

2020. ÉVI NYÁRI NAGYCSAPADÉK OKOZTA ÁRHULLÁM VIZSGÁLATA A MARÓTVÖLGYI-CSATORNÁN

Batki Bruno Barnabás

szakágazati vezető

Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság

KIVONAT

A dolgozat témája, mint ahogy a címe is mutatja, 2020 júliusában lehullott rendkívüli csapadék okozta árhullám vizsgálata volt. Az eseményt azért kellett rekonstruálni, mert a tetőző vízhozamok és vízszintek körül – bár helyenként mérve voltak – ellentmondásos szakmai vélemények alakultak ki. Mivel a vízfolyáson az esemény bekövetkezése előtt jelentős beavatkozásokat végeztek – belvízvédelmi öblözet kialakítása és szelvényáthelyezési, fenntartási munkák formájában ezért egy ilyen rendkívüli árhullám levonulásának ismerete különösen fontos. Mivel az árhullám precedens nélküli volt, ezért kevés kapaszkodót nyújtott annak pontos rekonstrukciójához. Dolgozatomban tehát több módszert is bevettem a hidrológiai modelleken át a műholdképek vizsgálatán keresztül a terepmodellek elemzéséig és hidraulikai számításokig. A dolgozat jól tükrözi, hogy milyen komplex esemény tud lenni egy árhullám és, hogy mennyi befolyásoló tényező van. Azonban ez a dolgozat reményeim szerint összefoglalja a lehetőségeinket, amennyiben egy-egy árhullámról annak kiterjedése vagy komplexitása miatt kevés információ gyűjthető.

Előzmények

A 2020-as évben több kisebb és nagyobb árhullám vonult le vízfolyásainkon, ám mind közül kiemelkedőek a július végi, mennyiségében és intenzitásában is extrémnek mondható csapadéktevékenység okozta események. A helyeként 100 mm-t is meghaladó napi-kétnapi csapadék inkább a kisvízfolyásokat, mintsem a nagyobb folyóinkat érintette, így előbbi kategóriába tartozó patakokon és csatornákon több helyen is LNV-t meghaladó vízállás alakult ki. Így történt a Marótvölgyi-csatornán is, ahol a főnyedi mérőállomáson 10 cm-el haladta meg a vízállás a mérések kezdete óta valaha mért legmagasabbat. Ugyan sok kisebb vízfolyáson hasonló helyzet alakult ki, ám a Marótvölgyi-csatorna azért is érdekes mert a vízfolyáson 2019-ben vízrendezési munkákat végeztek, melyek jelentősen befolyásolták egy-egy árhullám levonulását a korábbiakhoz képest. A munkák fő célja egy belvízöblözet kialakítása volt, mederáthelyezéssel, mederkotrással és iszapolási munkákkal. Ugyan főként belvízi célú beavatkozások történtek de a projekt része volt a meder árvízi levezetőképességének növelése is. Az elméletet hamar gyakorlat követte, hiszen alig 1 évvel a munka átadása után rendkívüli árvízi esemény alakult ki a vízfolyáson, amely lehetőséget adott arra, hogy az elkészült munka és a tervezés is éles helyzetben igazolást nyerjen. Azonban az árhullám nem vonult le károkozás nélkül, sem az újonnan átadott műtárgyak környékén, sem máshol. Felvetődik a kérdés tehát, hogy az árhullám milyen mértékben volt rendkívüli. A csatornát Q10%-os vízhozam levezetésére tervezték fél méteres magassági biztonsággal, ami akár a Q1% levezetését is biztosítaná, legalábbis a terv szerint. Erről a nagyvízi eseményről azonban kevés kézzelfogható mérési eredményünk van, melynek főbb okai a következők: 1. a kiterjedt csapadéktevékenység miatt a vízhozammérő csapatainknak hatalmas területen, nagyon sok mérést kellett végrehajtaniuk, így nem volt idő arra, hogy egy vízfolyáshoz ragadva végig mérjük az árhullámot; 2. a Marótvölgyi-csatornán 1 helyen van vízhozam és vízállás nyilvántartó vízrajzi állomás, mégpedig a torkolati szelvényhez közel, Főnyeden. Így csak a vízfolyás legalsó szakaszáról vannak regisztrált vízállás illetve mért vízhozam adataink.

Ebből kifolyólag tehát nem tudjuk egzaktul megmondani, hogy a levonult árhullám valójában milyen visszatérési gyakoriságú volt. Így azt is nehéz megmondani, hogy az elkészült munkák

valóban úgy épültek-e ki, hogy le tudják vezetni a tervezett visszatérési idejű árhullámot, vagy tervezési, esetleg kivitelezési hiba okozta a károkat.

Dolgozatomban erre próbálok választ találni, a fellelhető információk gyűjtésével, matematikai-hidrológiai és hidraulikai modellek és műholdképek felhasználásával.

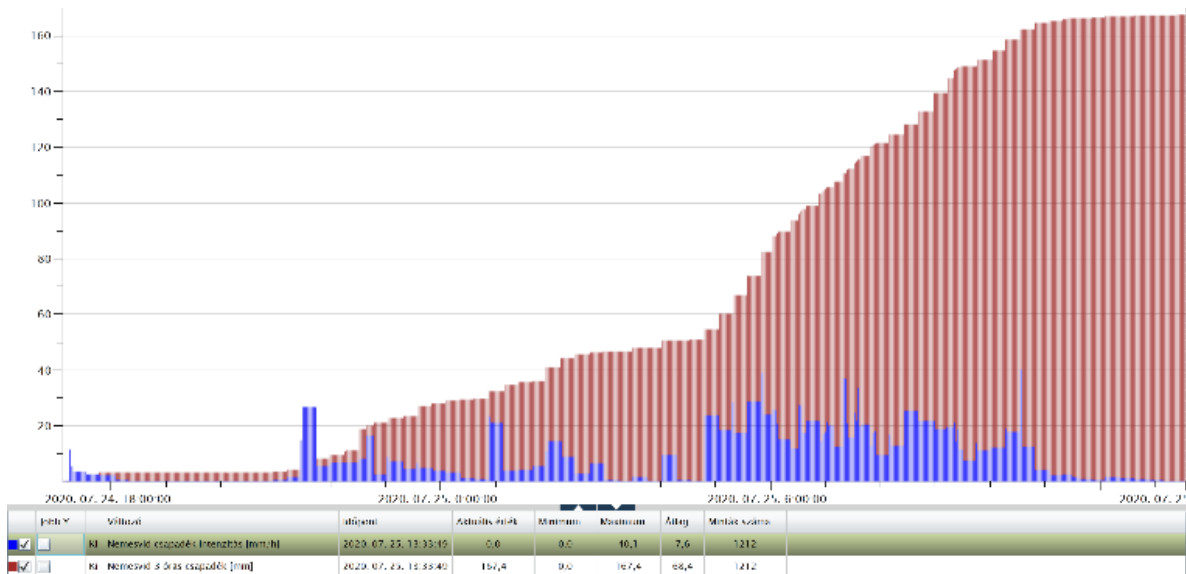
A Marótvölgyi-csatorna

A Marótvölgyi-csatorna egy lényegében mesterségesé vált mérsékelt dombvidéki vízfolyás, melynek teljes hossza 25,7 km, teljes vízgyűjtő területe: 225,2 km². A csatorna dél-északi irányban folyik, völgyében töltésezett halastavak találhatóak. Alsó szakaszának átlagos esése 20 cm/km. Mederanyaga homokos iszap, kisvízi mederszélessége 2-4 m. Befogadója a Kis-Balaton vízvédelmi rendszer II.-es üteme azaz a Fenéki-tó. A vízfolyás egy felső és egy alsó szakaszra osztható. Alsó szakaszán 1993-ban kiépült az északi részöblözet, míg a déli belvízi részöblözet kiépítése csak 2019-ben valósult meg. Mivel a csatorna alsó szakaszának állapota jelentősen befolyásolja a déli részöblözetben kialakuló vízszinteket ezért a projekt része volt az alsó szakaszon (0+000 – 4+134 fkm között) az erősen feliszapolódott meder és a magassági hiányos töltések, depóniák eredeti állapotának visszaállítása. Ez a Q10%-os árvízi vízhozamnak (23,2 m³/s) megfelelő árvízszint előntés nélküli levezetésének biztosítása 0,5 méteres magassági biztonsággal. Ennek érdekében ezen a szakaszon mederkotrás munkák történtek. A déli részöblözet 2,1 km² nagyságú, töltésekkel bevédett terület a 7.sz közlekedési úttól a 6811. jelű összekötő útig tart. A ZS1 és ZS2 jelű zsilipeken keresztül szabályozható az öblözetbe jutó és onnan távozó víz mennyisége. Az öblözetben belül maradt eredeti mederszakasz (4+190 és 7+026 fkm között) a továbbiakban Marótvölgyi belvízcsatornaként funkcionál.

Az öblözetben kívül kiépült a csatorna egy áthelyezett szakasza, melyet szintén Q10%-ra terveztek. Az eredeti tervezés és a megvalósítás között eltelt hosszú idő miatt az áthelyezett szakaszt az eredeti nyomvonalon nem lehetett megépíteni mivel ott tőzgebányát létesítettek, így attól 50 m-re az eredeti vonalvezetéssel közel párhuzamosan épült ki. Ennek egyik hátránya egy közel 90°-os bal kanyar a ZS2 zsilip előtt a csatorna vonalvezetésében, melynek a későbbiekben még lesz szerepe. Kiépült továbbá az öblözet keleti oldalán a Somogyásomsoni-övérek amely közel 20 km² területről gyűjti össze a vizeket és vezeti azt a befogadó Marótvölgyi-csatornába. Látható tehát, hogy a 10 éves gyakoriságú nagyvízhozam levezetése a tervezés szerint nem jelenthetne problémát, illetve a fél méteres magassági biztonság azt jelenti, hogy akár a Q1%-os 30,4 m³/s-os vízhozam levezetése is lehetséges. Mivel azonban ez nem történt meg károkozás nélkül, továbbra is adódik a kérdés: vajon volt-e ekkora vízhozam a projekt által érintett szakaszon?

Hidrometeorológiai helyzet

2020.07.24-25.-én az ország déli-délnyugati tájain nagy mennyiségű, területileg kiterjedt csapadék hullott, több helyen meghaladva a 100 mm csapadékmagasságot. Kezdetben záporok voltak, majd egy sekély ciklon csapadékszámát érte el a térséget. Változó intenzitással, de folyamatosan 24-én este 10 órától 25. délig hullott le a rendkívüli csapadék. Az 1.sz. ábrán a nemesvidi automata csapadékmérő által mért csapadékösszeg és intenzitás értékek láthatóak. Itt 18 óra alatt 168 mm esőt regisztráltunk, de kiemelkedő a hajnal 5-től délelőtt 11 óráig tartó szakasz, ahol az átlagos intenzitás 17 mm/h óra volt, de rövid időre a 30-40 mm/h-t is elérte. Gyakorlatilag 6 óra alatt lehullott a július havi sokéves átlagmennyiség.

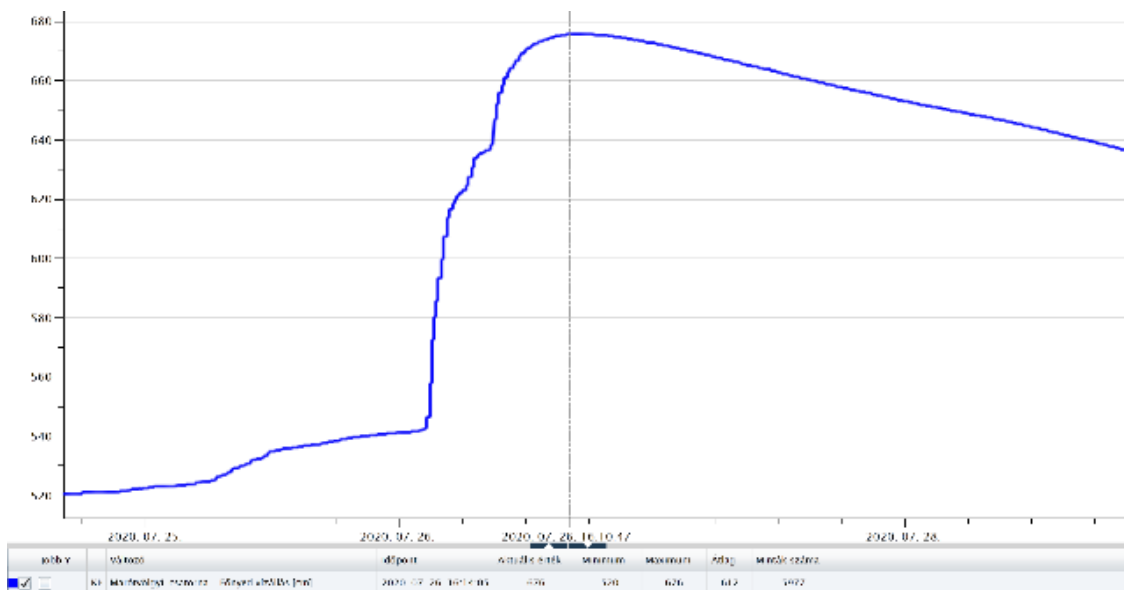


1. ábra. Nemesivdi csapadékadatok (WebSCADA)

A csapadék, bár nagy területet érintett, nem volt egyenletes, hiszen a vízgyűjtő alsó részén található Főnyed OMSZ állomás „csak” 110 mm-t regisztrált ugyanebben az időszakban. Több mérést figyelembe véve területi átlagban 140 mm csapadék hullott a Marótvölgyi-csatorna vízgyűjtő területére. A megelőző időszakban kevés csapadék hullott főként lokális záporok, zivatarok formájában, általánosságban napos nyári meleg idő volt a jellemző. A Marótvölgyi-csatornában Főnyedél az esőzést megelőzően mindössze 0,1 m³/s vízhozam folyt.

Az árhullám levonulása

Az esőzés hatására a főnyedi mérőállomásnál hajnal 3-ig lassú ütemben 20 cm-t emelkedett a vízszint, majd hirtelen 5 óra alatt 1 métert, majd egy szintén nagyon intenzív szakaszt követően további 40 cm-t, így 25.-én 15 órakor 676 cm-en tetőzött az árhullám, ami azt jelenti, hogy több mint 1,5 métert emelkedett a vízszint 20 óra alatt, ebből 130 cm-t 10 óra alatt. Ezt követően lassú apadás kezdődött. A főnyedi vízmércénél regisztrált vízállás adatok láthatóak az 2.sz. ábrán.



2. ábra. Marótvölgyi-cs. - Főnyed vízállás (WebSCADA)

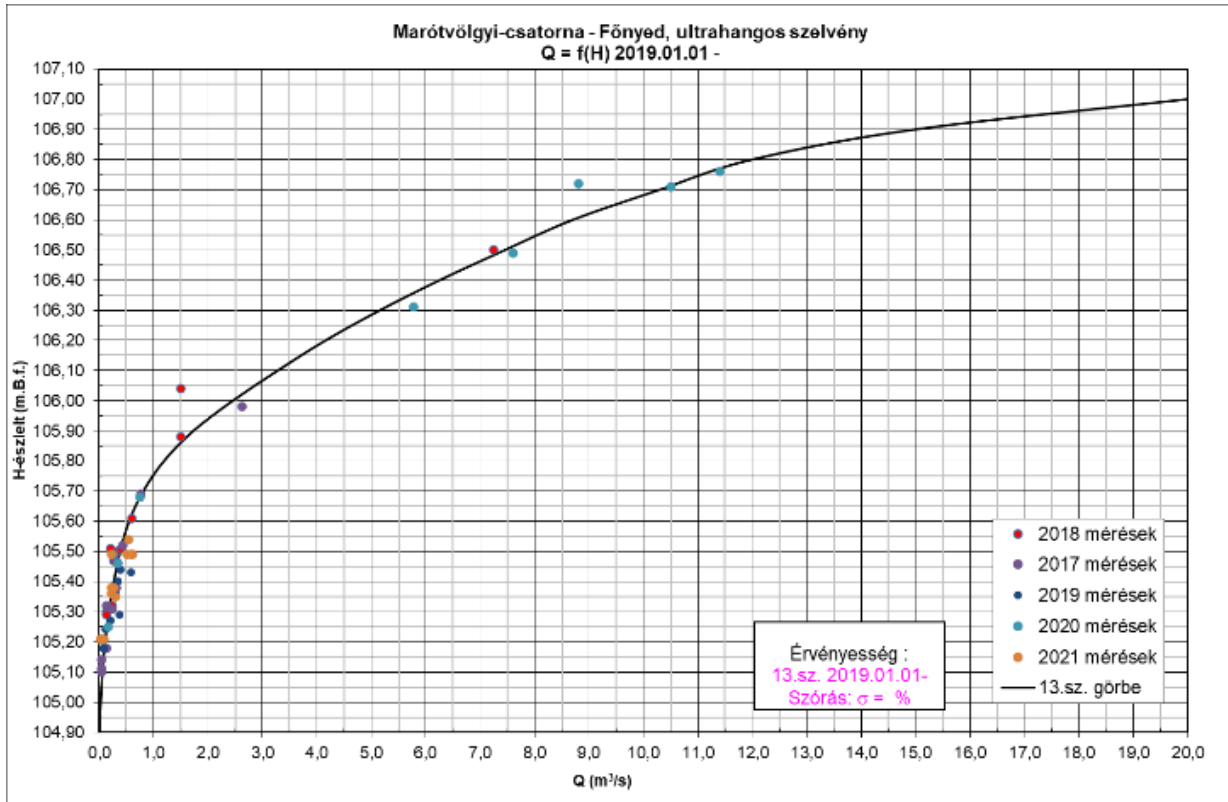
Érdekesebb azonban az árhullám levonulása a felsőbb szakaszokon és a déli részöblözet környezetében. Itt vízrajzi állomásunk nincsen, azonban a szakaszmérnökség és a védekezésben résztvevő kollégák számos nyomot rögzítettek. A tetőzési szintek minden mért ponton (6811.sz. híd, 52-es jelű híd, 7 sz. főút hídja és a főnyedi vízmérce) a Q10%-os tervezési szint felett alakultak átlagosan közel 0,5 méterrel. A ZS2 zsilipnél -amely a déli belvízöblözetet zárja le-, az érkező árhullám meghágta a töltést 35 méter hosszban, 30 cm magassággal és jelentős mennyiségű víz ömlött át rajta (1. kép).



1. kép. ZS2 zsilip tetőzés környékén

Becslések szerint az NA60 cm-es betonátereszen és a meghágásból fakadóan a déli belvízöblözetbe távozó víz mennyisége elérte az 1.400.000 m³-t. A 7-es számú főút alatt egy elzárási lehetőség nélkül épült NA160 cm-es átereszen keresztül szintén becslések szerint 200.000 m³ víz ömlött az északi részöblözetbe. Az áthelyezett szakaszon 2 helyen is töltésmeghágás miatt, illetve a 6811 sz. összekötő úton való útátfolyás következtében is távozott jelentős mennyiségű víz a rendszerből. A töltésmeghágások okait később a magassági hiányos kivitelezésben állapította meg a káresemények vizsgálata alapján a VIZITERV Environ Kft. Ugyanez a vizsgálat jutott arra az eredményre, hogy a tetőző vízszintek alapján a ZS2 jelű zsiliphez érkezett vízhozam jócskán meg kellett haladja a tervezési 23,2 m³/s-os vízhozamot. Mindez ugyanakkor a NYUDUVIZIG mérései alapján nem igazolható, ugyanis a tetőző vízhozam ADCP mérés alapján 11,4 m³/s volt a főnyedi szelvényben. Ez a szám még akkor is kevésnek tűnik, ha elfogadjuk az előzőekben már említett távozó vízmennyiségeket, hiszen az a víztömeg értelemszerűen nem, vagy csak késleltetve ért oda mérőszelvényhez. Véleményük szerint a csúcsvízhozam a főnyedi szelvényben is meg kellett haladja a 20 m³/s-ot. Ezt a véleményüket arra alapozták, hogy a tervben és a geodéziai felmérésben jelentősen nagyobb, kb. dupla szelvényterületet feltételeztek a vízhozammérés helyén, utólag kiderült, hogy nem egy helyre gondoltunk a vízhozammérési szelvény alatt. Habár az ADCP által és a geodéziai bemérés által mért keresztzelvény között ezen félreértés tisztázása után is maradtak különbségek, az nagyságrendileg nem változtat a mért vízhozamon. Ha elfogadjuk a kb. 3m² különbséget, az akkor

is 13-15 m³/s-nál nem eredményezhet nagyobb vízhozamot. Ettől függetlenül egy árvízi esemény alatt felvett keresztmetszélynyt és egy utólagos geodéziai bemérést az idő és a körülmények változása miatt nem lehet ily módon összevetni. Továbbá az a tény, hogy a főnyedi szelvényben hasonló vízszintek mellett sem mértünk soha 10 m³/s-nál nagyobb vízhozamot, illetve a mérésekből számított QH görbe alakja (3.sz. ábra) is a mérésünk helyességét támasztja alá. Ezért a főnyedi szelvényben végrehajtott vízhozammérésekre - amelyek egyébként világszínvonalú műszerekkel a hatályos szabványok és műszaki utasítások szerint lettek elvégezve – továbbra is biztos adatként tekintünk.



3. ábra. Marótvölgyi-cs. - Főnyed QH görbe

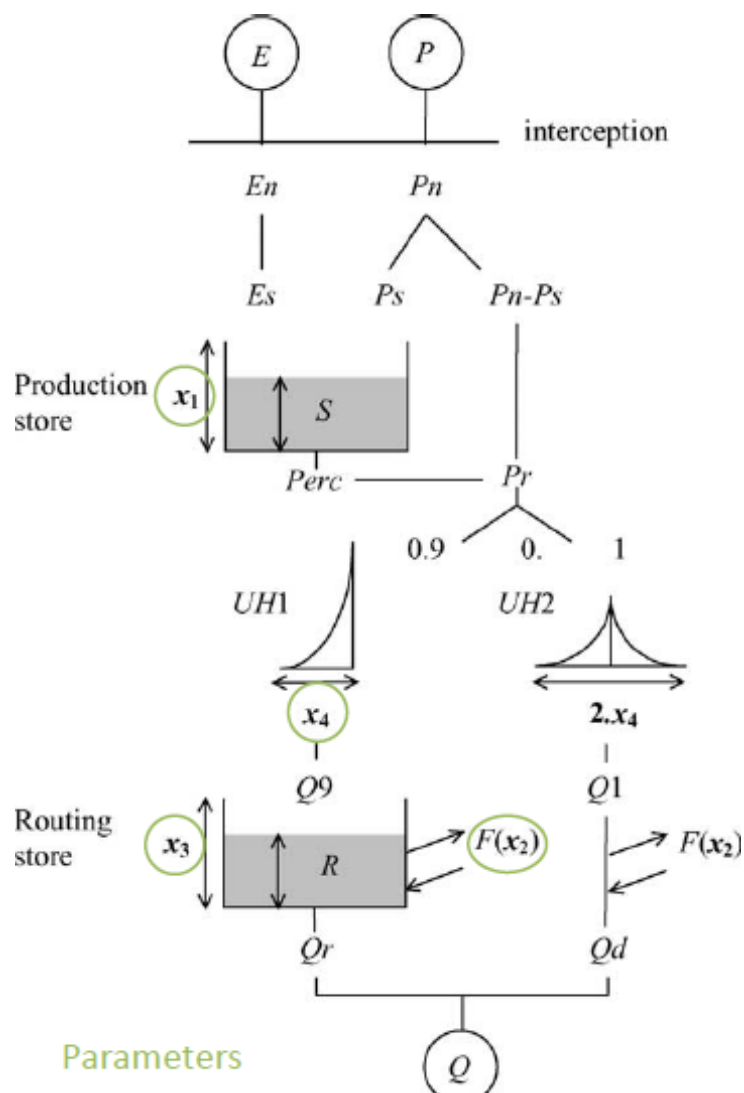
Mindent figyelembe véve azonban nem mehetünk el a tény mellett, hogy nem ismerjük a vízhozamokat amelyek jelentős károkat okoztak, még akkor sem, ha bizonyítást nyert, hogy kivitelezési hiányosságok vezettek azokhoz. Ennek érdekében különböző módszerekkel próbáltam rekonstruálni az eseményeket, remélve hogy pontosabb képet kapok az árvíz levonulásáról.

GR4J hidrológiai modell

Legelső módszerként megpróbáltam egy egyszerű csapadék-lefolyás modellt felépíteni a Marótvölgyi-csatornára, hogy képet kapjak a vízgyűjtő viselkedéséről. Mivel az alapfeltevés az, hogy a főnyedi szelvénybe azért érkezett meg kevesebb víz, mert egy jelentős része a déli belvízöblötben betározódott, ezért úgy gondoltam, hogy egy jól kalibrált modellbe betáplálva az ismert csapadék adatokat, eredményül kaphatok egy kiöntés nélküli árhullámképet. Mivel mért vízállás és vízhozam adat kizárólag a főnyedi mérőállomáson volt, ezért nem volt értelme osztott paraméterű modellt használni. Erre a célra a GR4J nevű hidrológiai modellt alkalmaztam.

A GR4J egy ún. „takarékos” csapadék-lefolyás modell, ahogy azt elnevezése fordítása is mutatja. Négy karaktere a következő francia kifejezés kezdőbetűi: „mode`le du Génie Rural a` 4

paramètres Journalier”, magyarul Területi (Agrár)Mérnöki modell Napi 4 paraméterrel (igazából „4 paraméterű napi felbontású területi vízgazdálkodási modell” lenne a megfelelő magyar fordítása). Ez egy összevont paraméterű, matematikai, determinisztikus és ún. konceptuális rendszer. Konceptuális alatt azt értjük, amikor a modellen belül számított paraméterek nem feltétlenül a fizikai valóságot tükrözik, jobban mondva a belső folyamatokat nem a fizika egyenletekkel írja le, ám valamilyen elméleti koncepció alapján azokból mégis a valóságot adja vissza végeredményül. A GR4J egyszerűsége ellenére az SMA (Soil Moisture Accounting), azaz a talajnedvességet figyelembe vevő modellek közé tartozik és világszerte alkalmazzák – a Google Scholar-on 2720 cikket és publikációt találni. Bemenő adatként a modellnek csapadék illetve potenciális evapotranspiráció értékekre van szüksége egynapos bontásban, eredményül napi vízhozam értéket ad. Természetesen, ha ellenőrizni is akarjuk a működését akkor szükségünk van legalább ilyen felbontású megfigyelt vízhozam értékekre is. A fentebb már említett 4 paraméter (x_1 - x_4) az egyes belső számítási lépések együtthatói. A modell kalibrálásánál ezeknek az együtthatóknak kell megtalálni a legjobb beállításait. A paraméterek 4 folyamathoz kapcsolódnak, az x_1 : a talajfelszín maximális tározóképességére; x_2 : a talajvízcserére; x_3 : a talaj pórusaiban tárolt vízmennyiségre; x_4 : az egységárhullámkép időtényezőjére vonatkozó együttható. Mivel a cikk terjedelme nem enged részletesebb ismertetést, ezért az 4.sz. sematikus ábra hivatott a modell működését bemutatni.

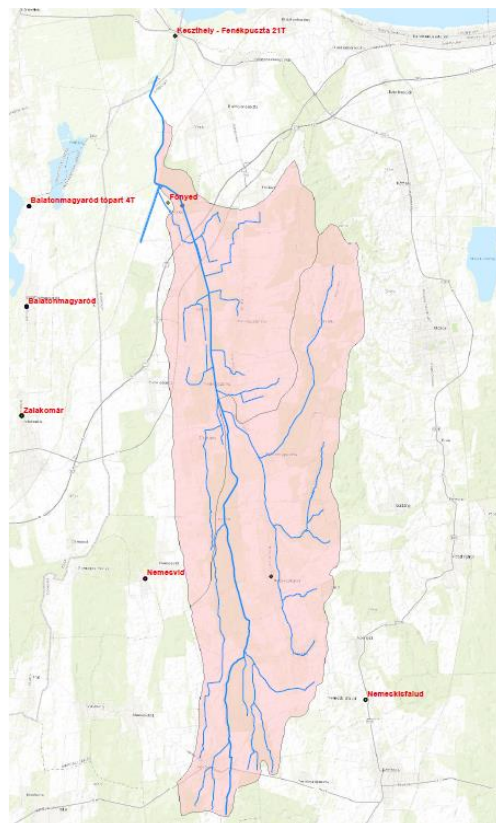


4. ábra. GR4J modell sematikus ábrája

Mivel az összevont paraméterű modellekben a teljes vízgyűjtőt egy egészként kezeljük, ezért a bemenő adatokat is a teljes vízgyűjtőre vonatkozóan adtam meg. A vízhozam adatokhoz a vízrajzi adatbázis számított (feldolgozottból) értékeinek napi átlagát használtam, ezek az adatok 1996-tól álltak rendelkezésre. Csapadék adatoknál már nem volt ilyen egyszerű dolgom. A vízgyűjtőn ugyanis 1 csapadékmérő állomás helyezkedik el Főnyeden, ami csekély mértékben ad képet a hosszan elnyúló vízgyűjtő csapadékterheléséről. Szerencsére a vízgyűjtő körül számos észlelt vagy automata csapadékmérő helyezkedik el, melyek adatai területi átlagolás után kivetíthetők a vízgyűjtőre. Az állomások felsorolását a 1. táblázat, elhelyezkedésüket a 5. sz. ábra szemlélteti. Mivel az állomások rendelkezésre állása időben változó volt 1996-tól napjainkig, ezért több időszakot kellett elkülönítsek. Ez azt jelenti, hogy volt amikor 3 állomás adatait, volt amikor 5 állomás adatait tudtam felhasználni és ezek variációja sem volt egyforma.

1. táblázat. Csapadékmérő állomások

Név	Kezelő	Adatok
Nemeskisfalud	OMSZ/VIZIG	2009 -
Nemesvid	OMSZ/VIZIG	2006- [2014(A)]
Nagyszakácsi	VIZIG	1996-2005
Zalakomár	VIZIG	1996- [2014(A)]
Főnyed	OMSZ/VIZIG	2014-
Balatonmagyaród	VIZIG	1996-
Balatonmagyaród 4T	VIZIG	1996-
Keszthely-Fenekpuszta 21T	VIZIG	1996-



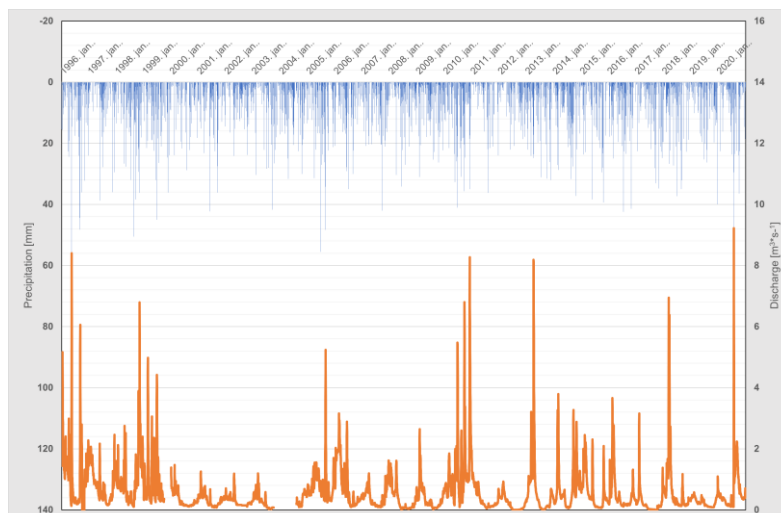
5. ábra. Csapadékmérő állomások térképen

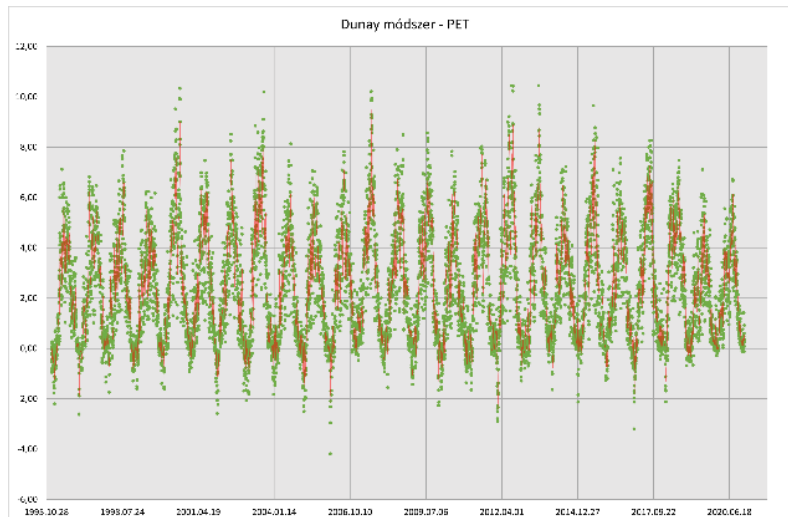
Az átlagoláshoz a Thiessen poligon módszert használtam, majd a poligonokat ArcGIS-ben el-metszettem a vízgyűjtő határával (mivel a poligonok túlnyúltak ezen), ezután a „maradék” po-ligon területét elosztottam a teljes vízgyűjtő területtel és így kaptam egy súlyozási értéket az egyes csapadékmérő állomásokra. Ezzel a módszerrel megkaptam azt a napi 1 csapadékatot ami jellemző volt a teljes vízgyűjtőre nézve.

A potenciális evapotranspirációra (PET) ugyanakkor nem állt rendelkezésre adat. A számítá-sára azonban rengeteg képlet létezik a nagyon bonyolultokról a viszonylag egyszerűekig. Én ez utóbbit választottam, pontosabban a magyarországi viszonyokra jó közelítésként alkalmaz-ható Dunay-módszert, ami a következő képlet szerint számítja a PET-t.

$$PET = \frac{1 - rn_k}{2 - rn_k} t_k$$

Ahol rn_k a relatív páratartalom napi középértéke egész számban kifejezve, t_k pedig a napi közép-hőmérséklet. A képlet természetesen nem veszi figyelembe a potenciális párolgást erősen be-folyásoló szelet vagy nettó sugárzást, de egyszerűsége és kis adatigénye miatt esetemben cél-szerű volt alkalmazni. Mivel automaták adatai nem álltak rendelkezésre 1996-tól ezért az Ország-os Meteorológiai Szolgálat nyílt adatpolitikáját kihasználva az odp.met.hu oldalon kerestem re-latív páratartalom és átlaghőmérséklet adatokat. Kellő sűrűségű (napi) adatsorként csak a rácsponti adattömböket tudtam felhasználni, ami azt jelenti, hogy elég sűrű felbontású (néhány km-es) rácshálóval lefedték Magyarország területét és minden egyes rácspontra számítottak egy értéket. Ezek az értékek egy brutális adatmennyiségű .txt fájlban érhetőek el, melyek évenként 4 megabájtnyi rácsponti számértéket tartalmaznak. Aki látott már .txt fájlt az tudja, hogy a 4 MB ennél a kiterjesztésnél elég komoly érték. Ezért először ArcGIS-ben ábrázoltam egy napot, majd megnéztem hány rácspont esik a Marótvölgyi csatorna vízgyűjtőjére. 9873 db rácspontból 3 db bírt ezzel a tulajdonsággal. Mivel ezt egyenként nehéz lett volna kiszedni 1996-tól 2020-ig min-den egyes napra, ezért az RStudio nevű statisztikai-programozó szoftverben írtam egy egyszerű programot, ami a nagy adatmennyiségű .txt fájlból minden egyes napra kiszedi a szóban forgó 3 db rácspont értékét, majd ezeknek veszi a számtani átlagát és egy .csv fájlt ad eredményül ezek-vel az értékekkel. Azért a számtani átlagot használtam, mivel a 3 db rácspont közel egyenletesen helyezkedik el a vízgyűjtőn, tehát a területi súlyozás nem adott volna lényegesen pontosabb eredményt. Miután végrehajtottam ezt a procedúrát a középhőmérséklet és a relatív páratarta-lom rácshálókra és megkaptam azok napi adatsorait, már könnyű volt kiszámolni a Dunay-kép-lettel a PET-t. Megvolt tehát az input adatsor. A modell futtatását a korábban már említett RStudio statisztikai-programozó szoftverben végeztem el.





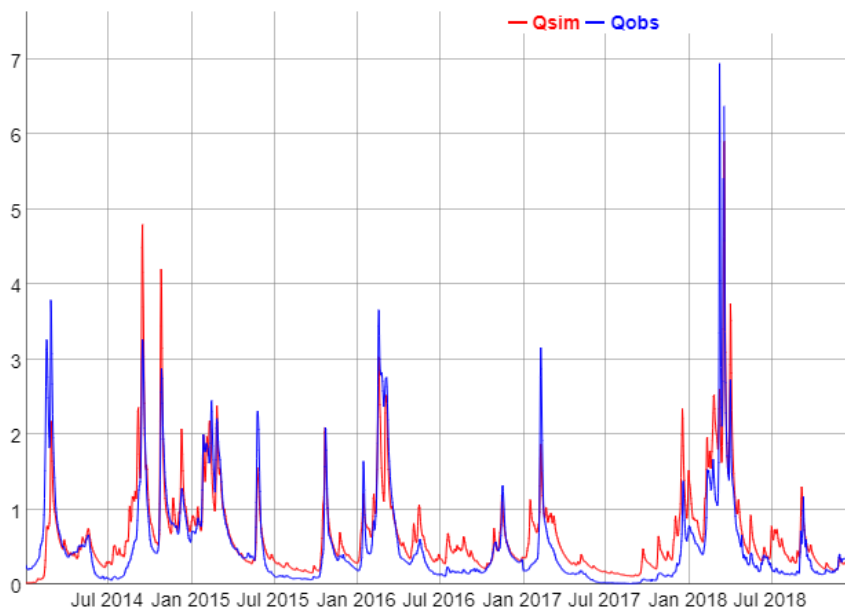
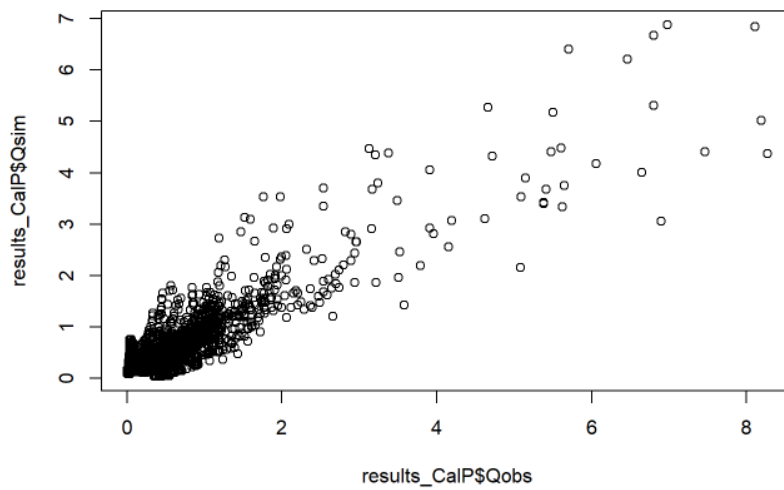
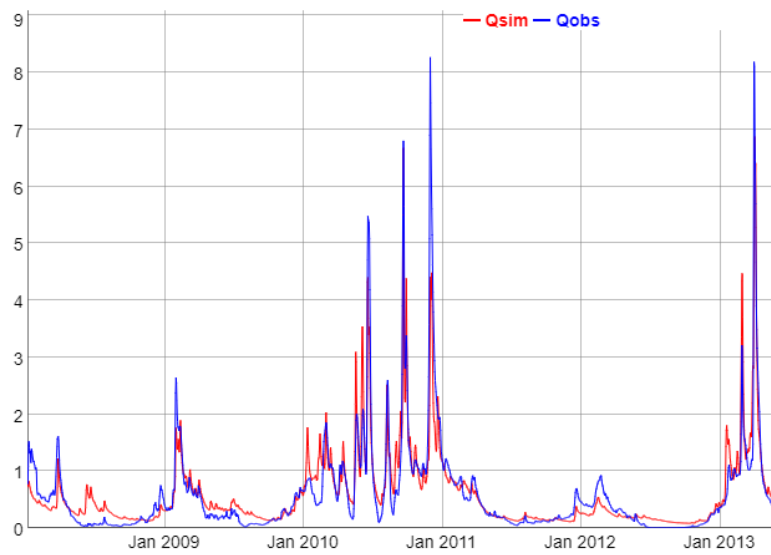
6. ábra. Input adatsorok: felül Q és P; alul PET

Az első futtatásokat standard, szakirodalomban fellelhető paraméter értékekkel indítottam, amelyek nem adtak jó eredményt. A jobb eredmények elérése érdekében az RStudio beépített automata optimalizáció funkcióját alkalmaztam, ahol célkritériumnak a Nash–Sutcliffe efficiency (NSE) maximalizálását adtam meg. Az NSE egy széles körben alkalmazott hatékonysági mutató a különböző hidrológiai modellek előrejelző képességének értékelésére. Értéke -1 és 1 között változhat, 1-hez közeli értékei jó előrejelző képességre utalnak.

2. táblázat. Modell futtatás értékek

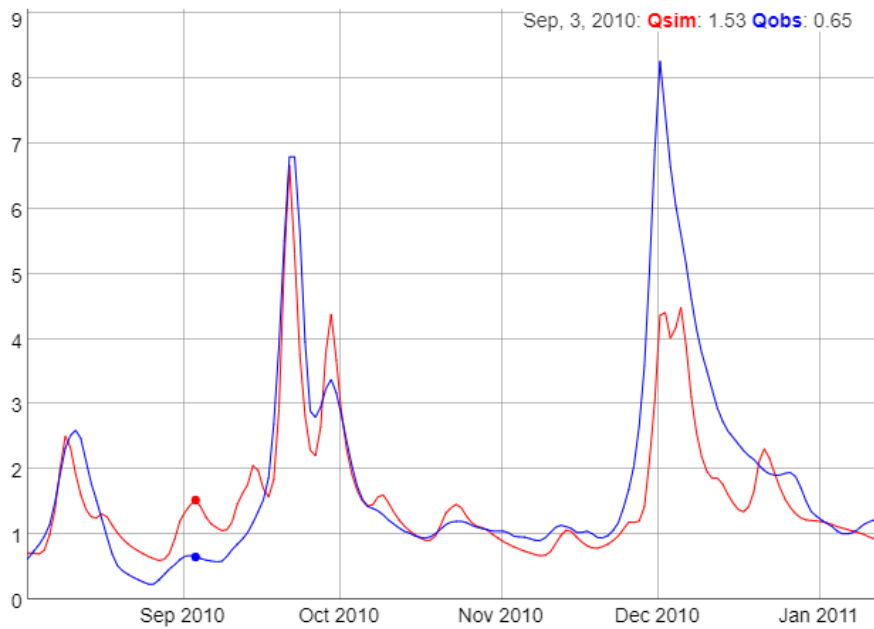
Modell futtatás		<i>corr</i>	<i>MSE</i>	<i>NSE</i>
Eredeti adatsor	Kalibrálás	0,908	0,128	0,818
	Validálás	0,884	0,115	0,738
Hóval korrigált adatsor	Kalibrálás	0,897	0,142	0,800
	Validálás	0,916	0,093	0,789

Többszöri próbálkozás után kalibrációra a 2007 és 2013 közötti időszakot jelöltem ki, mivel egyrészt itt minimális volt az adathiány (Q tekintetében), másrészt a kisvizes időszakok mellett ebben az időtartományban történt meg a 2020-ast megelőző 2 legnagyobb árhullám is. A kalibrációs időszakot (mint ahogy később a validációt is) 3 paraméterrel értékeltem melyek a korreláció, átlagos négyzetes eltérés (MSE) és a korábban említett NSE érték. Az adatokat a 2. táblázat tartalmazza. A modell validálására a 2014-2018 időszakot jelöltem ki. A kalibrációs értékek jónak mondhatóak és azok a validáció alatt sem romlottak lényegesen.



7. ábra. Felül: kalibrációs adatsor (kék-valós, piros-modellezett),
középen: korrelációs diagram a kalibrációs periódusban, alul: validált időszor

Ugyan az adatok elsőre elfogadhatónak tűntek, jobban meg kellett vizsgálni az adatsorokat. Azt lehet mondani, hogy a legtöbb esetben a modell kis mértékben alábecsüli a nagyvízhozamokat, ugyanakkor az árhullámképek alakjukban jó egyezést mutattak. A kisvízhozamok leginkább a nyári időszakokban tértek el, ennek oka, hogy nyáron a mederben lévő növényzet, illetve a Fenéki-tó visszaduzzasztó hatása (kimondottan zárt 21T zsilip esetén) fokozottan érzékelhető és az így kialakuló, majdnem nullához közelítő vízhozamokat a modell nem képes kezelni.



8. ábra. Példa egy jó és egy kevésbé jó illeszkedésre

Megvizsgáltam a modell pontosabbá tételének lehetőségeit. Az egyik ilyen lehetőség volt egy hóolvadási modul beépítése. Az általam használt csapadékadatokban ugyanis nem volt különbség téve halmazállapot szerint. Az észlelők által szolgáltatott adatokban hóesés esetén átszámolják azt hóvíz egyenérték szerinti mm egységbe, az automaták pedig súlyt mérnek és vagy fűthetőek vagy fagyállóval vannak feltöltve a téli időszakban. Eszerint tehát könnyen lehet, hogy egy-egy csapadék a téli időszakban hótakaró formájában maradt meg a területen és hatását csak később, az olvadáskor érezte. Ezért a modellbe beépítettem egy hóolvadás modult, amely a következőképpen korigálja az input csapadékadatot.

Létrehoztam egy logikai vektorsorozatot ami 0-s értéket kapott ha a napi középhőmérséklet 0 °C vagy magasabb, és 1-es értéket ha alacsonyabb. Egy újabb vektorsorozatban a csapadékadat szerint 0-s értéket kapott ha nem volt csapadék, 1-est ha volt. A két vektor szorzatából megkaptam, hogy mely csapadékok jelentkeztek (jó eséllyel) hó halmazállapotban. Ezután megszoroztam ezzel a logikai vektorral az eredeti csapadékadatsort, így csak azok maradtak benne amelyek hóban hullottak – de az értékük továbbra is eső szerinti mm. Ezután jött a hóolvadás számítása. Erre is nagyon sok bonyolult képlet létezik, ám mivel a modell lényege az egyszerűség, ezért a következő képletet használtam. Az Egyesült Államok Agrárgazdasági Minisztériumának Természetmegőrzési Szolgálat a 2004-es Hidrológiai Mérnöki Kézikönyvének 11-es fejezetében ajánlott Napi-Hőmérséklet módszert alkalmaztam ami a következő képlet szerint becsüli a hóolvadás mértékét.

$$M = C_M (T_a - T_b)$$

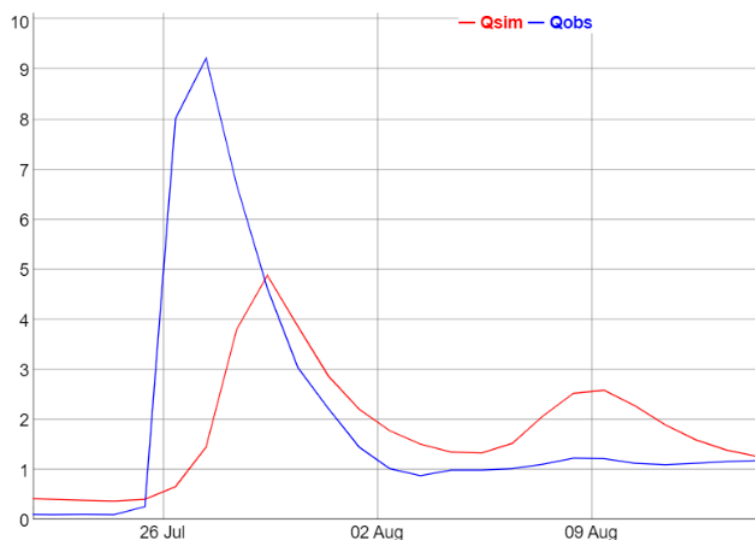
Ahol M a napi hóolvadás mm-ben, T_a napi középhőmérséklet, T_b az „bázishőmérséklet” vagyis az a hőmérséklet ami felett feltételezzük, hogy a hó olvad, C_M pedig egy állandó. Ezt az állandót a szakirodalom 2,74-es értékkel ajánlja felvenni ha egyéb információ nem áll rendelkezésre, így én is ezt az értéket használtam. Bázishőmérsékletként 0 °C -ot alkalmaztam, így a képlet $2,74 \cdot$ napi középhőmérsékletre redukálódott.

Ennek megfelelően tehát létrehoztam egy újabb vektorsorozatot ahol ha 0 °C felett volt a napi középhőmérséklet, akkor a fenti képlettel számítottam az olvadás mértékét, a 0 °C alatti értékeknél pedig 0-s értéket kaptak. Ezután kiszámítottam a hóban tárolt vízkészletet. Ha a hóban tárolt vízkészlet az előző napon illetve a hóban hullott csapadék adott napi összege és abból kivonva az előbb kiszámított olvadási potenciál értékét 0 vagy annál nagyobb eredményt adott, akkor a hóban tárolt vízkészletet ezzel a képlettel számoltam. Egyéb esetben 0-s értéket kaptam. Ezzel jó eséllyel csak azokat az időszakokat hagytam meg amikor valóban volt hó a területen, hiszen korábban az olvadási potenciált minden pozitív hőmérsékletre kiszámítottam, így akár egy nyári forró napra is. Ezután a valódi olvadást számítottam ki, amely a hóban tárolt vízkészlet előző napi értékének és az adott napi értékének különbsége, abban az esetben ha ez nagyobb vagy egyenlő volt mint 0, egyéb esetben a valódi olvadás mértéke 0. Ezután az eredeti csapadékadatsort a következő képlettel korrigáltam:

$$P_melt_{[t]} = (P_{[t]} \cdot (1 - snowfall_{[t]})) + daily_melt_{[t]}$$

ahol P_melt az olvadással korrigált csapadékérték P az eredeti csapadékérték, $snowfall$ a hóesés logikai 0;1-es vektora, $daily_melt$ pedig a napi valós hóolvadás. Ez a képlet hóesés esetén lenullázza az eredeti csapadékot (0-val való szorzás révén) olvadást pedig nem ad hozzá, hiszen hóesés csak negatív középhőmérséklet esetén kapott 1-es értéket, negatív középhőmérsékletnél pedig az olvadást 0-nak feltételeztem. Ugyanakkor minden egyéb csapadékadatot meghagy és ahol volt hóolvadás ott hozzá adja annak mértékét. Természetesen ez a képlet szintén nem vesz figyelembe nagyon sok tényezőt, ami a valóságban a hóolvadást befolyásolja, de ez egy viszonylag egyszerűbb módja a modell pontosításának.

A hóval korrigált értékek modellfuttatásának eredményei szintén a 2. táblázatban láthatók. Sajnos minden igyekezetem ellenére sem javultak lényegesen az értékelő paraméterek, bár az tény, hogy a validáció során mindháromra jobb értéket kaptam, így talán kis mértékben sikerült pontosítani a modellt. A 2020-as évet ettől függetlenül mindkét modellben lefuttattam és a két eredmény csupán tizedes nagyságrendben tért el egymástól a júliusi árhullám tekintetében.



9. ábra. 2020 júliusi árhullám a GR4J modellben

Ez a modellezett eredmény sem alakjában, sem mennyiségben nem adja vissza a valóságot. Megvizsgáltam milyen paraméterek állításával tudnám elérni, hogy a modell visszaadja a valóságnak megfelelő árhullámképet. Azt tapasztaltam, hogy az x3 (talajtározás) és x4 (egységárhullámkép időtényezője) paramétereket kellett nagyságrendekkel csökkenteni a jó eredmény eléréséhez. Ez arra enged következtetni, hogy ugyan nagy volt a megelőző szárazság, de a csapadék olyan intenzív volt, hogy a talajba az nem tudott beszivárogni és szinte teljes egészében felszíni lefolyást eredményezett. Az ilyen mértékű intenzív csapadékok okozta villámárvizek modellezésére tehát nem, vagy csak korlátozott mértékben alkalmazható a modell. Mivel a korábbi árhullámokat az eredeti paraméterekkel többé kevésbé jól adta vissza a modell ezért azt mindenképpen elmondhatjuk, hogy ez az árhullám valójában nem volt szokványos, nem illett bele a korábbi „sorozatba”.

A GR4J modell tehát ilyen célokra talán nem alkalmas, viszont vízkészletgazdálkodási célra nagyon is megfelelő. Alkalmazható például hosszabb adathiányos időszakok pótlásának becslésére. A kalibrálási időszak alatt például a modell és a valós adatokkal számolt összes lefolyt vízmennyiség 7 éves időtartam alatt mindössze 0,65%-os különbséget mutatott.

HEC-HMS vizsgálat

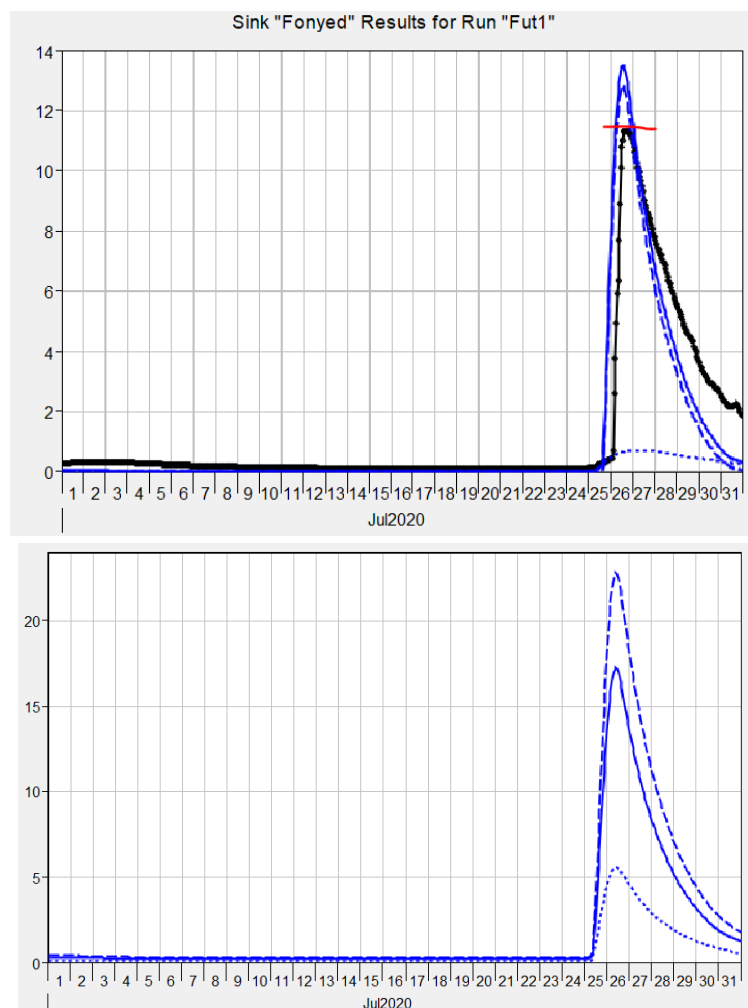
Mivel az előző módszerrel nem jutottam közelebb a valósághoz, ezért egyéb vizsgálati módszereket kellett alkalmazni. Megpróbáltam felépíteni egy HEC-HMS modellt amibe beépítettem a ZS2 zsilipnél és az északi részöblözetbe kiömlött becsült vízmennyiségek kivezetését a rendszerből. Ezáltal sikerült egy viszonylag elfogadható modellt kapjak, de mivel a kiömlött mennyiségek erős becsülésen alapulnak, továbbá a főnyedi vízhozamon kívül semmilyen lényegi adat nem állt rendelkezésre a modell igazolásához, ezért ennek az eredményeit erős fenntartásokkal kell kezelni. A modellt a HEC-GEOHMS ArcGIS toolbox-szal a 2020-as 5 méteres felbontású digitális terepmodellből építettem fel, majd a HEC-HMS-ben a *Deficit and Constant*, *Synder Unit Hydrograph*, *Simple Canopy*, *Simple Surface*, *Linear Reservoir* és *Muskingum-Cunge* paraméter beállításokat alkalmaztam. Aki használt már HEC-HMS-t az tudja, hogy egy szakdolgozatot is tele lehet írni a paraméterezés ismertetésével, így én most csak az eredményeket fogom röviden ismertetni. Az ismert betározódott vízmennyiségek kivonásával 13,5 m³/sec-os csúcsvízhozamot kaptam a főnyedi szelvényben, ami ugyan 2 m³/sec-al nagyobb a mért hozamunknál, ám a geodéziai felmérés szelvényét alkalmazva ez a vízhozam még elképzelhető lehetett. A ZS2 zsiliphez megérkező csúcsvízhozam 23 m³/sec amiből a 1.400.000 m³ betározódás mellett 17,5 m³/sec folyt tovább az áthelyezett szakaszon. Majd az északi részöblözetbe kijutó 200.000 m³-t is kivonva kaptam végül ezt az eredményt Főnyedre.

Nagyon fontos megjegyezni, hogy ez egy lehetséges megoldás, ami sokkal inkább a vízmennyiségek összeadásán és kivonásán alapszik és hasonló eredményeket egészen eltérő paraméterezéssel is el lehetett volna érni. Azonban ha csak a vízmennyiségeket vesszük figyelembe és elfogadjuk, hogy a becsült kiömlött mennyiségek helyesek, valamint azt, hogy máshol nem távozott víz a rendszerből akkor lehetséges, hogy nem is állunk olyan távol a valóságtól. Ezek alapján a ZS2 zsiliphez tehát éppen a Q10%-os árvízhozam érkezett meg.

Műholdképek vizsgálata

Az előző példa is azt mutatja, hogy nagyon fontos lenne ismerni a kiömlött vízmennyiségeket. Ezért a SENTINEL-2 műhold nyilvánosan hozzáférhető képei között kerestem az adott időszakra vonatkozó felvételeket. Mivel a műhold 5 naponta tér vissza egy adott pozícióba ezért július 26. és július 31.-re voltak elérhető képek a területről. Szerencsémre egyik képen sem takarta felhő a területet. A SENTINEL-2 több sáv szélességen készít felvételeket ezáltal számos

lehetőség adódik a klaszterizálásra. Például a közeli infravörös tartományban a vizet viszonylag könnyű elválasztani az egyéb tereptárgyaktól. A két műholdkép közül a 26-án reggel 10 órai felvételt volt értelme elemezni, hiszen ekkor voltak olyan elöntések amelyek a tetőző vízszinteket befolyásolták.



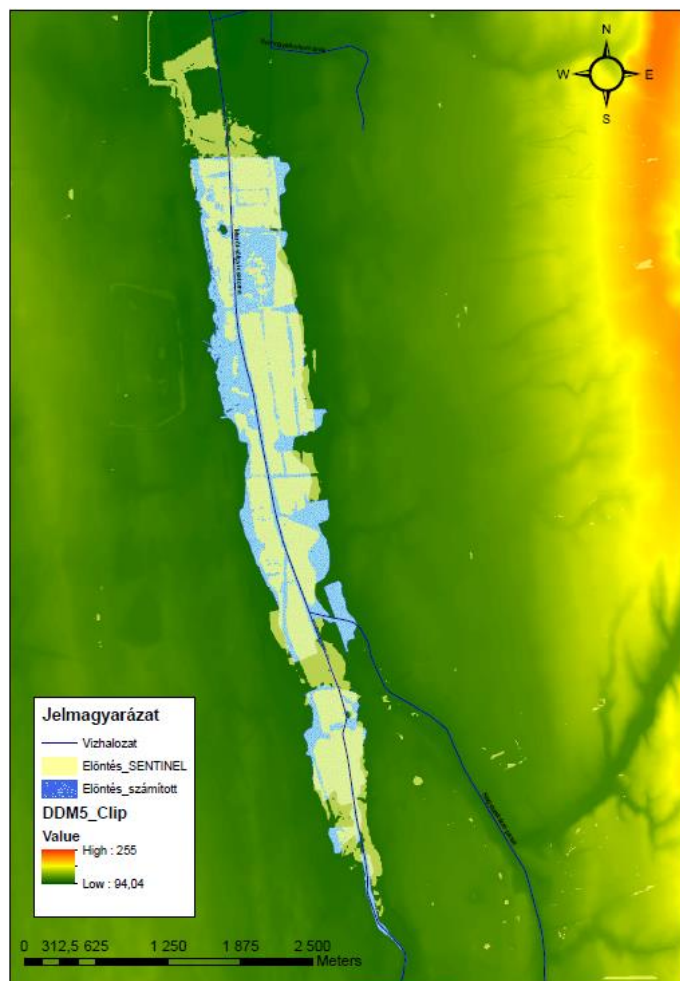
10. ábra. HEC-HMS eredmények, felül: Főnyed, alul: ZS2 zsilip

A fenti hamis infravörös műholdképen jól látszik a Marótvölgyi-csatorna ZS2 zsilip feletti szakaszának völgyi elöntése. Ezt a műholdképet raszter állományként betöltöttem az ArcGIS programba, majd az „Unsupervised Isoclustering” módszerrel 50 kategóriára osztottam. Ezekből kiválasztottam azokat a kategóriákat amelyek vizet mutattak - ezt erről a képről szemmel is könnyű volt ellenőrizni. Majd ezekből létrehoztam egy összefüggő poligont, amelyet már máshova is be tudtam tölteni. Ezután az 5 méteres felbontású terepmodellt töltöttem be és ráillesztettem az elöntési poligont. Az elöntést áttranszformáltam EOV koordináta rendszerbe, hiszen a SENTINEL műholdak a nemzetközi WGS koordinátarendszert használják. Több ponton megvizsgáltam az elöntési határok mentén a terepmagasságot (az 5 méteres felbontású terepmodell alapján), és ezekből végül kialakítottam egy elöntési felszín görbét. Ezt a felszín görbét több ponttal létrehoztam a GIS-ben majd terepet készítettem belőle és a „Cut & Fill” funkcióval elmetszettem a valós terepmodellt és a mesterségesen generált elöntési felszín görbét reprezentáló terepmodellt. Az eredmény egészen jó illeszkedést mutatott a műholdkép szerinti elöntéssel. Az így számított kiömlött vízmennyiség a 6811.sz híd felett kb. 2.000.000 m³. Néhány helyen látható, hogy a sárga poligon nem fedi teljesen a kéket, ez azért van, mert a műholdképen a fás területeket klaszterizálás során nem vízfelszínként sorolta be a program (a

lombkorona miatt), a terepmodellben viszont a valós terep alacsonyabban van, és egy-két folt mutatja is, hogy valószínűleg ott a fák alatt összefüggő vízfelszín lehetett. Egyéb kisebb eltérések a terepmodell pontatlanságából adódhatnak, de egy becsült értéknek ilyen mértékű hibákkal is nyugodtan elfogadható ez a mennyiség.

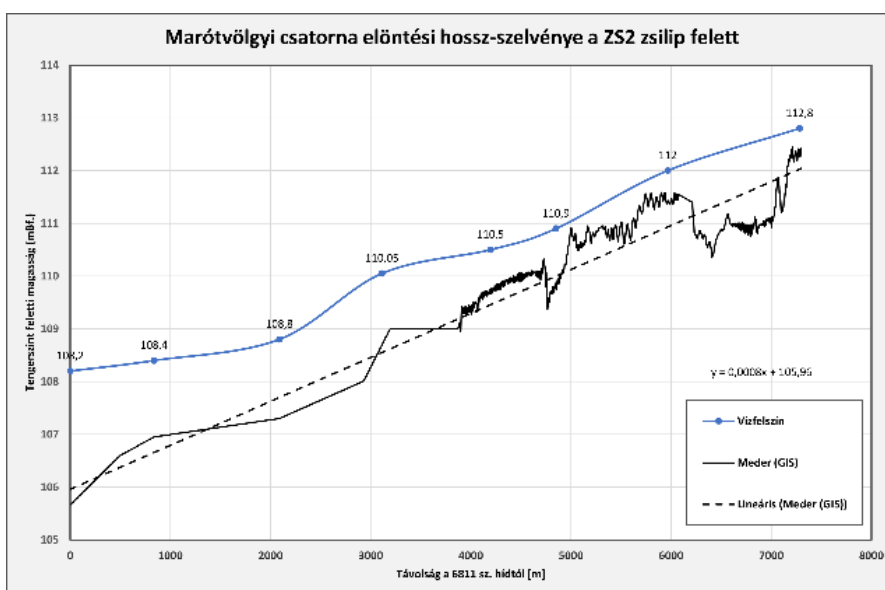


11. ábra. A Marótvölgyi-csatorna felső szakaszának hamis infravörös műholdképe
(kék pont: ZS2 zsilip)



12. ábra. Elöntési térkép GIS-ben

A 13. ábrán látható az az elöntési felszín görbe amelyet a GIS alapján szerkesztettem. A 6811 sz. hídnál 108,2 mBf. vízfelszín értéket adtam a VIZITERV vizsgálata alapján. Ha ránézünk az ábrára, látható, hogy a hírhoz közeledve a felszín görbe esése folyamatosan csökken, ami egyrészt a fenékesés csökkenésével magyarázható, másrészt esetleges duzzasztásra utalhat.



13. ábra. elöntési felszín görbe a SENTINEL műholdkép alapján

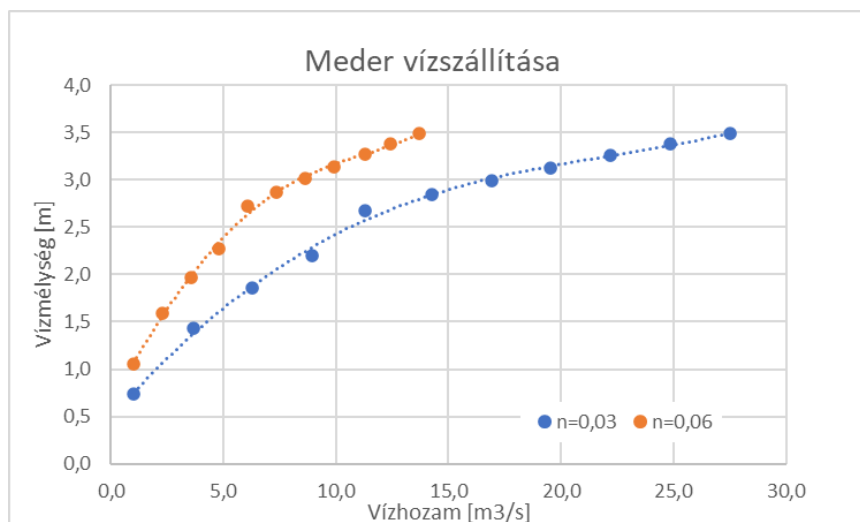
A 6811. sz. híd vízszállítása

Az előző vizsgálat alapján felmerült, hogy a felső szakaszon keletkezett jelentős kiöntéseket valamilyen műtárgy visszaduzzasztó hatása (is) okozhatta. Ezért megvizsgáltam a ZS2 zsilip feletti 6811.sz közúti híd vízszállító képességét.



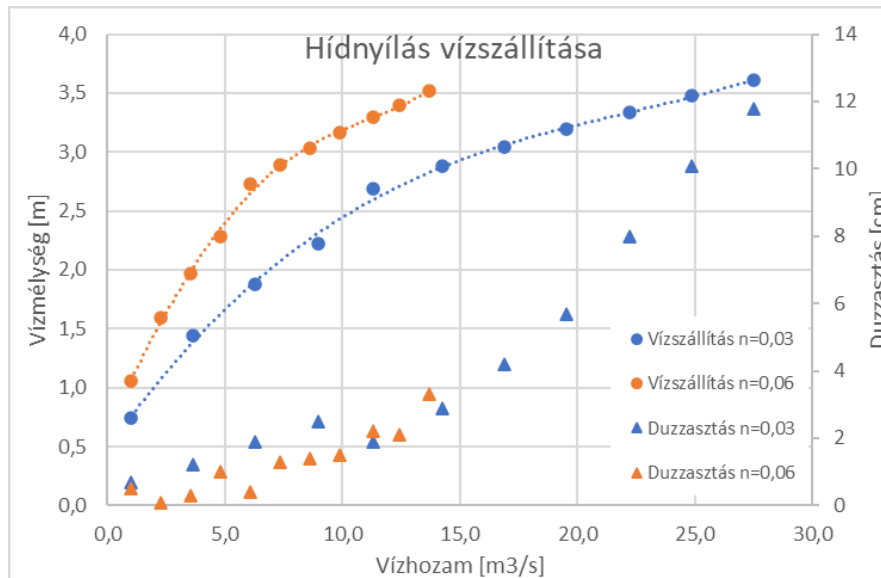
2. kép. 6811 sz. közúti híd alvízi oldal békeidőben

Ehhez először a terepen kollégáimmal felmértük a hídnylás szelvényét, majd a felvízi és az alvízi medret. A vizsgálatban a Nemzeti Községi Egyetem munkatársa Koch Dániel volt segítségemre. Az alvízi meder számítása során a permanens egyenletes vízmozgás összefüggéseit alkalmaztuk. Alapvetően két lehetőséget vizsgáltunk meg. Az egyik, amikor a főnyedi 11,3 m³/s tetőző vízhozamot a mederben telt szelvényű áramlásra értelmezzük. Ebben az esetben a rossz állapotú meder Manning-féle érdességi tényezőjével ($n=0,06$) értük el a megadott vízszállítást. Második esetben a meder állapotának megfelelő érdességi értéket ($n=0,03$) vettünk fel, ami a jelentős vízhozamnövekményt eredményezett, a vízhozam megkétszereződött. Így a 3,5 méteres vízmélységre, azaz a telt szelvényű mederre számított vízhozam 27,5 m³/sec.



14. ábra. 6811. sz. híd alvízi meder vízszállítása

A hídnív vízszállító képességét a HY-8 elnevezésű programmal vizsgáltuk meg, ami az amerikai FHWA (Federal Highway Administration) által közreadott Hydraulic Design of Highway Culverts, Third Edition, (Publication No. FHWA-HIF-12-026) numerikus feldolgozásán alapszik. A program segítségével a hídnív kialakuló felszín görbét, duzzasztást, vízmozgás típusát, átfolyás típusát lehet számítani, elemezni. A programban egyedi vasbeton műtárgyként lehetett definiálni a hidat, a felmért keresztmetszet és magassági adatok alapján. Így a híd által okozott mederszűkítést, illetve a telt szelvényű átfolyást is figyelembe tudtuk venni.



15. ábra. 6811. sz. híd vízszállítása

A hídnív vízszállító képessége közel azonos a meder vízszállító képességével mind a két vizsgált esetben, mivel a műtárgy alvíz kontrol alatt működik, ami azt jelenti, hogy az alatta lévő mederszakasz kapacitása határozza meg a teljesítményét. A hídnív kis mértékű duzzasztást okoz a nagyvízhozamok tekintetében. Az elméleti 27,5 m³/s –os csúcsvízhozamot 12 cm-es felvízi duzzasztás mellett képes átvezetni.

Konklúzió, összefoglalás

Látható tehát, hogy a különböző vizsgálatok más-más vízhozamokra engednek következtetni. A GR4J modell nem adott használható eredményt a vízhozam becslésére, a HEC-HMS modell eredményeit pedig fenntartásokkal kell kezelni. Véleményem szerint a híd vízszállításának vizsgálata és a kiömlött vízmennyiségek figyelembevétele adhatná a legpontosabb becslést a ZS2 zsilipnél jelentkező csúcsvízhozam értékére. Ezek alapján nincs okunk azt feltételezni, hogy a 27,5 m³/sec nem érkezett meg a ZS2 zsiliphez. Figyelembe véve a híd feletti szakaszon keletkezett elöntéseket azt is nagy valószínűséggel állíthatjuk, hogy a 6811.sz híd feletti szakaszon ennél nagyobb vízhozam érkezett – erről tanúskodnak a Sávoly-Somogyásmon összekötő úton keletkezett jelentős útátfolyások is. Ha összeadnánk a hídon átfolyó vízhozamot az útátfolyások vízhozamával vélhetően 30 m³/sec feletti csúcsvízhozamot kapnánk és akkor még nem számoltunk a felső szakaszon keletkezett elöntésekkel, amelyek a csúcsvízhozamot jelentősen csökkenthették, hiszen tározóként funkcionáltak. Ezek alapján tehát a felső szakaszon megérkezett a Q1%-os vízhozam.

Ez azonban továbbra sem ad választ arra, hogy a Főnyeden mért vízhozam miért lett kevesebb mint fele a híd vízszállításának. Induljunk ki abból, hogy a hídon átfolyt 27,5 m³/sec. A ZS2

zsilipnél keletkezett töltésmeghágás – mivel az nagy hosszon és jelentős mélységgel jelentkezett- ezt a hozamot már vélhetően köbméterekkel csökkentette. Tehát az áthelyezett szakasz elején a víz, nagyságrendileg a Q10%-os vízhozammal folyhatott le. Töltésmeghágások azonban az áthelyezett szakaszon ezután is keletkeztek, tehát a rendszerből további jelentős mennyiségű víz távozott, majd a szakasz legvégén a 7.-es számú főút alatt az északi belvízöblözetbe kiömlő vízmennyiség sem volt elhanyagolható mértékű. Elmondható tehát, hogy éppen az áthelyezett szakaszon volt jelentős vízmennyiség veszteség. Az alsó szakaszon is voltak elöntések, ezeket viszont sajnos nem tudtam elemezni úgy mint a felső szakaszt, hiszen azok még nem látszódtak a műholdképen. Azonban a 2. sz kép amit kollégáim a tetőzés környékén készítettek a főnyedi közúti hídról felvízi irányba, is azt támasztja alá, hogy az alsó szakaszon is távozott még további vízmennyiség a rendszerből.



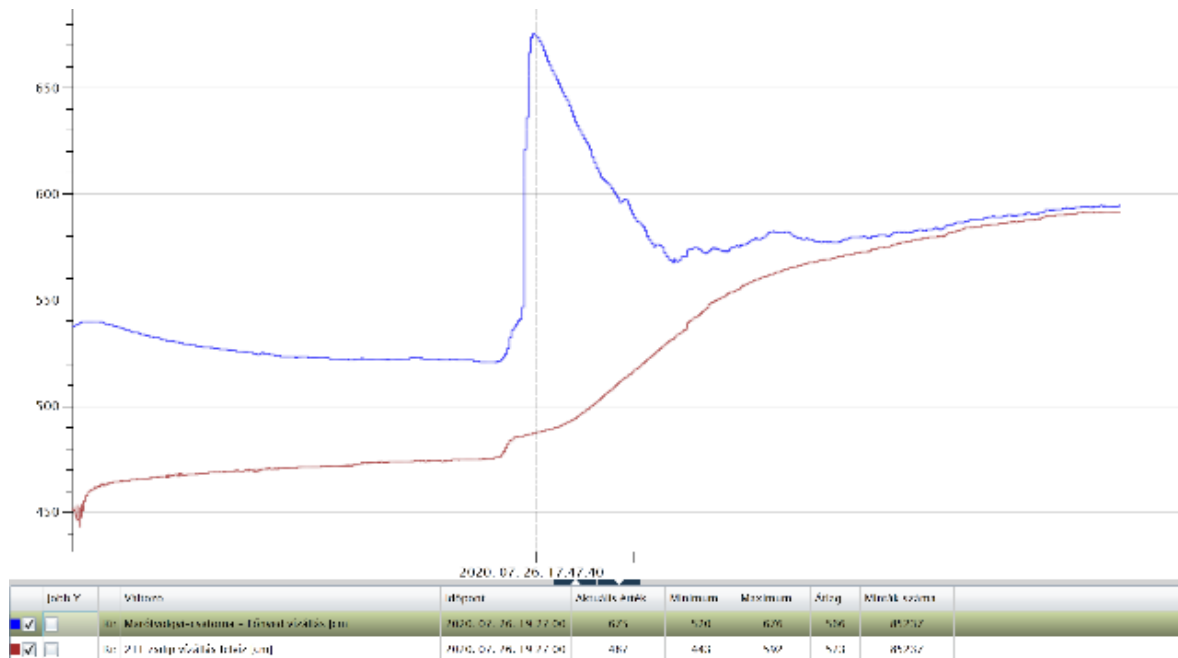
3. kép. Látkép a Főnyedi hídról felvízi irányba

Összefoglalva tehát az történhetett, hogy a felső szakaszon 30 m³/sec-ot meghaladó, Q1%-os tervezési vízhozam érkezett, ebből a 6811.sz hídszelvény 27,5 m³/sec-ot engedett át a projekttel érintett szakaszra, ahol további jelentős mennyiségű víz távozott a rendszerből (valószínűleg több mint az előzetesen becsült mennyiségek), majd az alsó szakaszon keletkezett további kiöntések miatt a főnyedi vízhozam bizonyosan 20 m³/sec alatt maradt. Ahogy azt a VIZITERV vizsgálata és a 16.sz. ábra is tanúsítja a Fenéki-tó visszaduzzasztó hatása a főnyedi tetőzéskor még nem érvényesült, tehát ez nem okozhatta a telt szelvényben mért kisebb vízhozamot, így az egyetlen lehetséges ok az, hogy a rendszerből kikerülő vízmennyiség okozta azt.

Amennyiben ezt elfogadjuk, akkor a következő megállapításokat lehet tenni:

1. a 6811.sz híd nem képes átvezetni a Q1%-os vízhozamot;
2. az áthelyezett szakasz (akkori állapotában !!!) nem tudta kiöntések nélkül levezetni a Q1%-ot, de a legnagyobb részén a Q10%-ot sem.
3. a 7.-es főút alatti szakasz a Q10%-nál kisebb mértékű vízhozamot sem vezetett le elöntések nélkül.

A káresemények bekövetkezési helyszínein azóta a terv szerinti állapotok vissza lettek állítva, azonban ahogy azt a VIZITERV vizsgálatában is leírták, ha jövőben hasonló mértékű nagy árvizek kialakulása gyakoribbá válik, előntések keletkezése továbbra sem zárható ki és a csatorna és a hidak vízszállítóképességének átfogó felülvizsgálata javasolt. Számomra vízrajzoként az eset legnagyobb tanulsága, hogy ha valamit nem mérünk meg, utána már nagyon nehéz lesz kideríteni a valóságot, ezért az operatív kommunikációt fejleszteni kell a szakágazatok között.



16. ábra. Főnyed (kék) és 21T vízállás (bordó) (WebSCADA)

Végezetül szeretném megköszönni az elemzésekben nyújtott rengeteg segítséget Koch Dánielnek és Bozzay Ferencnek.

Linkek a GR4J modellfuttatásokhoz (letöltés után böngészőben nyitható meg):

- [Hóval korrigált](#)
- [Eredeti futtatás](#)

Felhasznált irodalom:

Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation (Charles Perrin*, Claude Michel, Vazken André'assian) - Journal of Hydrology 279 (2003) 275–289

A Marótvölgyi-csatornán és kapcsolódó létesítményekben bekövetkezett árvízkarok tervezői vizsgálata (Farkas Péter, Viziterv Environ Kft.) – 2020

Part 630 Hydrology National Engineering Handbook, Chapter 11, United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service ((210-VI-NEH, July 2004)

Belső árvízi jelentések, projektdokumentációk, kiviteli és megvalósulási tervek