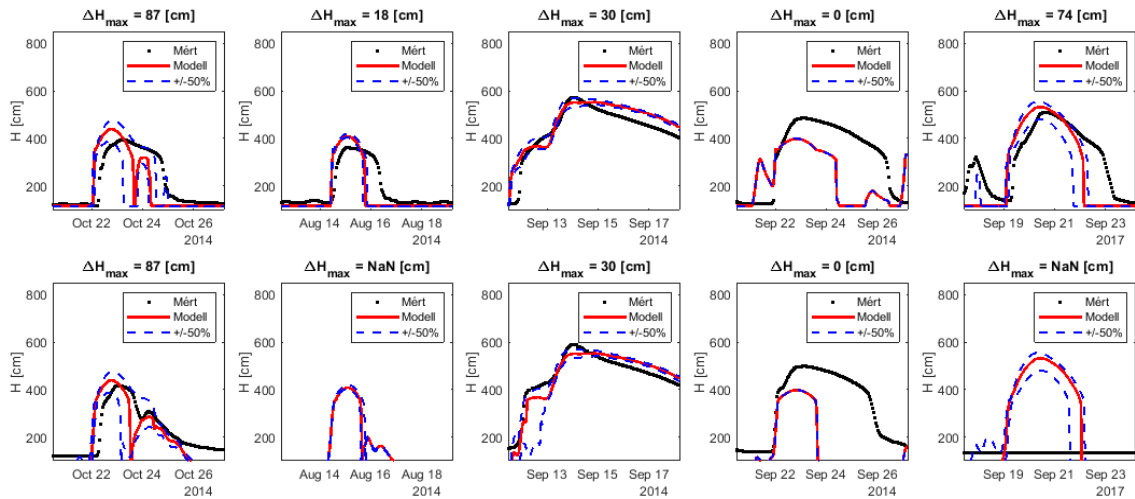
Az alkalmazott teljesítőképességi görbék feltehetően az alsó vízállás tartományban túlbecslik az átbocsájtott vízmennyiséget, ebből adódik a tározó gyors töltődése és kiürülése a modellben. Célszerű volna összevetni az ebben a tartományban megfigyelt vízállás és vízhozam értékeket, majd azokat összevetni a számított teljesítőképességi görbével.



9. ábra: Tározó vízállás számításának eredményei

### 4.3 Érzékenységvizsgálat

Az 4.1 fejezetben bemutatott összefüggés alapján az érzékenységvizsgálat során a kezdeti telítettséget jellemző paramétert +50 illetve -50%-kal változtattam a kalibrált értékekhez képest. Az így kapott modellezett tározó vízállás intervallumokat szemlélteti a 10. ábra. Az ábrákon feltüntetésre kerültek a tetőző vízszintek eltérései. Látható, hogy (nem nulla értékek esetén) 18-87 cm-ig terjednek az így kijelölt tetőző vízállás tartományok. Az vizsgálat kimutatta, hogy a modelleredmények nem érzékenyek annyira a kalibrálandó kezdeti paraméterre, hogy ellehetetlenüljön a tározó vízállás közelítő becslése.



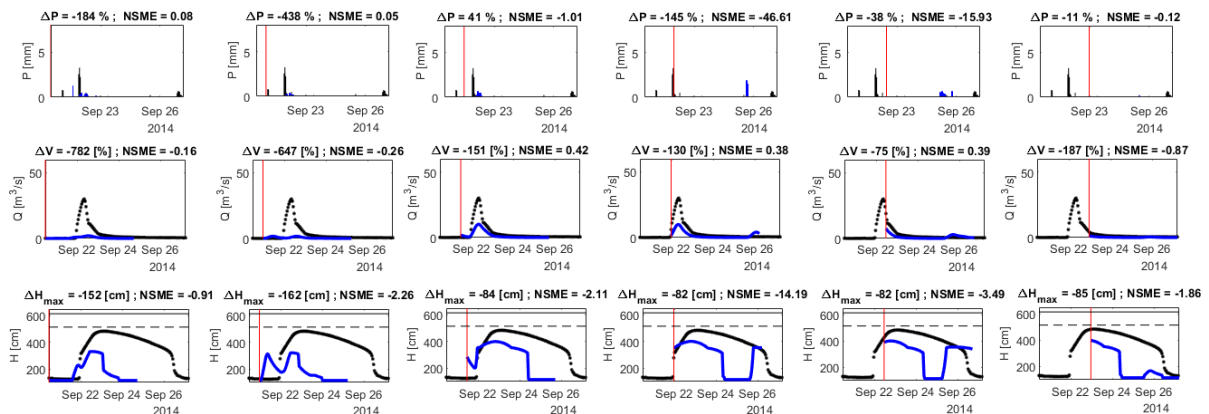
10. ábra: Érzékenységvizsgálat eredménye

### 4.4 Előrejelzési szimulációk

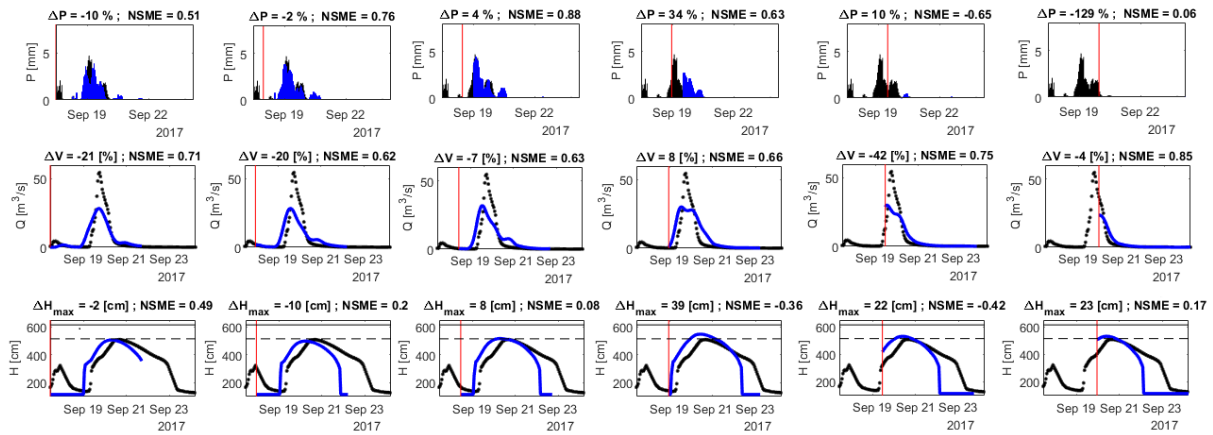
Az csapadék előrejelzést és annak összehasonlítását a mért idősorokkal mind az 5 eseményre és 6 időlépésre a 9.1 melléklet tartalmazza.

A 11. és 12. ábrák a legrosszabb és legjobb eredménnyel zárult futtatások eredményeit mutatják. Az ábrákon láthatók soronként az előrejelzett csapadék, lefolyás és tározó vízállás idősorok. A pirossal feltüntetett egyenesek az előrejelzés időpontját mutatják, mely oszlopként azonos. A tározó vízállás idősorok mellett feltüntetésre került a bukó koronaszintje (fekete szaggatott egyenes) és a töltés koronaszintje is (fekete folytonos vonal).

e12

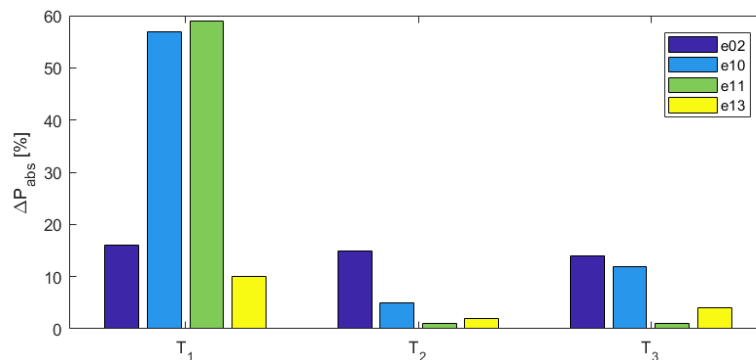


11. ábra: Legrosszabb szimulációs eredmények



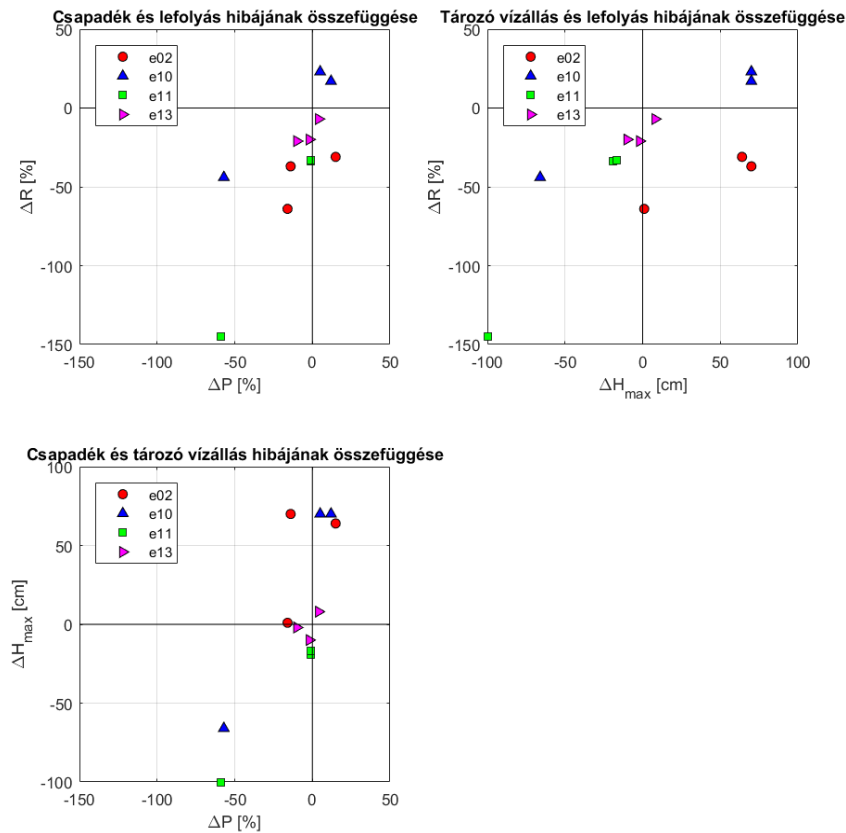
12. ábra: Legjobb szimulációs eredmények

Látható, hogy a csapadék-lefolyás modellezésnél tapasztalt módon az *e12* esemény esetében szinte teljesen hiányzik a lefolyást kiváltó csapadék mind a mért, mind az előjelzett idősből. Emiatt az előrejelzések hibáinak összehasonlításakor az erre az eseményre vonatkozó szélsőségesen nagy hibaértékek bemutatásától eltekintettem. A többi esemény esetében elmondható, hogy az előrejelzés kielégítőnek mondható. Az első előrejelzés esetén (ami eseménytől függően 24-36 órával a csapadék maximuma előtti időpontban történt) minden esetben alábecsli az előjelzett csapadékösszeg a mért mennyiséget, azonban időben előre haladva a becslés hibája csökken és az eltérés iránya is változóbb. Az abszolút eltérések csökkenését a csapadék maximuma előtti időelőny ( $T_1 = \sim 36$  óra,  $T_2 = \sim 24$  óra és  $T_3 = \sim 12$  óra) csökkenésével a 13. ábra mutatja.

13. ábra: Csapadék előrejelzés abszolút hibájának ( $\Delta P_{\text{abs}}$ ) csökkenése az előrejelzési időelőny csökkenésével

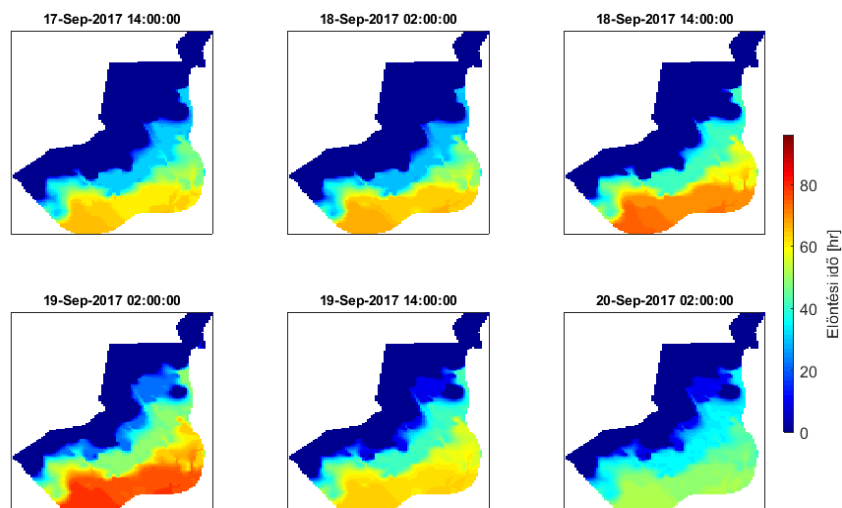
Az eredmények minden eseményre és előrejelzési időre megtalálhatók a 9.2 mellékletben a Szentgyörgyvölgyi-patak mért részvízgyűjtőjére. Az előrejelzett és mért lefolyás illetve csapadék hibáját ( $\Delta P$ ,  $\Delta R$ ) ábrázolva (14. ábra) jól látható, hogy eseményenként a legtöbb esetben a csapadék előrejelzés hibájának csökkenésével az előrejelzett lefolyás hibája is csökken, de általánosságban nem rendelhető egyértelműen hozzá egy csapadék előrejelzési hibához egy lefolyás előrejelzési hiba érték. Az is egyértelműen megmutatkozik, hogy a lefolyás legtöbb esetben kevesebb a megfigyeltnél, hiszen a modell már kalibráláskor is alábecsülte a lefolyást.

Az előrejelzett tározó vízállás idősorokat minden eseményre és időpontra a 9.3 melléklet tartalmazza. A 14. ábrán látható, hogy a lefolyás és tározó tetőző vízállás hibájának ( $\Delta H_{\max}$ ) összefüggése a csapadék és lefolyás hiba összefüggéséhez hasonlóan alakul.



14. ábra: Előrejelzett csapadék ( $\Delta P$ ) és lefolyás ( $\Delta R$ ) összegének, valamint a tetőző tározó vízállás ( $\Delta H_{\max}$ ) hibájának összefüggése

Az Igazgatóság által megfogalmazott két főbb gyakorlati haszna a tározó vízállás előrejelzésének az elöntési idők becslése, illetve riasztási fokozatok kiadása. Az elöntési idő térképre mutat példát a 15. ábra. A térképen a továbbiakban feltüntetésre kerülhetnek a kisajátítási és telekhatárok, valamint tetszőleges pontban lekérdezhető az elöntési idő értéke. A bemutatott eredmények alapján az kijelenthető, hogy az alkalmazott modell az eredmények további javítása mellett alkalmas lehet az említett felhasználási célokat megbízható eredményekkel kiszolgálni.



15. ábra: Példa (*e13*) előntési idő ábrázolására az egyes előrejelzés időpontokban (UTC+2)



## 5. Diskusszió és konklúziók

A modellezés során számos probléma merült fel, melyek közül talán a legfontosabb a felszíni állomások adatsorainak hibái, ugyanis a vízrajzi adatok elemzésekor számos probléma merült fel. A vízállás, vízhozam és csapadék adatok esetében is vannak feltehetően hiányzó adatok. Emellett a vízállás és vízhozam adatok esetén feltehetően hibás üzemelésből adódó, irreális értékek is előfordultak. A legszembetűnőbb problémák a következők voltak:

- hiányzó csapadék idősor meglévő lefolyás idősor mellett (nyári időszakban),
- rögzített csapadék-lefolyás értékek mellett 1-nél nagyobb lefolyási hányad,
- vízhozam idősorban áradó és apadó ág között hiányzó értékek,
- rögzített vízállás idősor egyik műtárgynál, hiányzó adatsor a másik műtárgynál,
- vízállások esetén ellenőrző leolvasások eltérése az automata műszer által rögzített értékektől.

Egyedül az utóbbi hiba forrása bizonyosan ismert, ugyanis az automata műszer úgy került kialakításra, hogy a gereb által felfogott hordalék visszaduzzasztása hibával terhelheti a méréseket. A hibás csapadék adatokat elsőnek megkíséreltem a környező állomások adott eseményre vonatkozó csapadékösszegei alapján korrigálni. Az eljárás esetenként biztatóan javította a Szentgyörgyvölgyi-patak mért részvízgyűjtőjére számított lefolyási hányad értékét, azonban a csapadék-lefolyás modellezés során nem minden esetben voltak kielégítőek az javított idősorokból kapott eredmények. Szerencsére az ECMWF adatbázisból nyert reanalízis adatok használhatónak bizonyultak. A felszíni állomások által rögzített adatok minőségét ettől függetlenül fontos lenne ellenőrizni, hiszen elsősorban a helyi mérések szolgáltatják a legtöbb esetben a legpontosabb adatokat, mivel a rácsra interpolált csapadékmezők általában épp a maximumok tartományában rendelkeznek a legnagyobb hibával.

Az eredmények tovább javíthatók a modellezési módszertan fejlesztésével. A Kebele-patak és a Szentgyörgyvölgyi-patak alsó vízgyűjtője részben kalibrálható volna a tározóba érkező visszszámított idősorok felhasználásával. A feltételezett hidrológiai analógia az eredmények alapján nem állja meg teljes mértékben a helyét, a két patak vízgyűjtőjének részletesebb hidrológiai vizsgálata célszerű (morfológiai paraméterek, területhasználat, stb. részletes összehasonlítása). Lehetőség van emellett más modelltípusok alkalmazhatóságának vizsgálatára (neurális háló, térben osztott modell). Érdemes volna a teljes modellezési folyamatot MATLAB környezetben implementálni, mivel a HMS modell nem alkalmas ilyen összetettségű modellezési feladat kiszolgálására, illetve ez az eredmények könnyebb előállítását, modell gyorsabb kezelését is elősegítené. Szükséges a hidraulikai számítások felülbíráltása, pontosítása is, ugyanis a modellezett alvízi vízhozam idősorok nem kielégítő pontosságúak.

Az előrejelzések futtatásakor felmerült a hideg/meleg indítás alkalmazásának dilemmája. Szükséges volna megvizsgálni, hogy a hideg indítás esetén mért kezdő vízhozamok és vízállások nyújtotta többletinformáció javít-e az eredményeken. A hideg indítás hátránya emellett, hogy a vízgyűjtő kezdeti telítetlenségét leíró paramétert is fel kell venni minden futtatási lépés elején, ami ronthat az eredményeken. Lehetőség van továbbá ensemble előrejelzés készítésére az ECMWF modellben előállított 51 ensemble tag felhasználásával. A MATLAB-ban implementált modellben lehetőség volna a modell paraméterek perturbálására is, így a tározó vízállás már megbízhatósági tartományokkal együtt kerülne előrejelzésre.

A vizsgálat eredményei alapján a modell alkalmasnak tűnik az előntési idők becslésére és előzetes riasztási fokozatok kiadására. A modell módszertani fejlesztése mellett az eredmények további javulása várható. Végül szükséges kiemelni, hogy a modell alkalmazhatóságát mindenképp célszerű tesztelni más tározók esetén is.

## 6. Köszönetnyilvánítás

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BMEFIKP-VÍZ tématerületi programja keretében.

## 7. Irodalomjegyzék

- Bede-Fazekas, Ákos, Tamás Czira, Bálint Czúcz, Tamás Fancsik, Emese Homolya, Péter Hajner, Attila Kovács, Tamás Kovács, Nikolett Lepesi, Annamária Marton, Zsolt Mattányi, László Orosz, Tamás Pálvölgyi, István Popovics, Ágnes Rotárné Szalkai, Pál Selmeczi, Benedek Simó, Attila Sipos, Imelda Somodi, László Sörös, Mária Szalmáné Csete, Teodóra Szócs, Lilla Taksz, György Tóth, and Gábor Turczi. 2016. *Tudásmegosztás, Alkalmazkodás És Éghajlatváltozás: A Magyar Földtani És Geofizikai Intézet Kutatás-Fejlesztési Eredményei a Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer Létrehozására*. Budapest: Magyar Földtani és Geofizikai Intézet.
- Descroix, L., J. F. Nouvelot, and M. Vauclin. 2002. "Evaluation of an Antecedent Precipitation Index to Model Runoff Yield in the Western Sierra Madre (North-West Mexico)." *Journal of Hydrology* 263(1–4):114–30.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. "River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I — A Discussion of Principles." *Journal of Hydrology* 10(3):282–90.
- Scharffenberg, W. 2016. "Hydrologic Modelling System HEC-HMS, User's Manual." *US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center* (August).
- Singh, V. P. (Vijay P. ..., Pratap (Hydrologist) Singh, and Umesh K. Haritashya. 2011. *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Springer.
- US Army Corps of Engineers. 2000. "Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual." (March):158.
- Wisnovszky, Iván. 1958. "Az Összegyülekezési Idő Számítása." *Hidrológiai Közöny* (3):195–200.