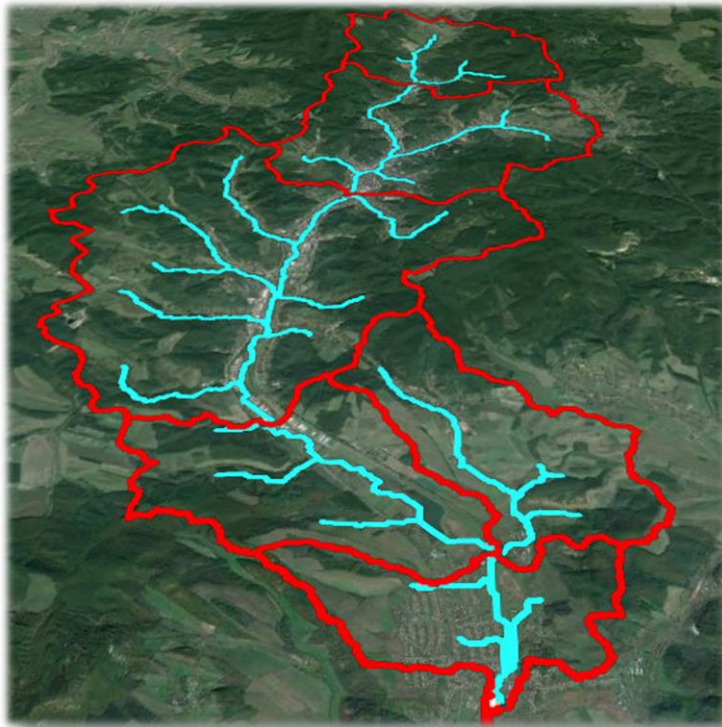


Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

TDK Konferencia 2015

Vízgyűjtő-modellezés gyakorlati alkalmazhatóságának vizsgálata a Tarján-patak vízgyűjtőjén



Készítette:

Nagy Eszter Dóra

Konzulensek:

Dr. Bene Katalin

Torma Péter

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés.....	1
2.	Terület bemutatása	2
2.1	Történelmi áttekintés	2
2.2	Geológia, élővilág	3
2.3	Vízrajz, éghajlat.....	3
2.4	Helyszíni bejárás	4
3.	Modellezés.....	7
3.1	Modellező szoftver bemutatása	7
3.2	Modell felépítése, kiindulási adatok.....	7
3.3	Kalibrálás.....	15
3.3.1	Alkalmazott hidrológiai elemek	15
3.3.2	A modell paraméterezése	17
3.3.3	Statisztikai vizsgálat	26
3.4	Validálás.....	27
3.5	Gyakorlati alkalmazhatóság vizsgálata	29
4.	Összefoglalás, konklúziók.....	34
5.	Irodalomjegyzék.....	36
6.	Mellékletek.....	38

1. Bevezetés

A klímaváltozás következtében egyre szélsőségesebb csapadékesemények terhelik a vízgyűjtőket, ezen szélsőséges események azonban modellezhetők. Magyarországon a kis és közepes vízgyűjtők vízrajzi állomás ellátottsága közepes. Sok esetben azonban csak empirikus módszerek kerülnek alkalmazásra, melyeknek hátránya, hogy igen pontatlan és nagyban eltérő eredményeket adhatnak. Célszerűbb fizikai-alapú modellek alkalmazása, mivel ezekkel pontosabb eredmények érhetők el. Hazai viszonylatban azonban meglehetősen kevés próbálkozás történt ilyen típusú modellek alkalmazhatóságának vizsgálatára (Torma et al., 2014). Osztott paraméterű modell alkalmazására nem állt rendelkezésemre elegendő adat, így összevont paraméterű vízgyűjtőmodell alkalmazhatóságát vizsgáltam a dolgozat során.

A vízgyűjtőmodellek felhasználhatósága igen sokrétű. Elemezhető például, hogy miként kezelhető egy olyan árhullám, mely nagyobb vízhozammal tetőzik, mint a tervezéskor figyelembe vett 1%-os gyakoriságú vízhozam, illetve tetszőleges csapadékesemény hatására levonuló árhullám is modellezhető. Jól vizsgálhatók az emberi beavatkozások hatásai is. A terepmodellen keresztül figyelembe vehető a mederszabályozás, a modell paraméterezésekor pedig az urbanizáció, az erózió és/vagy a területhasználat változásának hatásai is. Komplex modellrendszerben lehetőség nyílna nagyobb vízfolyások egydimenziós modelljéhez bemenő adatként felhasználni a vízgyűjtő-modellezésből nyert adatokat, modellezhető lehet a teljes tározórendszer árvízcsökkentő hatása a Zagyván.

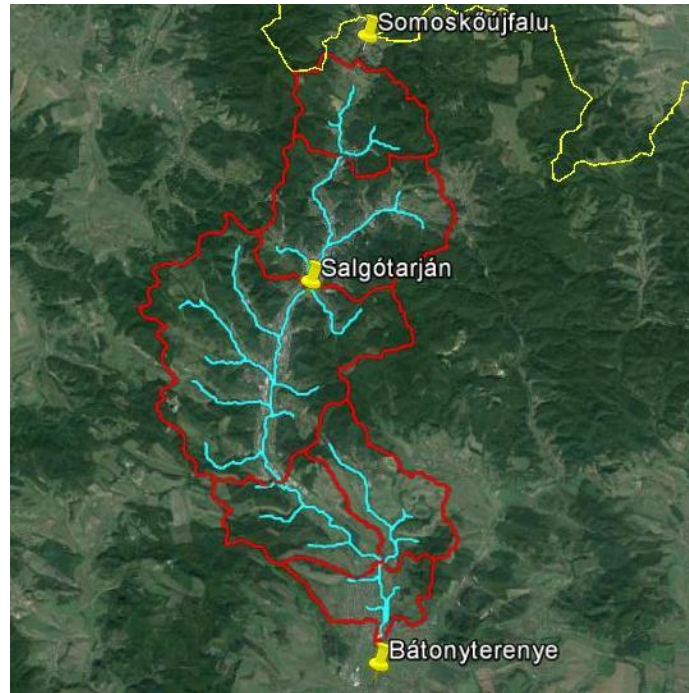
Dolgozatom tárgyául a Tarján-patak, illetve annak vízgyűjtője szolgál. Tavalyi TDK dolgozatomban már elkezdtem foglalkozni vízgyűjtő-modellezéssel, melyhez determinisztikus összevont paraméterű modellt használtam, akár csak ezen dolgozat készítése során. Folytatva a megelőző vizsgálatokat, a Tarján-patak kapcsán célom a szoftver gyakorlati alkalmazhatóságára fókuszálni, feltárni a használatában rejlő lehetőségeket.

Az említett patak a rajta található tározóval együtt egy fontos árvízvédelmi rendszer részét képezi. A Zagyva egyik mellékvízfolyásaként kulcsfontosságú, hogy a hirtelen levonuló árvizeket még a fenti vízgyűjtőkön tározók segítségével visszatartsák. Ezzel a funkcióval kapcsolatban is felmerülhetnek olyan kérdések, melyekre a vízgyűjtő-modellezés segítségével választ kaphatunk. Vizsgálható például a tározók kihasználtsága, hatása az alvízi vízhozamokra vagy a vízgyűjtő vízmérlegének alakulására.

2. Terület bemutatása

2.1 Történelmi áttekintés

A Tarján-patak vízgyűjtőterülete Magyarország északi részén található, Budapesttől keletre. Kiterjedése észak-déli, a vízgyűjtőn található majdnem teljes terjedelmével Salgótarján, ezen kívül az északi részen Somoskőújfalu, a déli részén Bányterenye települések helyezkednek el (1. ábra).



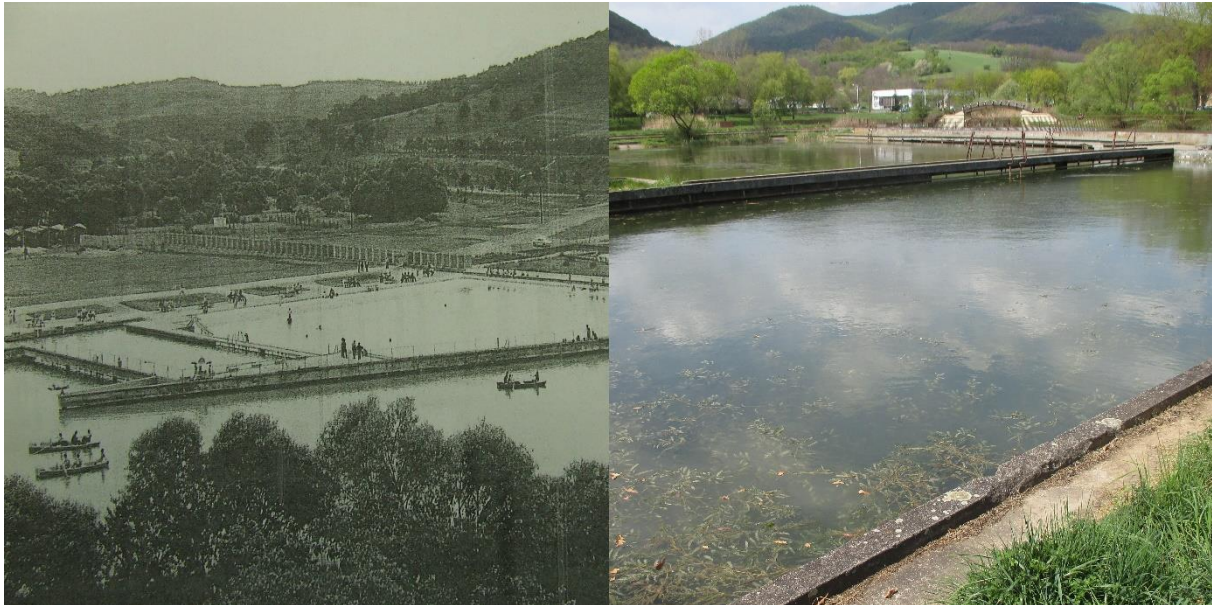
1. ábra: A vízgyűjtő és a rajta található települések

Salgótarján városa jelenleg közel 40 000 lakossal rendelkezik. A szocializmus idejében jelentős ipari tevékenység folyt a városban, ennek megfelelően a patak szennyvízterhelése is igen nagy volt.

„Salgótarján ipari múltja az 1800-as évekig visszavezethető, az acélgyár alakulásáig. 1920-ban átadott Öblösüveggyár, Síküveggyár és Tűzhelygyár, valamint az SKÜ salakhányó, Vasöntöde keletkező ipari szennyvizeinek befogadója a Tarján-patak volt, mely a terhelésektől rendkívül szennyezetté vált. A tározó feletti szakaszt ezekből az üzemekből naponta átlagosan 1600 kg szervesanyag, 270 kg ammónium-ion, 352 kg vas, 1200 kg lebegőanyag és 3800 kg sótartalom terhelte. A tavaszi hóolvadással illetve csapadékosabb időszakban a Tarján-patak detergens tartalmát tovább növelte a SKÜ salakhányó (galvániszap, vasas iszap) Csókás-érbe beszivárgó diffúz szennyezése is. Ennek következtében a Tarján-patak biológiai diverzitása igen alacsony volt.” (KDV-VIZIG, 2013)

A rendszerváltás után az ipari tevékenység erősen visszaesett, ezzel a vízminőség is javult. A patakon 1979-ben megépült tározó mindemellett továbbra is ellátja ülepítő funkcióját. Elsődleges rendeltetése természetesen az árvízcsúcs-csökkentés, a mátraverebélyi és a maconkai tározók mellett utoljára épült meg a Zagyva-völgyi fõmûvi tározórendszer részeként. A tározó egyébirányú hasznosítására (horgászat) ugyan lenne igény, azonban nem megengedett a tározóban található szennyvíziszap mérgező hatása miatt.

A vízgyűjtő felső részén található Tó-strandról meglehetősen kevés információ lelhető fel. Régebben strandfürdőként, ma már horgásztóként funkcionál. Átlagmélysége 2 méter körüli, a betonozott medencéket mára erősen benőtte a növényzet, a tavat sok helyen nád szegélyezi (2. ábra).



2. ábra: Tó-strand régen ('60-as évek) és ma

2.2 Geológia, élővilág

A vízgyűjtő dombvidékinek tekinthető, észak felől a Karancs-Medves határolja, melynek alapkőzete vulkanikus eredetű. Az oligocén korszakban agyagmárga és homokkő keletkezett tengeri üledékként, majd a miocén korszakban mocsaras területek helyén barnakőszén jött létre a ráarakódott tengeri üledék hatására. Elsőként a Karancs keletkezett a vulkánkitörések révén. Míg a Karancs leginkább andezitből és különböző palából áll, a Medves alapkőzete jelentős részt 2-9 millió éves pliocén-pleisztocén bazalt. A terület jellemző talajtípusa a barna erdőtalaj és a fakó erdőtalaj, az alsóbb részeken található réti talaj is. Több helyen felszínre került a porhanyós homokkő.

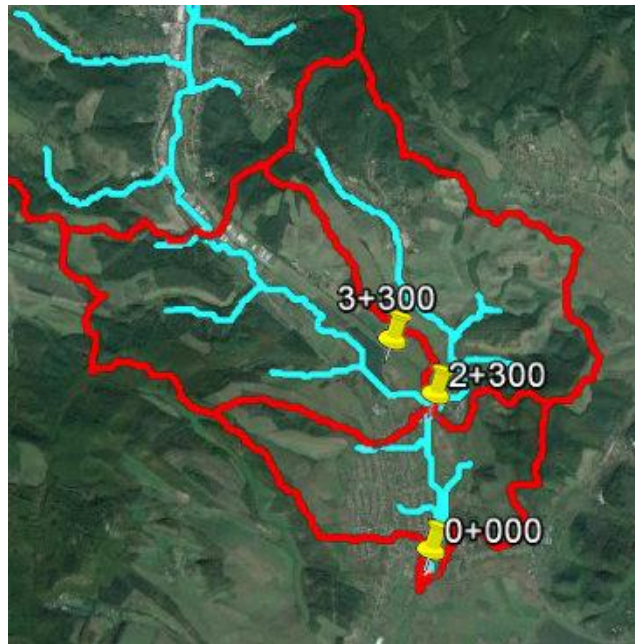
A Karancs-Medves területén 9696 ha-on a Salgótarjáni Erdészet folytat erdőgazdálkodást. Nyilvántartásuk szerint az erdőszet 49%-a gyertyános-tölgyes, 38%-a cseres-tölgyes és 13%-a bükkös klímában fekszik. Jellemző fafajai elsősorban a tölgyek (29%), a cser (26%), az akác (17%), a bükk (10%) és a gyertyán (6%). Az erdőszet területéből 4100 ha tartozik a Karancs-Medves Tájvédelmi Körzetbe, melyből 818 ha fokozottan védett. Ezen a területen számos védett növény és állatfaj található. A védett területből csak nagyon kis hányad található a vízgyűjtő területén.

2.3 Vízirajz, éghajlat

A Tarján-patak befogadója a Zagyva, jelentősebb mellékvízfolyásai a Vizslás-, Csókásvölgyi, Felsőszálaspusztai-, Karancs-, Baglyas-, Salgó-, Forgács-, és Vaskapu-patakok. Vízgyűjtőterülete 87,7 km², ebből a tározóhoz tartozó vízgyűjtőterület 71,3 km².

A patak és vízgyűjtője a Közép Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság (KDV-VIZIG) területén található. Az Igazgatóság a tározó felvízi vízállását 2008 óta rögzíti napi rendszerességgel. A patakon emellett a 2+300 szelvényben (egy kilométerrel a tározó alatt) található egy

mérőállomás, ahol vízállást rögzítenek, majd ebből Q-h görbe segítségével számítják a vízhozam adatokat. Ezen állomáshoz közel található egy csapadékmérő műszerük is, mely napi sűrűséggel rögzíti a csapadékadatokat.



3. ábra: KDV-VIZIG mérőhelyei

Mivel az Igazgatóság mércéje a tározó alatt található, befolyásolatlan árhullámról nem áll rendelkezésemre adat. Ez a modell paraméterezésekor hátrányt jelent, a tetőző vízhozamok pontos nagysága és az árhullámok jellemző alakja nem ismert.

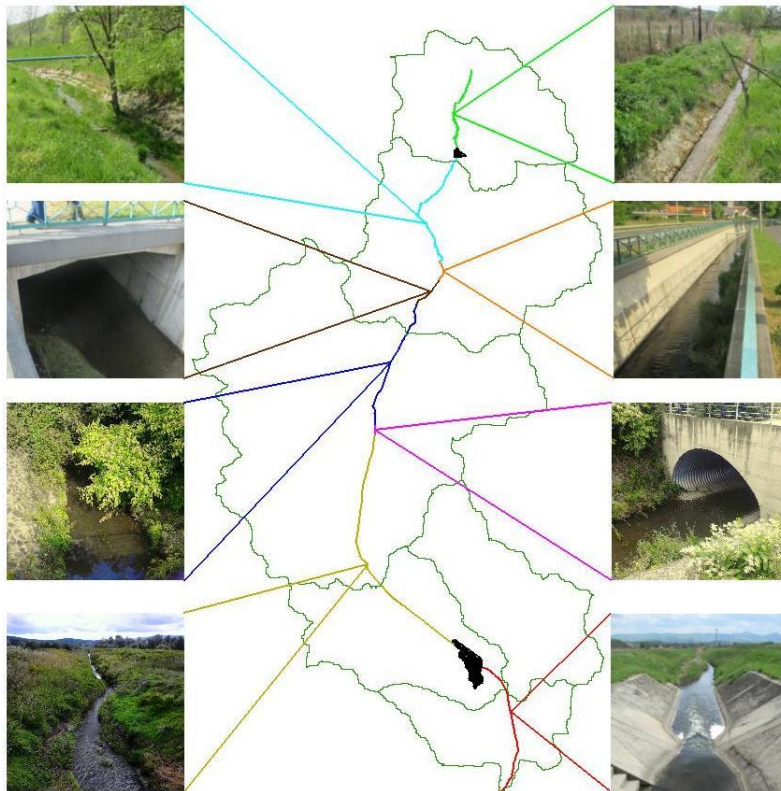
A tározó főbb műszaki adatai rendelkezésemre állnak az Igazgatóság jóvoltából, a részletes adatokat az 1. számú melléklet tartalmazza. A tározó térfogata üzemvízszintnél 350 em^3 , 1%-os árvízszintnél 2667 em^3 . A tározó dombvidéki jellegű, völgyzárógátas tározó, földtöltéssel. A tározón található egy egyesített műtárgy, fenékleeresztő zsilippel és körbukóval, valamint egy vészárapasztó is, ennek teljesítőképessége 1%-os gyakoriságú árvízszintnél $38 \text{ m}^3/\text{s}$. A párolgási és szivárgási veszteség mintegy $119 \text{ em}^3/\text{év}$. Az alvizen kiengedett vízmennyiséget táblás zsilip segítségével szabályozzák. Az üzemrend a tartandó vízszinthez igazodik. A tározó az elmúlt 30 évben jelentősen feliszapolódott, a KDV-VIZIG által végzett mederfelmérés szerint közel $100\,000 \text{ m}^3$ iszap halmozódott fel.

A terület éghajlata kontinentális, Magyarországon belül közepesen csapadékosnak számít. Az Országos Meteorológiai Szolgálat sok éves csapadékatlaga a vízgyűjtőn $550\text{-}600 \text{ mm}$. A sokéves átlaghőmérséklet $1\text{-}2 \text{ }^\circ\text{C}$ -kal elmarad az országos, $10 \text{ }^\circ\text{C}$ -os átlagtól. A napsütéses órák száma 1859, az uralkodó szélirány észak-keleti.

2.4 Helyszíni bejárás

A helyszínen három alkalommal jártunk, aminek nagy haszna volt a modell paraméterezése során. A meder alakját tekintve 8 fő szakaszt különítettem el (4. ábra):

- A legfelső, forrástól a Strand-tóig tartó kb. 2 km-es szakaszon a meder és a vízhozamok igen kicsik, a meder burkolt, trapéz alakú.
- A Tó-strand és a salgótarjáni kórház közötti 2,8 km-en a meder már mélyebb, szintén trapéz alakú és enyhén benőtt.
- A város belsejében, a kórháztól kb. 0,5 km hosszon téglalap alakú mederben halad tovább a vízfolyás.
- A következő szakasz mintegy 0,8 km hosszú, a felszín alatt halad, szintén téglalap alakú.
- A meder egy benzinkút után válik újra nyitottá, itt ismét trapéz alakú. Ez a szakasz 3,0 km hosszú, a salgótarjáni Tesco-ig tart. A meder benőttege erősen változó ezen a szakaszon.
- A Tesco parkolója alatt 0,2 km hosszon egy ellipszis alakú hullámcsőben kerül átvezetésre a patak vize.
- A Tesco alatt a tározóig szabályos, enyhén benőtt trapézmeder található.
- A tározó alatt a meder trapéz alakú, jól karbantartott, a torkolathoz közeledve egyre inkább benőtt.



4. ábra: Mederszakaszok a vízgyűjtőn

Az említett Strand-tó átfolyásos rendszerű, visszaduzzasztást nem okoz a vízfolyáson (ezt a megállapítást helyi lakosok is alátámasztották). A belvárosi fedett szakaszok esetében akkorák a kialakított keresztmetszetek, hogy ezek a szakaszok sem okoznak visszaduzzasztást.

A helyszínen, a vízgyűjtő északi részén (a Tarjáni Gyermektábor területén) kihelyezésre került egy billenő edényes csapadékmérő és egy szélmérő műszer, melyek órás adatsort rögzítenek. Ezek az adatok később rövid távú és hosszú távú futtatásokhoz egyaránt felhasználhatóak lesznek. A műszerek kihelyezése az 5. ábrán látható.



5. ábra: Csapadék és szélmérő műszerek kihelyezése

Az első bejárás során a teljes vízfolyás mentén végighaladtunk. A vízgyűjtő felső részén látható volt a fent említett mállékony homokkő alapréteg. Szemrevételeztük a tározó egyesített műtárgyát és a torkolatot is (6. ábra). A tározó műtárgyán megfigyelhetők betonhibák, valamint az alvízi meder gabion burkolatának hiányosságai, de korához képest a műtárgy jó állapotúnak tekinthető. A torkolatnál a patak medre kőburkolattal biztosított.



6. ábra: Felső sor: egyesített műtárgy felvízen és alvízen; alul balra: torkolat; alul jobbra: homokkő fal

3. Modellezés

3.1 Modellező szoftver bemutatása

A HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) csapadéklefolyás folyamatok szimulálására kifejlesztett vízgyűjtő modellező szoftver, amelyet a HEC már több mint 30 éve fejleszt. Ezek a fejlesztések ugyanakkor bárki, még a külföldiek számára is 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 egyesített 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.

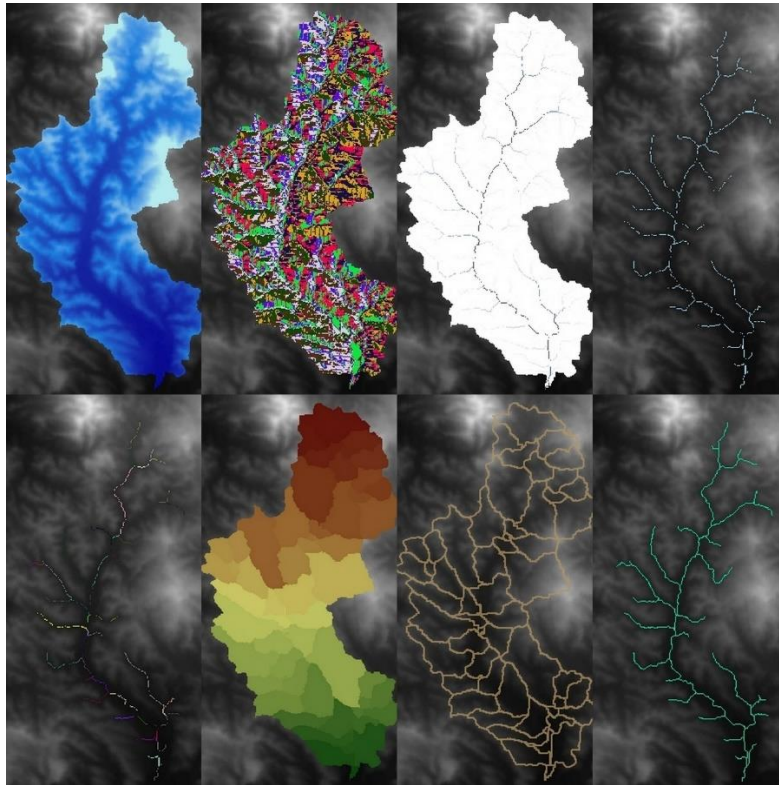
3.2 Modell felépítése, kiindulási adatok

A HMS modell fő részei a vízgyűjtőmodell, a meteorológiai modell, a futtatási paraméterek, és a bemeneti, illetve ellenőrző adatsorok.

Vízgyűjtőmodell

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 HMS-hez szükséges bemenő vízgyűjtőmodell előállítás. Ehhez a bárki számára hozzáférhető EU-DEM raszter terepmodellt használtam. Ennek cellamérete 25x25 m-es, mely elegendően részletes a közel 90 km²-es vízgyűjtő lehatárolásához.

A terepmodell előkészítésének 9 fő lépése van, minden lépésnél külön réteget hoz létre a program. 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 számítsanak 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). A 7. ábrán láthatók az egyes lépéseknél létrehozott rétegek.

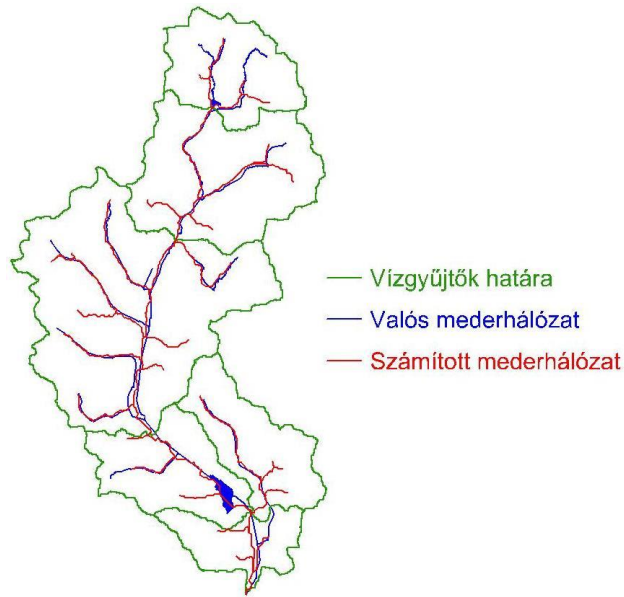


7. ábra: Vízgyűjtő lehatárolás lépései

A terepmodell előkészítése után egy projekt létrehozása szükséges, melyhez a felhasználó kézzel kijelölhet egy tetszőleges pontot. Ez a pont esetében a Tarján-patak és a Zagyva torkolatánál található. A pont kijelölésével új rétegsoportot hoz létre a program a projekt megadott nevével. Ezután már csak a ponthoz tartozó vízgyűjtőterülettel dolgozhat a felhasználó. Ekkor van lehetőség a részvízgyűjtők és vízfolyásszakaszok összevonására/felbontására. A részvízgyűjtők létrehozásánál két szempontot vettem figyelembe. Egyrészt ügyeltem arra, hogy területhasználat szerint jól elkülöníthetők legyenek, másrészt, hogy a számuk ne legyen túlzottan nagy, ezzel is csökkentve a szabad paraméterek számát. Ezek alapján összesen 6 részvízgyűjtőt hoztam létre, melyekből 4 található a mérceszelvény fölött. Következő fázis a különböző karakterisztikák létrehozása. Meghatározandó a vízfolyások hossza, esése; a részvízgyűjtők esése, a részvízgyűjtők leghosszabb lefolyási útvonala, középpontja és azok magassága, valamint a középpontokhoz tartozó leghosszabb lefolyási útvonalak.

Ezután következik a vízfolyások és részvízgyűjtők automatikus elnevezése, valamint az adatok ellenőrzése és konvertálása HEC-HMS formátumra, sematikus ábra létrehozása, majd az exportálás.

A HMS-be való importálás után az alábbi változtatásokat eszközöltem a sematikus vízgyűjtőmodellen. Összehasonlítottam a topográfiai térképről általam digitalizált mederhálózatot a GeoHMS által meghatározott mederhálózattal. Összességében az egyezés kielégítőnek mondható, azonban a Vizslás-patak (W5 jelű vízgyűjtő) a mérceszelvény előtt torkollott a Tarján-patakba a GeoHMS lehatárolása szerint. A topográfiai térképen azonban jól látható, hogy a Vizslás-patak medre szabályozásra került, így a mérceszelvény alatt torkollik a Tarján-patakba. A sematikus modellt ennek megfelelően módosítottam. A mederhálózatok eltérése a 8. ábrán látható.



8. ábra: A meglévő és a számított mederhálózat eltérései

Emellett beépítettem a megfelelő helyre a tározót, valamint a helyszínen tapasztaltak alapján több részre osztottam a vízfolyásszakaszokat. A végleges vízgyűjtőmodell a 9. ábrán látható.



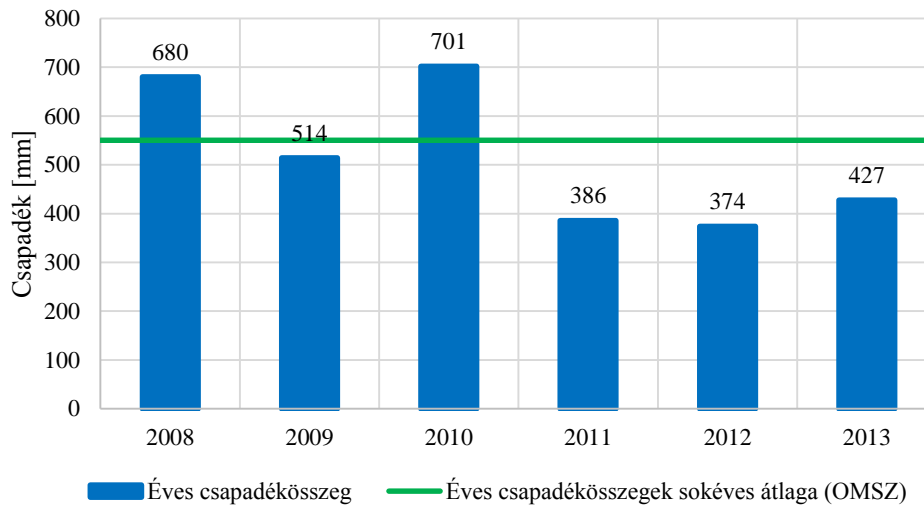
9. ábra: A végleges vízgyűjtőmodell

Meteorológiai modell

Csapadék

A modellfuttatási paraméterek megadásakor szükséges meghatározni a futtatás kezdő és záró dátumát illetve időpontját, valamint a számítási lépcsőt. Hosszú távú futtatás esetén több évre szükséges kalibrálni valamint validálni a modellt, illetve törekedni arra, hogy a kiválasztott évek csapadékosabb és szárazabb időszakokat is felöleljenek. Választásom kalibrálási

időszakra a 2008-2010-ig, validálásra 2011-2013-ig tartó 3-3 év. A 10. ábrán látható az éves csapadékösszegek eltérése az átlagtól 2008-2013-ig. A futtatáshoz elegendő a napi számítási lépcső, tehát a továbbiakban említett idősorok mindig napi bontásúnak értendők.



10. ábra: Éves csapadékösszegek alakulása a választott időszakban

A meteorológiai modellben megadható a mért csapadékadatok beviteli módja, mely esetben a csapadék idősor megadását jelenti.

Párolgás

Figyelembe vehető a párolgás és a hóolvadás hatása is. Hosszú távú futtatás végzésekor ezek a tényezők nem elhanyagolandók. Párolgás számításához a Priestley-Taylor módszert használtam, mely a szoftverbe beépített számítási módszer. A potenciális evapo-transpirációt (PET) a szoftver számolja, bemenő adatként csupán a Priestley-Taylor paramétert (α_{PT}) és a nettó sugárzás (R_n) adatsorát szükséges megadni. A potenciális evapo-transpiráció számításának menete a következő:

$$PET = \alpha_{PT} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n - G}{L} \quad [\text{mm/nap}] ; \quad (1)$$

ahol

- | | |
|--------------------------------|--|
| Δ [kPa/°C] | - telítési párányomás görbéjének meredeksége; |
| γ [kPa/°C] | - pszichrometrikus konstans; |
| R_n [MJ/m ² ·nap] | - a növényzettel borított talajfelszínen rendelkezésre álló energia; |
| G [MJ/m ² ·nap] | - talaj hővezető képessége, melyet 0-nak feltételeztem; |
| L [MJ/m ² ·mm] | - párolgáshő, a hőmérséklet ismeretében számítható; |
| α_{PT} [-] | - Priestley-Taylor paraméter, pontosabb ismeretek hiányában az |

irodalomban telített talajra ajánlott értéket vettem fel: $\alpha_{PT} = 1,26$.

Az egyenlet egyes elemeinek számítása a következőképpen történik:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left[0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27T}{T+273,3} \right)} \right]}{(T + 273,3)^2} \quad [\text{kPa/°C}] ; \quad (2)$$

ahol

$$T \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{- levegő hőmérséklet;}$$
$$\gamma = \frac{C_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} = 0,000665 \cdot P \text{ [kPa/}^\circ\text{C]} ; \quad (3)$$

ahol

$$C_p = 0,001013 \text{ [MJ/kg}^\circ\text{C]} \quad \text{- levegő fajhője állandó nyomáson;}$$
$$P \text{ [kPa]} \quad \text{- légköri nyomás;}$$
$$\varepsilon = 0,065 \text{ [kPa/}^\circ\text{C]} \quad \text{- a vízpára és a száraz levegő molekuláris súlyának hányadosa;}$$
$$\lambda = 2,45 \text{ [MJ/kg]} \quad \text{- hőszállítási tényező;}$$
$$P = 101,3 \cdot \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293} \right)^{5,26} \text{ [kPa]} ; \quad (4)$$

ahol

$$z \text{ [m]} \quad \text{- a tengerszint feletti magasság;}$$
$$L = conv(28,9 - 0,028 \cdot T) \text{ [MJ/m}^2\text{mm]} ; \quad (5)$$

ahol

$$conv = 0,0864 \text{ [MJ/}^\circ\text{W]} \quad \text{- átváltási faktor;}$$
$$T \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{- levegő hőmérséklet;}$$
$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \text{ [MJ/m}^2\text{nap]} ; \quad (6)$$

ahol

$$R_{ns} \text{ [MJ/m}^2\text{nap]} \quad \text{- felszíni nettó rövidhullámú beérkező sugárzás;}$$
$$R_{nl} \text{ [MJ/m}^2\text{nap]} \quad \text{- felszíni nettó hosszuhullámú sugárzásvesztés;}$$
$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \text{ [MJ/m}^2\text{nap]} ; \quad (7)$$

ahol

$$R_s \text{ [MJ/m}^2\text{nap]} \quad \text{- beérkező napsugárzás;}$$
$$\alpha \text{ [-]} \quad \text{- albedo;}$$
$$R_{nl} = \sigma \cdot T^4 \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left(1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{s0}} - 0,35 \right) \text{ [MJ/m}^2\text{nap]} ; \quad (8)$$

ahol

$$\sigma = 4,903 \cdot 10^{-9} \text{ [MJ/}^\circ\text{K}^4\text{m}^2\text{nap]} \quad \text{- Stefan-Boltzmann állandó;}$$
$$T \text{ [}^\circ\text{K]} \quad \text{- napi hőmérséklet;}$$
$$e_a \text{ [kPa]} \quad \text{- aktuális párányomás, melyre 2008-2010-ig rendelkezésemre állt mért adatsor (lásd lentebb), míg a 2011-2013-ig tartó időszakra az előző 3 év átlagát (70%) vettem fel;}$$

R_{s0} [MJ/m²nap] - ún. tiszta égbolt napsugárzás, meghatározása:

$$R_{s0} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a \text{ [MJ/m}^2\text{nap]} ; \quad (9)$$

ahol

$$z \text{ [m]} \quad \text{- tengerszint feletti magasság;}$$
$$R_a \text{ [MJ/m}^2\text{nap]} \quad \text{- extraterresztriális globálsugárzás.}$$

Mért adatok hiányában beérkező globál napsugárzás, R_s számítása (n/N 60% nem borult időszakot feltételeztem):

$$R_s = \left(0,25 + 0,5 \cdot \frac{n}{N} \right) \cdot R_a \text{ [MJ/m}^2 \cdot \text{nap]}; \quad (10)$$

ahol

n [óra] - aktuális napsütéses órák száma;
 N [óra] - lehetséges napsütéses órák száma.

Az R_a extraterresztriális globálsugárzást a vízgyűjtőterület geometriai középpontjának globál koordinátái alapján számítottam. (Északi szélesség: $48^\circ 06'$; tengerszint feletti magasság: 242 mBf).

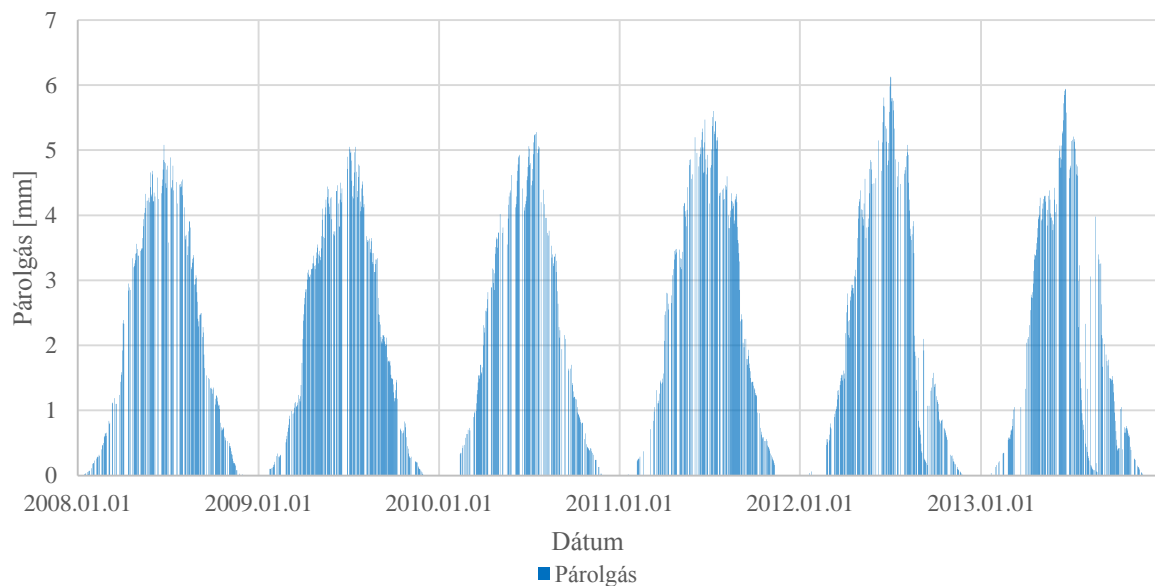
A hóolvadás számítására a hőmérséklet index módszer alkalmazható. A hó felhalmozódásának és olvadásának számításához szükséges a hóolvadási tényező számítása az alábbi képlet alapján:

$$M = C \cdot (T_a - T_b) \text{ [mm/nap]}; \quad (11)$$

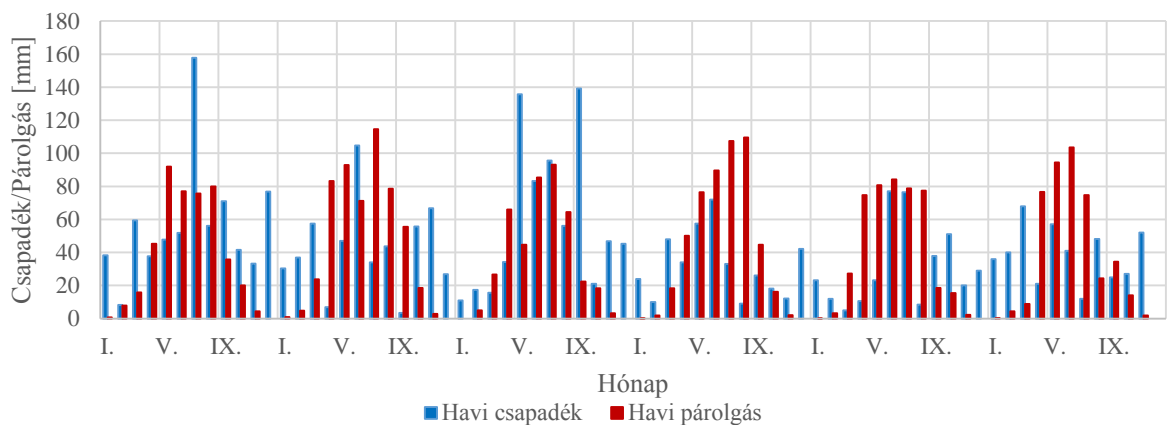
ahol

M [mm/nap] - hóolvadás;
 C [mm/°C·nap] - hóolvadási tényező;
 T_a [°C] - léghőmérséklet;
 $T_b = 0$ °C - alaphőmérséklet.

A modell által számított párolgást a 11. ábra mutatja. A havi csapadék és párolgás adatok a 12. ábrán láthatók. A 2011-es és a 2012-es évben láthatóan nagyobb a párolgás, mint a csapadék, ez a csapadékadatsor hiányosságának köszönhető (részletesen lásd lentebb).



11. ábra: Modellezett párolgás 2008-2013-ig



12. ábra: Havi csapadék- és párolgásösszegek

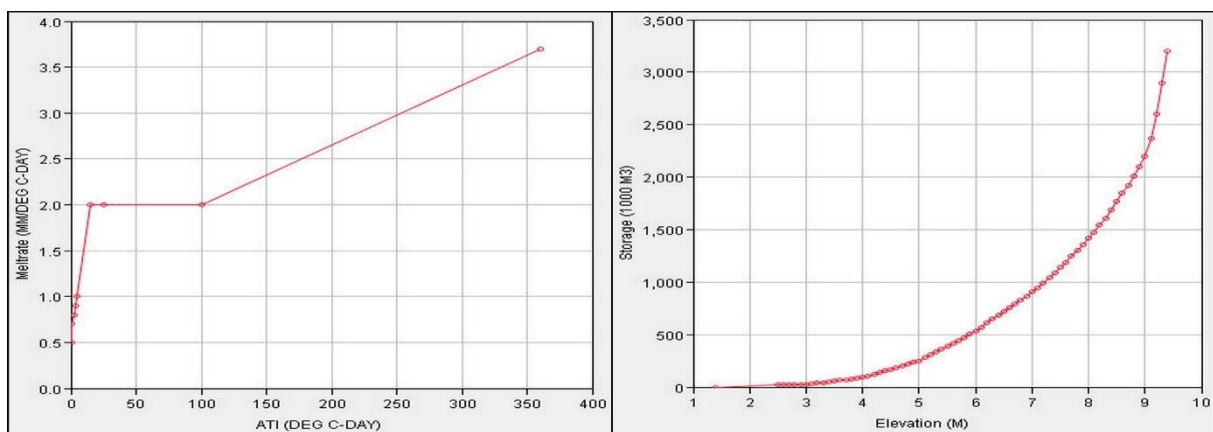
Hóolvadás

A hóolvadás hatása a téli, kora tavaszi időszakban felhalmozódásként, illetve késleltetett lefolyásként jelentkezik. A hóolvadás számítása a napi csapadék- és hőmérséklet adatokkal történik, feltételezve, hogy 0 °C alatti hőmérséklet esetén a csapadék hó formájában hullik a felszínre. Ez a csapadék késleltetve, a hőmérséklet emelkedése esetén járul hozzá a vízhozamhoz. A hóolvadási tényező tipikus értékei 1,8 és 3,7 mm/°C között találhatók.

A hóolvadás pontosabb számításához, a hó fajhőjét is figyelembe vettem. A hó hőmérséklete hatással van az olvadásra és az esőre. Ez a hatás számítható. A hó hőmérséklete meghatározza azt az energiát, mely a „hideg” hórétteg 0 °C-ra emeléséhez szükséges. A HMS modellben először a téli hónapokban a hórétteg 0 °C alatti hőmérséklete van meghatározva az eltelt napok függvényében, majd a hó hőmérsékletének függvényében a hó felmelegítéséhez szükséges energiamennyiség. A hórétteg kora tavaszi olvadásakor vagy esőzéskor először ezt a hideg hórétteget kell felmelegíteni 0 °C-ra, mielőtt hóolvadás történik. (Koch, 2015)

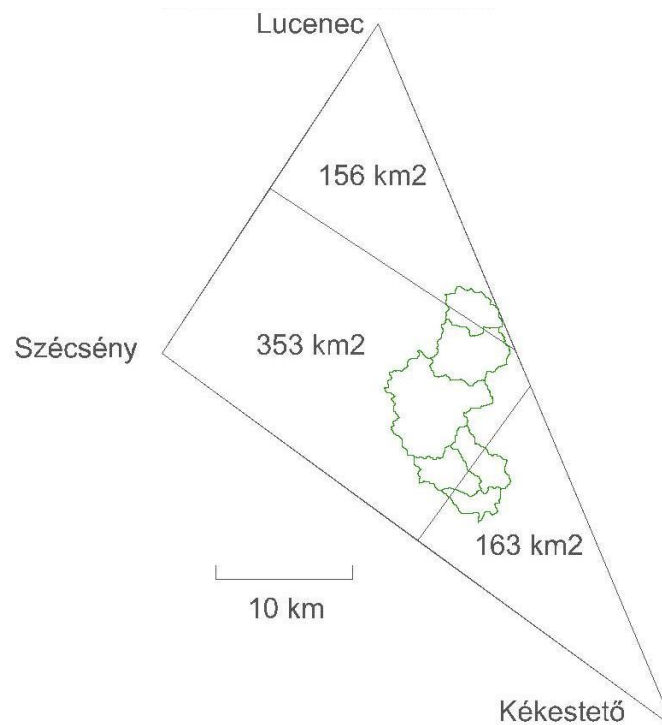
Bemenő adatsorok

A futtatáshoz szükséges adatokat idősróként vagy értékpárok (görbék) formájában lehet megadni. Görbeként szükséges megadni a tározó morfológiai jelleggörbáját, valamint a hóolvadás számításához szükséges olvadási rátát. A tározó mindkét jelleggörbéje rendelkezésemre állt, azonban a vízállás-tározott térfogat összefüggésből aktuálisabb adatsorral rendelkezem, ezért ezt alkalmaztam a futtatások során. A programnak megadott két görbe a 13. ábrán látható.



13. ábra: Olvadási görbe és morfológiai görbe a HMS-ben

Idősorok tekintetében nagyobb a modell adatigénye. A futtatáshoz szükséges idősorok: csapadék, hőmérséklet, vízhozam, nettó sugárzás, növényzet együttható; a kalibráláshoz/igazoláshoz szükséges idősor: tározó vízállás. A felhasznált csapadék adatsor, a vízhozam, illetve tározó vízállás adatsor a KDV-VIZIG mérőhelyeiről származnak. A növényzet együtthatójának éves alakulását szakirodalomból vettem át (Rao at al., 2011). Mivel az Országos Meteorológiai Szolgálat mérőállomásai viszonylag messze találhatók a vízgyűjtőtől és a térítésmentesen kikérhető adatok mennyisége véges, a többi adatsort ingyenes forrásokból nyertem. Első ilyen forrásom 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. Az adatok időbeli felbontása napi, térbeli felbontása $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (11 km x 11 km). A projekt 2010-ig tartott, a kalibrálás 3 évére ebből a forrásból szereztem be a hőmérséklet és (a globálsugárzás számításához szükséges) relatív páratartalom adatokat. Másik forrásom 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. Mivel a vízgyűjtő területén nem található mérőállomás, ezért kiválasztottam három, a vízgyűjtőt körbevevő mérőhelyet, melyekről lekértem a hőmérsékletadatokat napi bontásban. A mért adatokat medián módszerrel átlagoltam a vízgyűjtőre. A mérőállomások és a súlyozáskor figyelembe vett területek a 14. ábrán láthatók. A gyűjtött adatok forrását, időtartamát tartalmazza az 1. táblázat.



14. ábra: Mérőállomásokhoz tartozó területek a medián módszer szerint

1. táblázat: Összegyűjtött adatok összefoglaló táblázata

	Mért adat	Forrás	Időintervallum	Egység	Megjegyzés
Meteorológiai		KDV-VIZIG	2008-2013	Napi	2011, 2012 hiányos
	Csapadék	CARPATCLIM	2008-2013	Napi	Nem elegendően pontos
		NOAA	2008-2013	Napi	Nem elegendően pontos
	Hőmérséklet	CARPATCLIM	2008-2010	Napi	-
		NOAA	2011-2013	Napi	-
Páratartalom	CARPATCLIM	2008-2010	Napi	-	
Vízrajzi	Vízhozam (alvíz)	KDV-VIZIG	2008-2010	Napi	-
	Vízállás (alvíz)	KDV-VIZIG	2008-2010	Napi	-
	Tározó vízállás	KDV-VIZIG	2008-2010	Napi	-

3.3 Kalibrálás

Vízgyűjtőmodellek esetén alapvetően két féle kalibrálási lehetőség létezik. Kalibrálható a modell rövid időszakokra, néhány napos vagy hetes eseményekre. Másik lehetőség a modell hosszú távú kalibrációja, mely esetben több évre kell megfelelnie a modellnek. Mindkét futtatástípushoz rendelkezésre állnak ajánlott számítási módszerek vagy akár azok kombinációja. Hosszú távú futtatás esetén több körülmény figyelembe vétele szükséges, a modell bemenő adatigénye is nagyobb, a kalibrálás folyamata összetettebb. A rövid távú futtatás rendkívüli események, a hosszú távú futtatás átlagos időszakok modellezésére alkalmasabb.

3.3.1 Alkalmazott hidrológiai elemek

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).

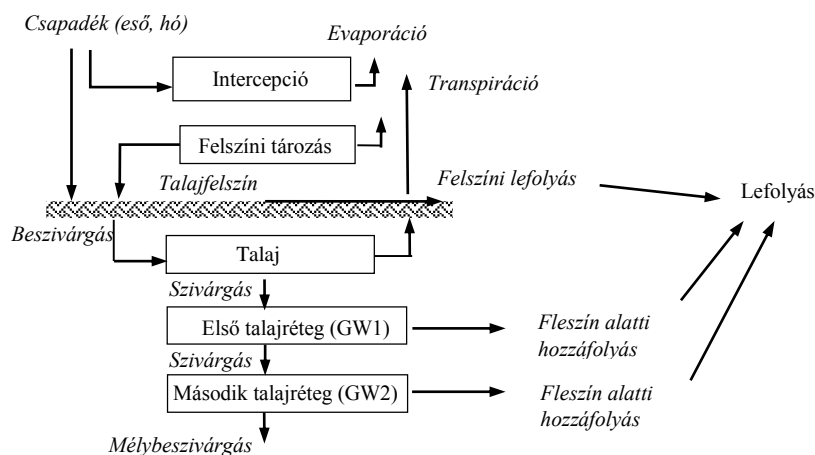
A fenti elemek közül egyedül a meder szivárgási veszteségével nem számoltam, a többi elem alkalmazását szükségesnek találtam.

A növényzet hatásának figyelembevétele a transpiráció számítása miatt fontos, hiszen hosszú távú futtatás esetén jelentős a párologás szerepe a vízgyűjtők vízháztartásában. Számítási módszernek a dinamikus módszert (Dynamic Canopy) alkalmaztam, mivel ez az egyszerű módszerrel (Simple Canopy) ellentétben figyelembe veszi a növényzet vízfellevőképességének 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 növényzet

együtthatója havi szinten. Ez az együttható az evapo-transpiráció számításához szükséges, ez alapján számítja a program a növényzet talajból felvett vízmennyiségét.

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 (Soil Moisture Accounting) 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 15. 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 nem távozhat evaporáció formájában a víz, tehát felszín alatti hozzáfolyást 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 késletetését határozza meg [ó]. A szabad paraméterek számának csökkentése érdekében két mélyréteg helyett csak egyet vettem figyelembe.



15. 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 összegyűlekezési idejének meghatározása [óra] és egy tározási együttható megadása [óra].

Alaphozam számítására a lineáris tározási rendszert használtam, mely általában a 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;

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = I_t - O_t \quad (12)$$

A tározás és kifolyás között egyszerű lineáris kapcsolat áll fenn;

$$S_t = R \cdot O_t \quad (13)$$

A (13) egyenletet a (12) egyenletbe behelyettesítve megkapjuk a lineáris tározási modellt:

$$Q_t = C_A \cdot I_t + C_B \cdot Q_{t-1} [\text{m}^3/\text{s}]; \quad (14)$$

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

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0,5 \cdot \Delta t}; \quad (15)$$

ahol

Δt [nap] - a számítási lépcső ideje;
 R [-] - lineáris tározó együttható.

$$C_B = 1 - C_A \quad (16)$$

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

A mederbeli lefolyás hatását a Muskingum-Cunge módszerrel vettem figyelembe, melyhez a mederszakaszok hidraulikai paramétereit szükséges megadni (hossz, esés, keresztmetszvény, Manning-féle érdesség).

3.3.2 A modell paraméterezése

A végleges modellben szerepel a tározó is, mint sematikus elem. A tározót alapvetően három különböző módon lehet megadni a programnak. A legegyszerűbb mód, hogy megadunk bemenő paraméterként egy alvízi vízkibocsátás idősort. A másik módszer során meg kell adni a programnak a tározó morfológiai jelleggörbáját és a részletes műtárgyparamétereket. A harmadik lehetőség egy hármass összefüggés megadása, a vízállás - térfogat (vagy felszín) - kibocsátott vízhozam összefüggések bevétele. Ez tulajdonképpen a morfológiai jelleggörbét és a teljesítőképességi görbét takarja. Egy kezdeti feltételt is szükséges megadni a programnak, mely a kezdeti tározott vízmennyiség, a kezdeti vízállás, a kezdeti kibocsátott vízhozam, vagy a befolyó és kifolyó vízhozamok egyenlővé tétele. A modell az alvízi vízhozam idősort az alábbi egyenlet alapján számolja:

$$I - Q = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (17)$$

ahol

I [m^3/s] - tározóba érkező vízhozam;
 Q [m^3/s] - tározóból távozó vízhozam;
 ΔS [em^3] - tározott víztérfogat;
 Δt [s] - időlépés.

Fenti egyenlet implicit véges-differenciál formában n és $n+1$ időpontokra:

$$\left(\frac{I_n + I_{n+1}}{2}\right) - \left(\frac{Q_n + Q_{n+1}}{2}\right) = \left(\frac{S_{n+1}}{\Delta t} - \frac{S_n}{\Delta t}\right) \quad (18)$$

Ezt az egyenletet átrendezve:

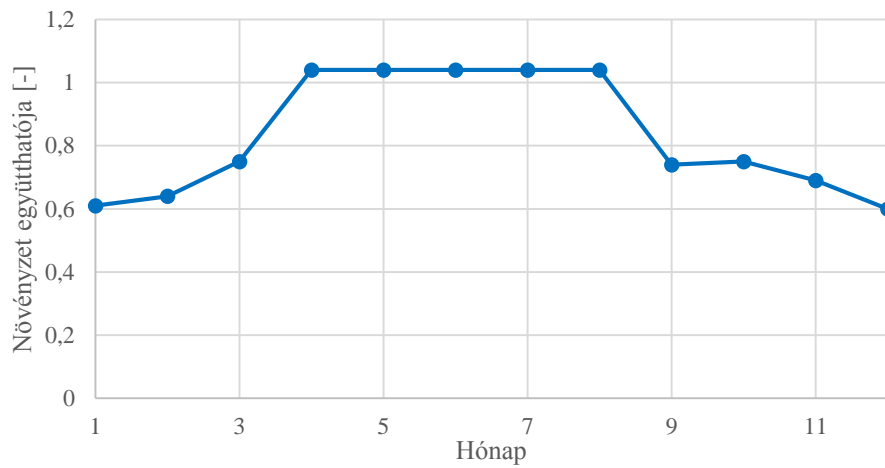
$$(I_n + I_{n+1}) + \left(\frac{2 \cdot S_n}{\Delta t} - Q_n\right) = \left(\frac{2 \cdot S_{n+1}}{\Delta t} + Q_{n+1}\right) \quad (19)$$

Ebben az egyenletben S_{n+1} és Q_{n+1} ismeretlenek az egyenlet jobb oldalán. I értéke ismert minden egyes időegységre, valamint Q_n és S_n kezdőértékei is ismertek, ezért az egyenlet jobb oldala kiszámítható. Ezt követően, következő idő lépésben S_{n+1} és Q_{n+1} értékeit

behelyettesítjük a bal oldalra (ekkor a jobb oldal az $n+2$ időegységgel lesz egyenlő), majd a számítást megismételjük, míg az árhullám görbe végéig nem érünk.

Mivel a tározó alvízen kibocsájtott vízhozama zsilippel szabályozott, és a zsilip szabályozására nem áll rendelkezésemre kellően konkrét üzemrend, szükséges volt megadni a tározó alvízen mért vízhozamait bemenő adatként. Így a morfológiai görbe és a kezdeti vízállás ismeretében a tározó vízállását számítani képes a modell, tehát *a kalibrálást a tározó vízállására végeztem.*

A szabad paraméterek minimalizálása érdekében a lehető legtöbb paramétert meghatároztam számítással vagy felvettem a szakirodalomban fellelhető értékre. A növényzet és a talajfelszín telítettségét zérusnak tekintettem, az ezek által felfogható csapadékmennyiséget 5-5 mm-re vettem fel. A növényzet együtthatójának havi alakulását a 16. ábra mutatja (Rao et al., 2011).



16. ábra: A növényzet együtthatójának éves változása

Az árhullám-transzformációhoz szükséges összegyülekezési időket minden részvízgyűjtőre meghatároztam a vízgyűjtőn és a mederben vett összegyülekezési idők összegeként. A vízgyűjtők összegyülekezési idejét (τ_{vgy}) a Wisnovszky-formula segítségével határoztam meg.

$$\tau_{vgy} = \frac{L^2}{\sqrt{A \cdot S}} \quad (20)$$

ahol

- L [km] - a völgy hossza;
- S [-] - a völgy átlagos esése;
- A [km²] - a vízgyűjtő nagysága.

A vízgyűjtők ezen paraméterei a vízgyűjtő-lehatárolás során számításra kerültek, így az ArcGIS-ből kinyerhettem azokat. A mederbeli összegyülekezési idő (τ_m) számításához hasonló módon rendelkezésemre állt az egyes vízgyűjtőkhöz tartozó medrek hossza, a mederbeli lefolyás sebességét pedig 0,5 m/s-ra vettem fel (ez a tározó alvízi mérceszelvényében normál vízálláshoz tartozó sebesség). A számítást a 2. táblázat mutatja.

2. táblázat: Összegyülekezési idők számítása

	Vízgyűjtő				Meder			τ [óra]
	L [km] Vízgyűjtő hossza	A [km ²] Vízgyűjtő területe	S [-] Vízgyűjtő esése	τ_{vgy} [óra] Összegyülekezési idő a vízgyűjtőn	L [m] Hossz	v [m/s] Áramlási sebesség	τ_m [óra] Összegyülekezési idő a mederben	
W1	3,00	9,82	0,23	0,10	2384	0,50	1,32	1,42
W2	5,29	18,19	0,47	0,16	5180	0,50	2,88	3,04
W3	8,06	34,29	0,52	0,26	6477	0,50	3,60	3,85
W4	5,44	10,08	0,60	0,20	4593	0,50	2,55	2,75
W5	4,84	9,59	0,59	0,17	5036	0,50	2,80	2,96
W6	3,61	5,75	0,39	0,15	2633	0,50	1,46	1,61

Az árhullám-transzformáció számításához szükséges másik paraméter (tározási tényező) a következő összefüggés szerint számítható:

$$S_c = c * T_c \quad (21)$$

ahol

S_c [óra] - tározási tényező (Storage Coefficient);

T_c [óra] - összegyülekezési idő (Time of Concentration);

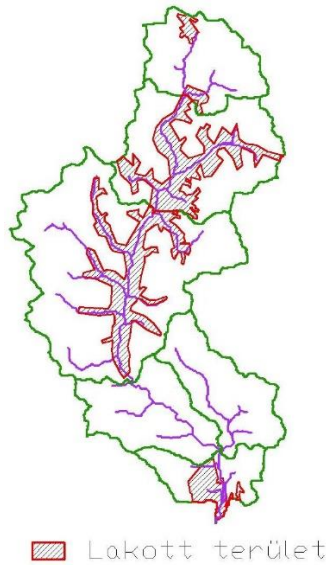
c [-] - arányossági tényező, mely a területhasználattól függ. Városi környezet esetén $c=1,1-2,1$, erdős terület esetén $c=8-12$. Mivel esetemben a vízgyűjtőkön mindkét területhasználat megtalálható, de a városi környezet a dominánsabb ezt a tényezőt $c=3$ értékre vettem fel. (Straub at al., 2000)

A mederbéli lefolyás késleltető hatásának figyelembevételéhez szükséges paramétereket a helyszínen látottak és a vízgyűjtőlehatárolás során számítottak alapján határoztam meg. Ezen értékek a 3. táblázatban láthatók.

3. táblázat: Mederbéli lefolyás számításához szükséges paraméterek

Vízfolyás- szakasz jele	Hossz [m]	Esés [m/m]	Manning-féle érdesség [-]	Mederalak	Szélesség [m]	Rézsúhajlás [xH:1V]
Reach-1	2869	0,006	0,03	Trapéz	1,0	0,5
Reach-2	472	0,033	0,02	Négyzet	4,0	-
Reach-3	771	0,009	0,02	Négyzet	4,0	-
Reach-4	720	0,004	0,03	Trapéz	3,0	0,5
Reach-5	2268	0,005	0,03	Trapéz	3,0	0,5
Reach-6	195	0,015	0,02	Négyzet	3,0	-
Reach-7	3635	0,004	0,03	Trapéz	2,5	1,5
Reach-8	2943	0,006	0,03	Trapéz	2,5	1,5
Reach-9	1230	0,005	0,03	Trapéz	2,5	1,5
Reach-10	2033	0,001	0,03	Trapéz	2,5	1,5

A veszteség számításához szükséges paraméter a burkolt felületek aránya. Ennek az arányszámnak a meghatározásához lehatároltam a lakott területeket topográfiai térkép alapján (17. ábra). A lakott területek harmadát tekintettem teljesen vízzárónak.



17. ábra: Lakott területek a vízgyűjtőn

Elsőként az első 3 évre (2008-2010) kísértem meg kalibrálni a modellt. A tározó modellezett vízállását semmiképp nem tudtam a megfelelő tartományban tartani. Hogy közelebb kerüljek a probléma megoldásához, szükségem volt a tározóba beérkező vízhozamok vizsgálatára. A tározó vízállásának, morfológiai görbéjének és alvízi vízhozamának ismeretében kiszámítottam a tározó folytonossági egyenletének (22) átalakításával a beérkező vízhozam idősort.

$$A * \frac{dH}{dt} = Q_i - Q_o \quad (22)$$

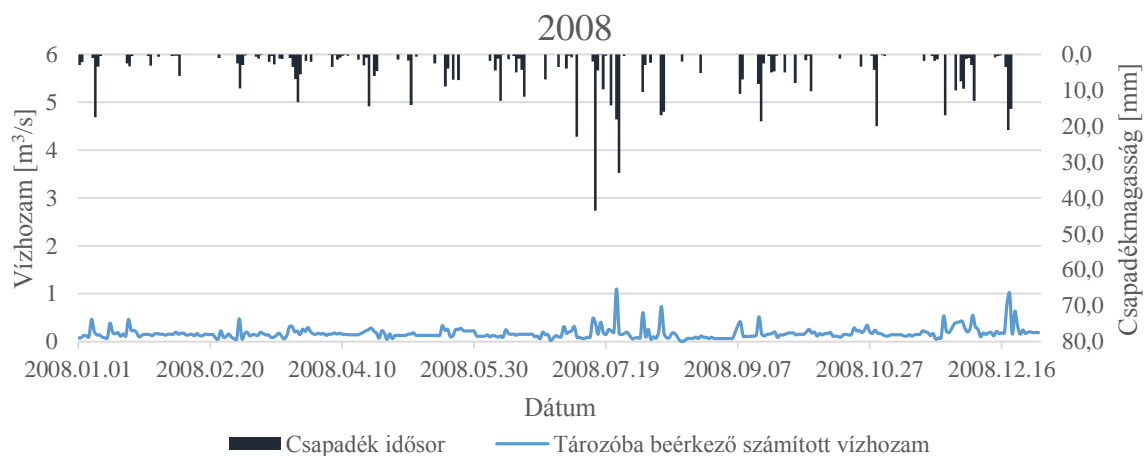
ahol

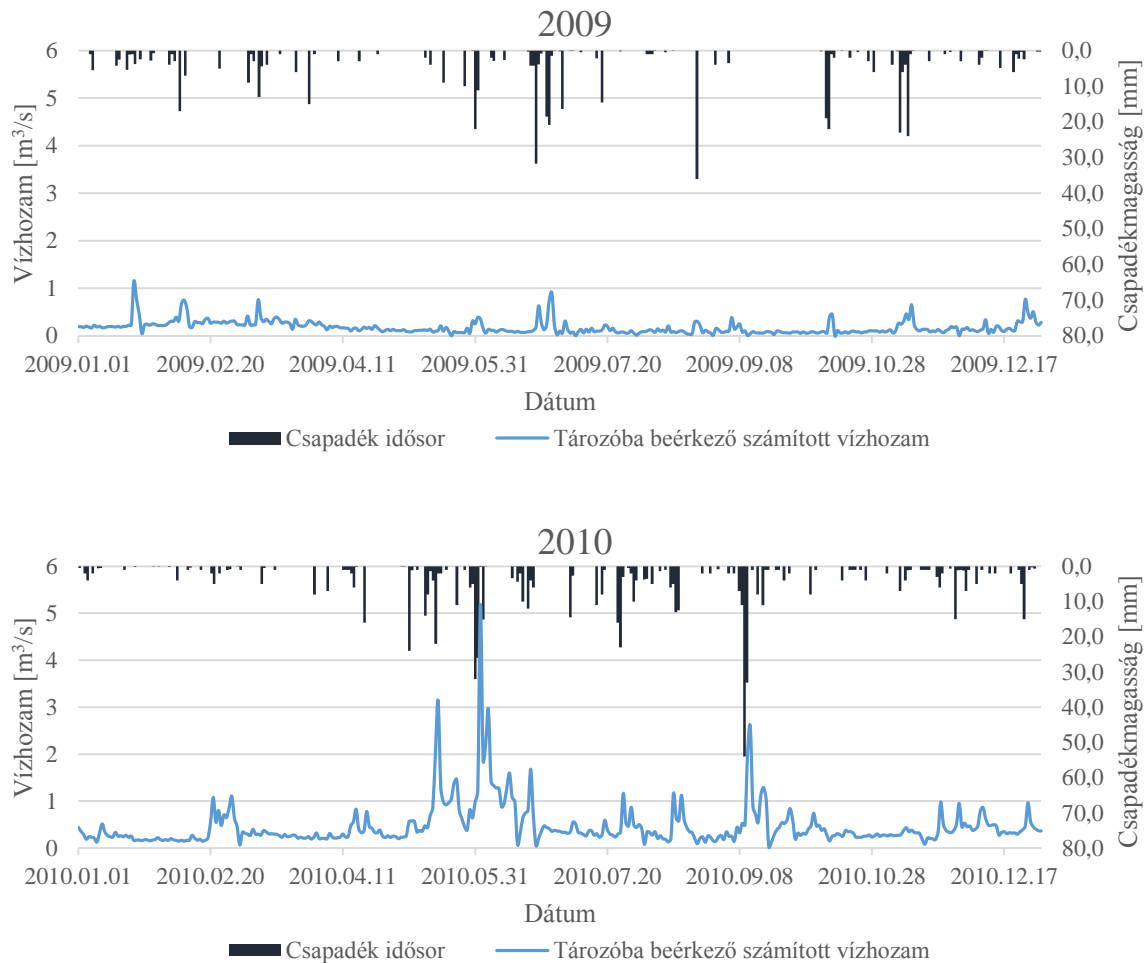
- A [m²] - a tározó felülete az adott vízállásnál;
- dH [m] - tározó vízállásának egy számítási lépcső alatt bekövetkező változása;
- Q_i [m³/s] - tározóba érkező vízhozam;
- Q_o [m³/s] - tározóból kifolyó vízhozam.

A fenti képletet átalakítva kifejezhető Q_i :

$$Q_i = \frac{dV}{dt} + Q_o \quad (23)$$

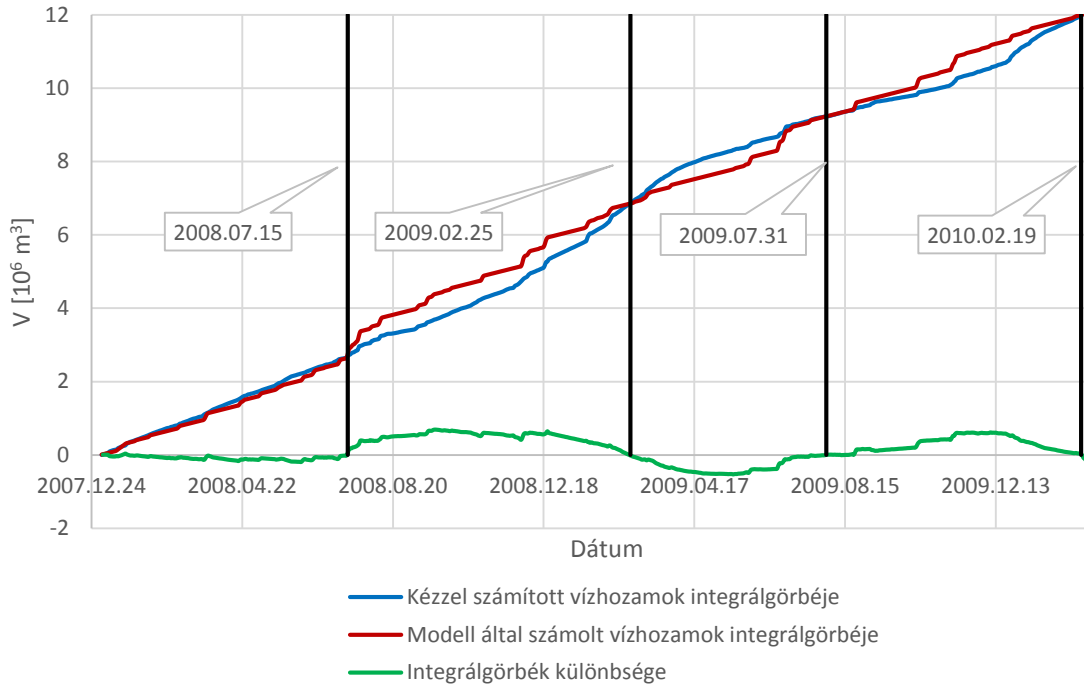
A kapott vízhozam idősort kalibrálásra alkalmasnak tekintem, mivel a csapadék idősorral együtt ábrázolva láthatóan reális értékeket mutat (18. ábra). Ennek *következtében a modellt a tározó vízállására és a bemenő vízhozam idősorra is kalibráltam.*





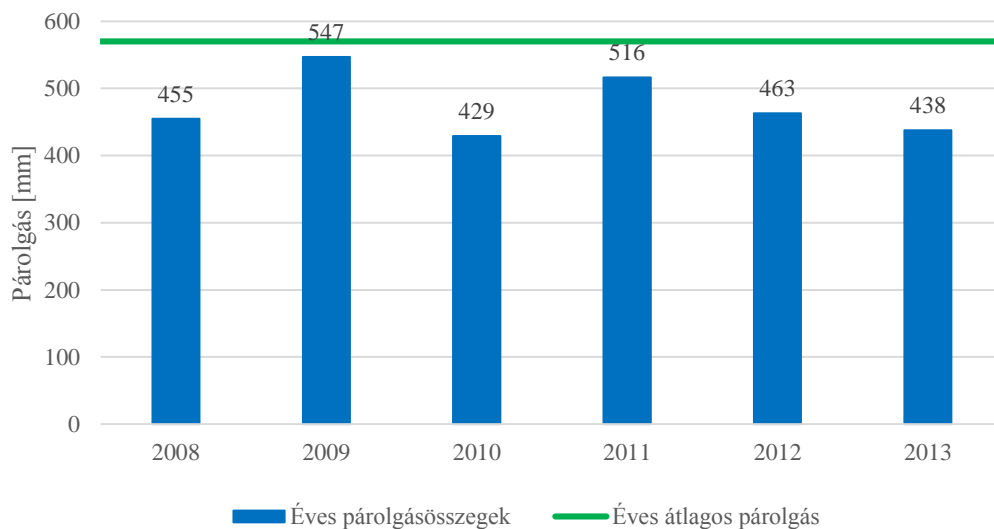
18. ábra: Csapadék és számított vízhozam adatok 2008-2010-ig

Ezután előállítottam az általam és a modell által számolt vízhozamgörbék integrálgörbéit (19. ábra). Ezen az ábrán a 2008-as és 2009-es évben jól megfigyelhető, hogy a görbék különbsége periódikusan változik pozitívba negatívba és fordítva. Ezek a változások hónapra pontosan februárban és júliusban következnek be, tehát feltehetően a tavaszi-nyári és őszi-téli időszakokban máshogy viselkedik a modell. Ezt a különbséget vélhetőleg az alaphozam és a talajban tározott víz mennyisége okozza, vagyis a modell erre a két időszakra külön kalibrálható. A modellt tehát a továbbiakban két félévre osztottam. A kalibrálást nem 3 évre, hanem a 2008. február 1.-július 31.-ig és augusztus 1.-január 31.-ig tartó időszakra végeztem.



19. ábra: Vízhozamok integrálgörbéi és azok különbsége

Következő vizsgálat a párolgás éves összegeinek összehasonlítása volt a Magyarország területére megállapított átlagértékkel (Kovács, 2011). A modell által számított párolgás mennyiségét mind a 6 évre megvizsgáltam. A 20. ábrán látható, hogy a modell által számolt párolgás az átlag alatti vagy ahhoz közeli. A párolgászámításhoz használt adatsorok bizonytalansága miatt az ilyen mértékű eltérést elfogadhatónak találtam.



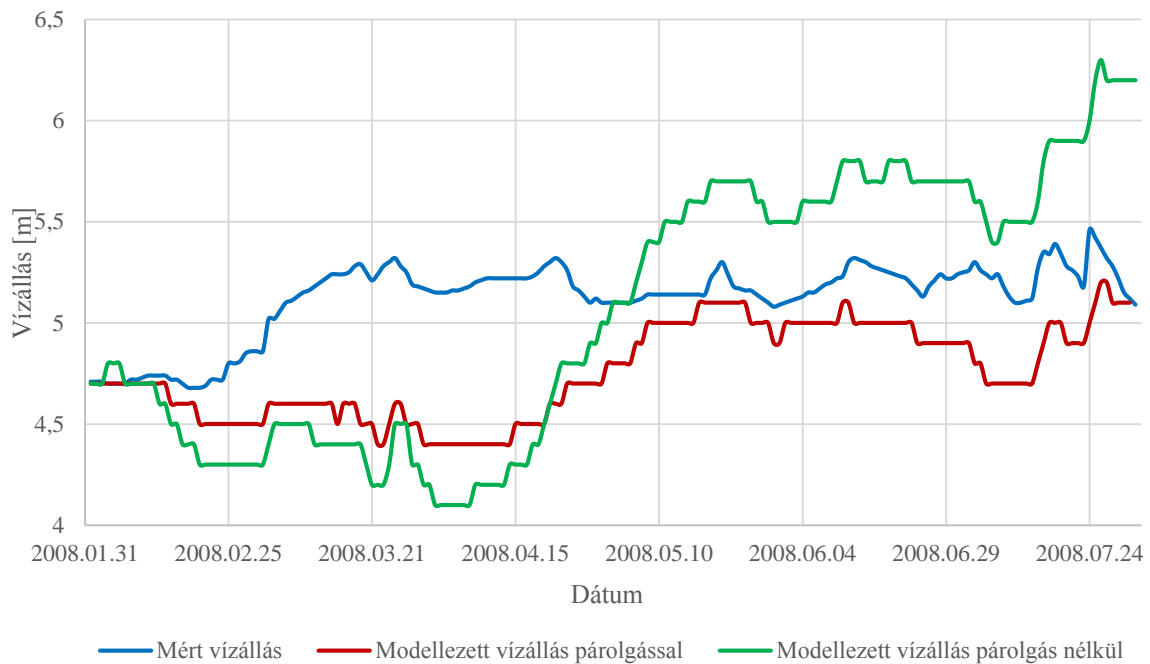
20. ábra: Éves párolgásösszegek eltérése az átlagtól

Mivel a párolgás hosszútávon jelentős tényező, és a területen található tározó meglehetősen sekély, beépítettem a modellbe a tározó párolgását is. A tározó párolgását havi összegenként kell a modellnek megadni. A tározó átlagos párolgásáról csak egy éves átlagérték állt rendelkezésemre, mely 700 mm-re becsülte azt (KDV-VIZIG, 2013). Ezt a 700 mm-es éves párolgást Magyarország területi, havi átlag értékei szerinti súlyozásban osztottam fel a hónapok

között. A kapott értékeket a 4. táblázat tartalmazza, melyek nagyságrendileg megegyeznek más sekély tavak párolgásának értékeivel. (Kiss, 2014) A tározó párolgásának ilyen módon történő adaptálása jelentős javulást okozott a modell által számított vízállások alakulásában (21. ábra).

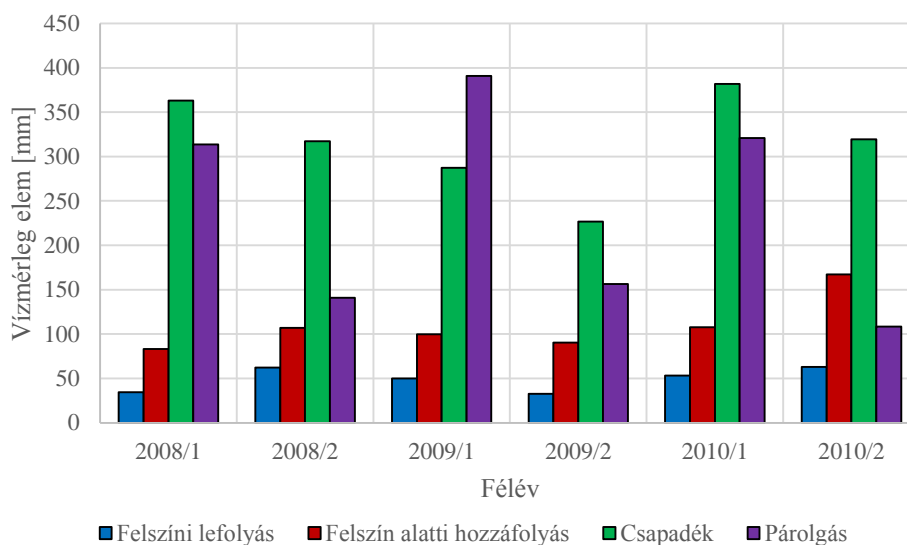
4. táblázat: A tározó havi párolgásösszegeinek számítása

Hónap	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	Σ
M.o.-i átlag a vízgyűjtő területén	0	0	30	40	90	120	110	100	40	30	10	0	570
Százalékos megoszlás	0.0	0.0	5.3	7.0	15.8	21.1	19.3	17.5	7.0	5.3	1.8	0.0	100
Tározó havi párolgása	0	0	37	49	111	147	135	123	49	37	12	0	700



21. ábra: Tározó párolgásának vízállásra gyakorolt hatása a modellben (2008. február 1.-július 31.)

Megvizsgáltam továbbá 2008-2010-ig a tározó feletti szelvényig a négy részvízgyűjtő vízmérlegét. Ebben a közelítő vízmérlegben a csapadék, a párolgás, a felszíni és a felszín alatti lefolyások szerepelnek. Az elemek mennyiségét milliméterben kifejezve a 22. ábra mutatja. Jól látható, hogy a felszín alatti lefolyás nagy hányadát képezi az összes lefolyásnak. Ebből is adódik a modell kalibrálásának nehézsége, mivel a felszín alatti hozzáfolyást lényegesen nehezebb pontosan modellezni, mint a felszíni lefolyást. Az 5. táblázat a lefolyási hányadok értékét mutatja csak a felszíni lefolyások, és az összes lefolyás figyelembevételével. Itt is megfigyelhető, hogy a felszín alatti lefolyás nagy súllyal szerepel a felszíni lefolyáshoz képest, mivel a lefolyási hányad több, mint kétszeresére nő a felszín alatti lefolyás figyelembevételével. A 2010-es év első felében hullott a legjelentősebb csapadékmennyiség, tehát ebben az évben jóval nagyobbak kellene lennie a felszíni lefolyás értékének a felszín alatti lefolyás értékénél. A modell azonban alábecsli a felszínen lefolyó vízmennyiséget.



22. ábra: A közelítő vízmérleg elemeinek alakulása 2008-2010-ig

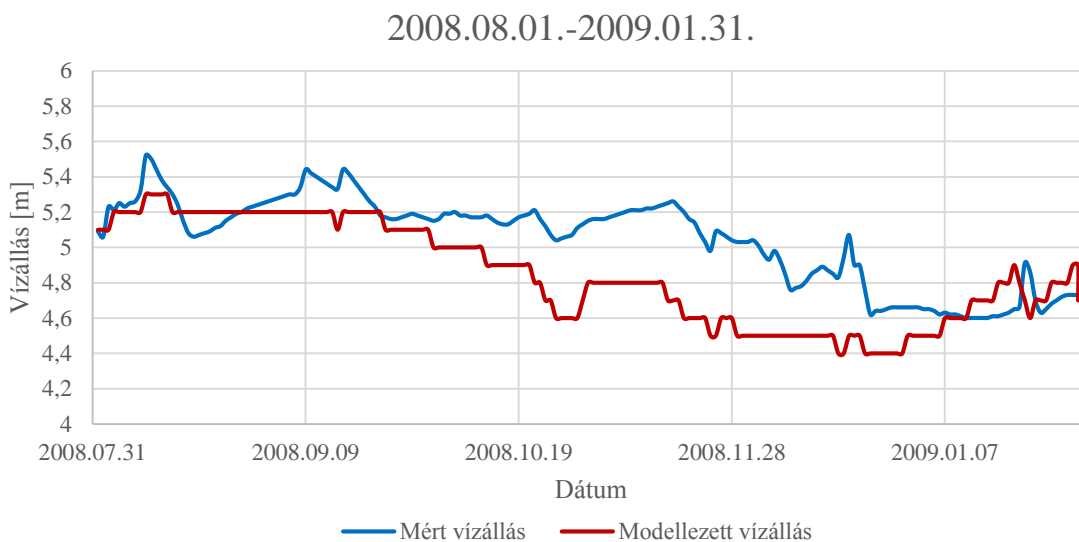
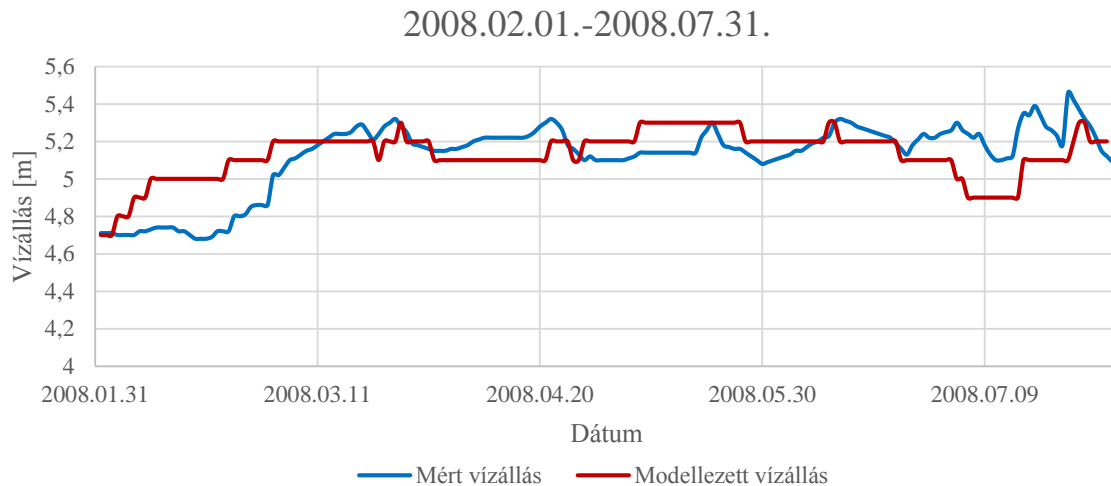
5. táblázat: Lefolyási hányadok értékei 2008-2010-ig

2008/1	2008/2	2009/1	2009/2	2010/1	2010/2
Lefolyási hányad felszíni lefolyásból					
0,095	0,197	0,174	0,145	0,139	0,197
Lefolyási hányad felszíni és felszín alatti lefolyásból					
0,324	0,533	0,521	0,543	0,421	0,720

A kalibrált paramétereket az 6. táblázat tartalmazza. A 23. ábrán láthatók a mért és modellezett tározóvízállások.

6. táblázat: Kalibrált értékek (2008)

Paraméter/Vízgyűjtő jele	02.01.-07.-31.						08.01.-01.31.						
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W1	W2	W3	W4	W5	W6	
Talaj kezdeti telítettsége [%]	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	
Mélyebb talajréteg kezdeti telítettsége [%]	1	1	1	5	5	5	1	1	1	5	5	5	
Maximális beszivárgás a talajba [mm/ó]	6	5	5	3	1	1	6	5	5	3	1	1	
Talaj tározási kapacitása [mm]	250	500	200	200	200	200	250	500	200	200	200	200	
Ebből felszínalatti hozzáfolyás képződésében részt vesz [mm]	100	35	20	30	20	20	100	35	5	30	20	20	
Szivárgási sebesség a talaj és a mélyebb talajréteg között [mm/ó]	0,01	0,01	0,13	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,035	0,01	0,01	0,01	
Mélyebb talajréteg tározási kapacitása [mm]	50	1000	1000	40	40	40	50	100	200	40	40	40	
Mélyebb réteg tározási tényezője [ó]	24	24	20	10	24	24	24	24	20	10	24	24	
Alaphozam	Talajréteg kezdeti alaphozama [m ³ /s]	0,02	0,05	0,05	0,01	0,001	0,001	0,05	0,05	0,02	0,01	0,001	0,001
	Talajréteg tározási együtthatója [ó]	800	50	500	20	20	20	500	50	800	20	20	20
	Tározók [db]	4	3	2	2	2	2	2	3	4	2	2	2



23. ábra: Modellezet és mért tározóvízállások (2008)

3.3.3 Statisztikai vizsgálat

A kalibrálás során kapott eredmények statisztikai kiértékelésére három mutatót vizsgáltam meg: (Das et al., 2008)

- korreláció (értéke 0-1, tökéletes korreláció esetén 1):

$$KORR = \frac{\sum(X - X_{\text{átl}}) * (Y - Y_{\text{átl}})}{\sqrt{\sum(X - X_{\text{átl}})^2 * (Y - Y_{\text{átl}})^2}} \quad (24)$$

- Nash-Sutcliffe modellhatékonysági mutató (NSME, értéke $(-\infty)$ -1, tökéletes közelítés esetén 1):

$$NSME = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_m)^2}{\sum(Q_o - Q_{o,\text{átl}})^2} \quad (25)$$

A mért és modellezett érték közötti eltérés nagyságát jellemzi. Zérus és annál kisebb érték esetén a modell nem hatékony.

- relatív térfogat hiba (PEV – Percentaged Error in Simulated Volume, értéke 0- ∞ , tökéletes közelítés esetén 0%):

$$PEV(\%) = 100 * \left(\frac{V_0 - V_m}{V_0} \right) \quad (26)$$

A két adatsor alatti terület közötti százalékos eltérést mutatja.

A korrelációt a vízállások és vízhozamok, a Nash-Sutcliffe mutatót és a relatív térfogat hibát csak a vízhozamok kapcsolatának jellemzésére használtam. A kapott értékeket a 7. táblázat mutatja.

7. táblázat: Statisztikai mutatók a kalibrált időszakokra

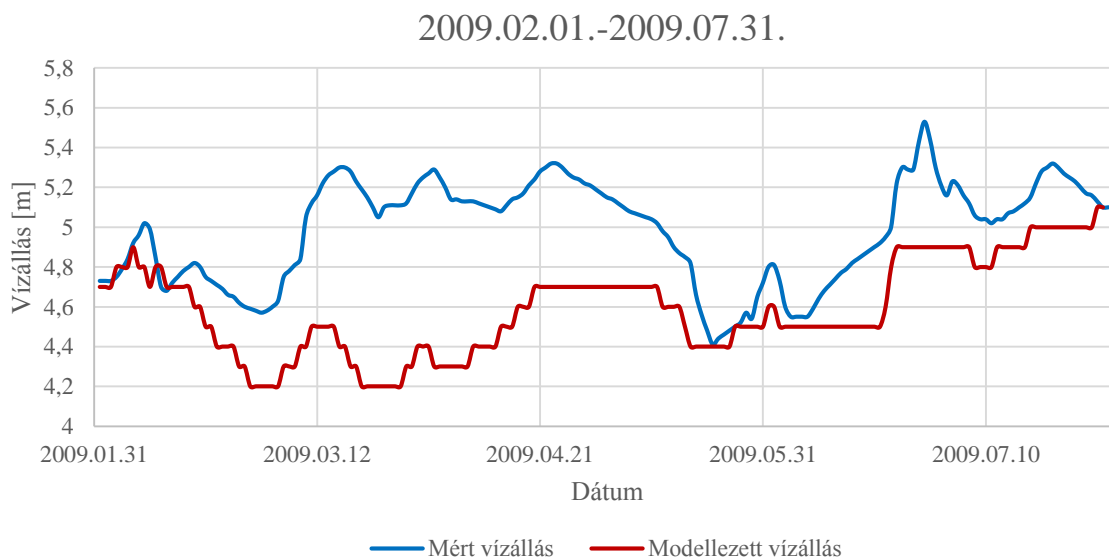
Vízállás		Vízhozam					
KORR		NSME		PEV		KORR	
2008/1	2008/2	2008/1	2008/2	2008/1	2008/2	2008/1	2008/2
0,55	0,71	0,12	0,35	-16,55	-3,98	0,66	0,66

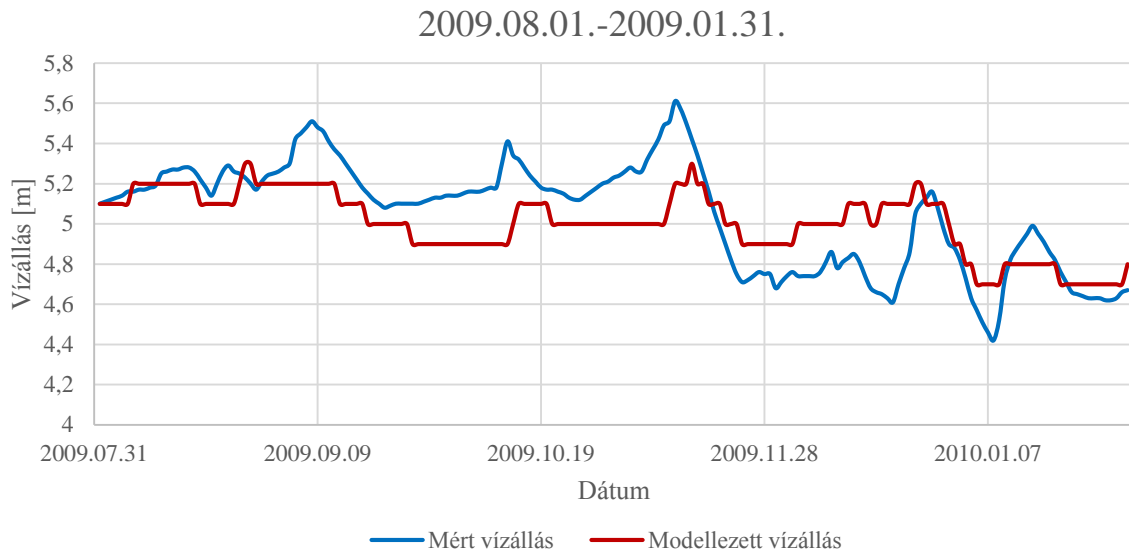
A kapott értékek a kalibráció sikerességét igazolják. A vízhozam idősor kapcsán kapott értékek azonban fenntartással kezelendők, mivel nem mért, hanem számított értékekkel történt a modellezett értékek összehasonlítása. A vízállás értékekkel kapcsolatban pedig fontos figyelembe venni, hogy a modell a vízállás számításra igen érzékeny. Egy mérési hiba vagy modellezési pontatlanság jelentős vízállásetéréseket okozhat a végeredményben, tehát a tározó vízállásának fél méteres szórásban történő megközelítése a modellel már igen jó eredménynek számít. (A kapott statisztikai mutatókat tehát kevésbé szigorúan szükséges kezelni.)

3.4 Validálás

A validálás során sorra vettem a 2008 utáni éveket, az 5 évből végső soron 3 évet tudtam érdemben vizsgálni. A validáció során ugyanazon statisztikai mutatókat vizsgáltam, mint a kalibráció során.

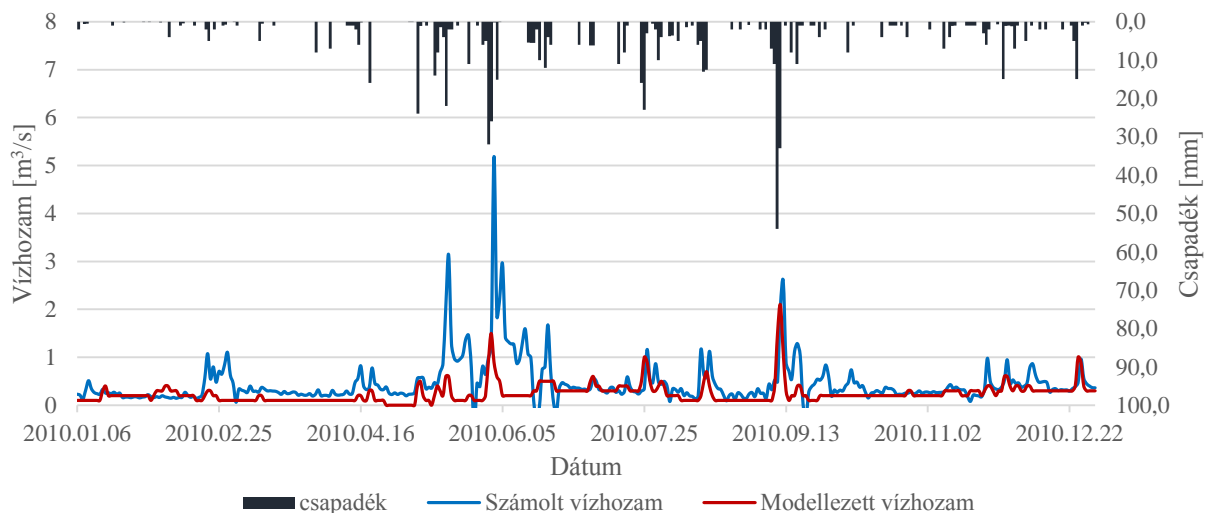
A 2009-es év mutatta a legkielégítőbb egyezést. A két modellezett időszak mért és modellezett vízállás idősorai a 24. ábrán láthatóak.





24. ábra: Validálás a 2009-es évre

A 2010-es évben országsszerte rendkívül nagy mennyiségű csapadék hullott, a Tarján-patak vízgyűjtőjén is vonult le villám árvíz ebben az évben. Emellett a tározó létesítése óta ez volt a legcsapadékosabb év. A modell erre az időszakra alábecsli a lefolyásra kerülő vízhozamokat. A 25. ábrán látható, hogy a tározóba érkező modellezett vízhozamok az év jelentős részében jó egyezést mutatnak az általam számolt vízhozamokkal. A modell jól láthatóan az egymást követő, nagy mennyiségű csapadék hatására keletkező villám árhullámokat nem tudja megfelelően reprezentálni. Ezen rendkívüli események modellezése rövidtávú futtatással javasolt.

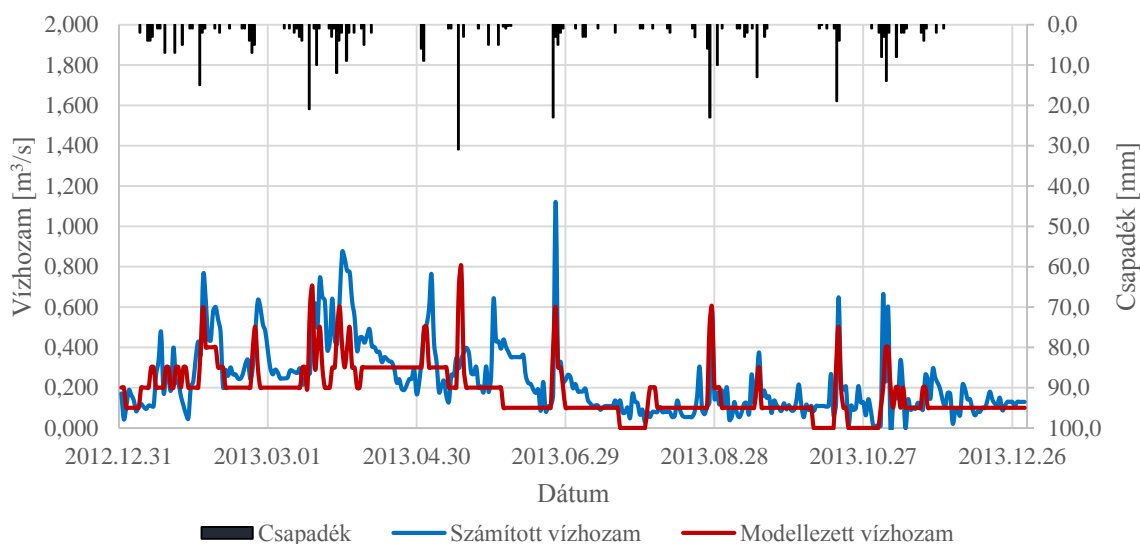


25. ábra: Validálás a 2010-es évre

A 2011-es és 2012-es évre rendelkezésre álló csapadékadatsor hiányossága miatt ezen két évet validálásra alkalmatlannak tekintem. 2011-ben a csapadékadatok közel 20%-a, 2012-ben az adatok 22%-a hiányzik. Az ingyenes forrásokból nyerhető csapadékadatsorok nem bizonyultak hiánypótlásra alkalmasnak. A CARPATCLIM projekt és a NOAA révén rendelkezésre álló

adatok mindkét esetben interpolált értékek, a kapcsolat nem kielégítő ezen interpolált értékek és a KDV-VIZIG által mért értékek között.

A 2013-as évben ugyan a csapadékadatsor 17%-a hiányzik, de a modellezett vízhozamok megfelelő alakulása miatt feltételezhető, hogy a hiányos intervallumok kevésbé csapadékos időszakokat fednek le (26. ábra).



26. ábra: Validálás a 2013-as évre

A kalibrálás során vizsgált statisztikai paramétereket a validálás során is megvizsgáltam. A vízállás adatsorokat csak a 2009-es év esetén vizsgáltam, emellett a 2009-es, 2010-es és 2013-as évekre a tározóba érkező vízhozamok idősorát ellenőriztem. A kapott eredményeket a 8. táblázat tartalmazza. A vizsgált mutatók alapján *a modellt validáltnak tekintem.*

8. táblázat: Statisztikai mutatók a validált időszakokra

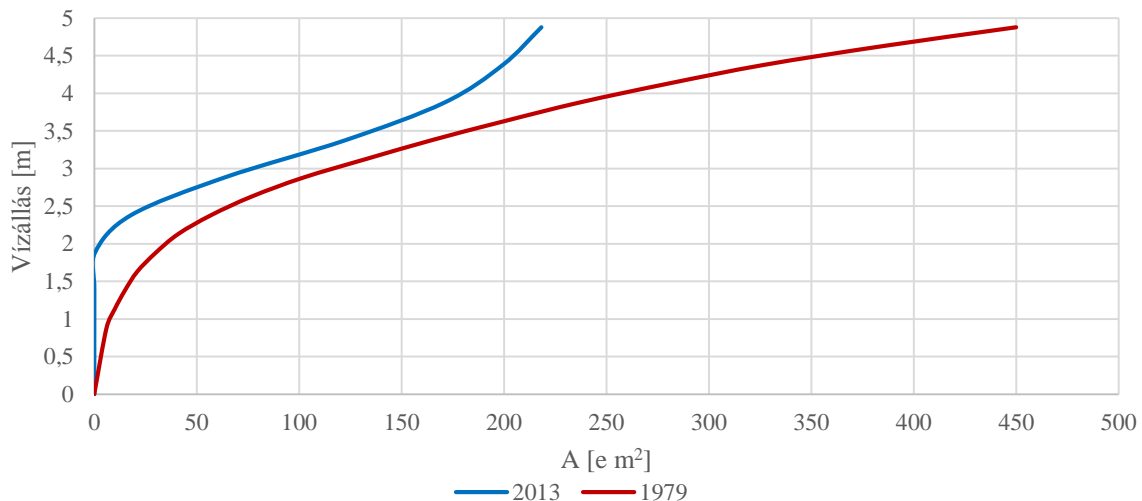
Vízállás		Vízhozam					
KORR		NSME		PEV		KORR	
2009/1	2009/2	2009/1	2009/2	2009/1	2009/2	2009/1	2009/2
0,38	0,67	0,19	0,05	29,19	-39,25	0,74	0,08
		2010/1	2010/2	2010/1	2010/2	2010/1	2010/2
		0,22	0,16	39,10	35,18	0,21	0,62
		2013/1	2013/2	2013/1	2013/2	2013/1	2013/2
		0,07	0,18	28,51	17,50	0,66	0,56

3.5 Gyakorlati alkalmazhatóság vizsgálata

A tározó működtetése kapcsán felmerült zöldtározóként való további hasznosítás igénye a KDV-VIZIG részéről. Az igény felmerülését indokolja, hogy a vízfolyáson meglehetősen kicsiny árhullámok keletkeznek, a tározó kapacitása jelenleg kihasználatlan. Emellett a tározó másodlagos ülepítő funkciójának háttérbe szorulásával a tározó üzemeltetése egyre gazdaságtalanabbá válik. További másodlagos funkció betöltése pedig a felhalmozódott szennyvíziszap miatt nem lehetséges. Ennek a szennyvíziszapnak az eltávolítására is lehetőséget adna a zöldtározóként történő hasznosítás. Ezt az igényt megvizsgálandó, a tározó

műtárgyat különböző átmérőjű átereszekkel helyettesítve vizsgálom a víz tartózkodási idejét, a leghosszabb vízborított időszakot, a maximális vízállást és az alvízi vízhozamok főbb hidrológiai jellemzőit 2008-2009-ig tartó időszakban. A műtárgy átmérőjét 0,5 m-től változtattam 0,25 m-enként a tározó eredeti műtárgyának átmérőjéig (ami 1,65 m), valamint megkerestem azt az átmérőt deciméteres pontossággal, melynél a tározó már túltelítődik (az év minden napja vízborított). A futtatásokat minden átmérő esetén a régi és az új (a feliszapolódás hatását figyelembe vevő) morfológiai görbét is figyelembe véve végeztem.

Elsőként meghatároztam a KDV-VIZIG 2013-as mederfelméréséből egy új morfológiai görbét. A 27. ábrán látható, hogy a tározó feliszapolódása jelentősen megváltoztatta a görbe alakját.

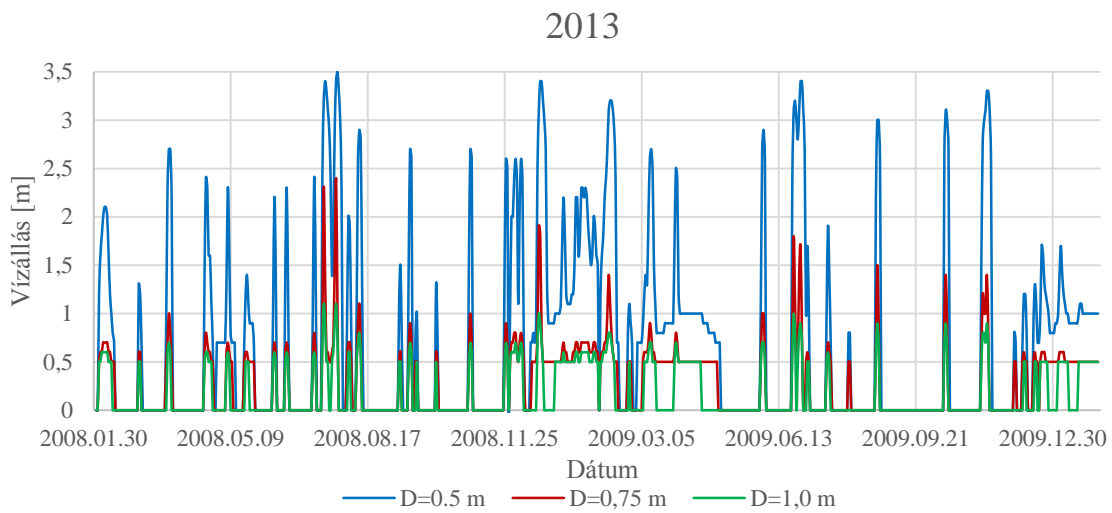
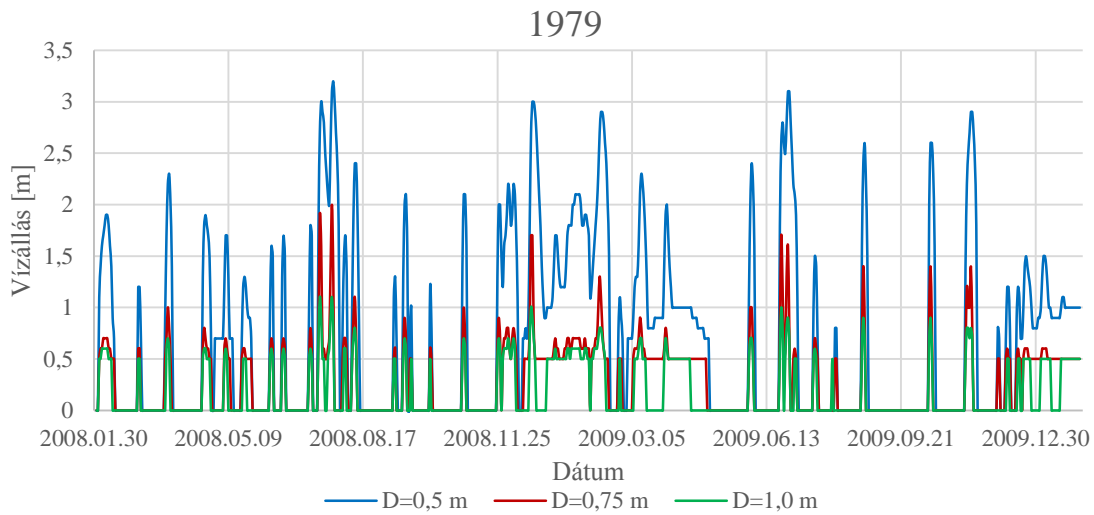


27. ábra: A tározó eredeti és új morfológiai görbéje

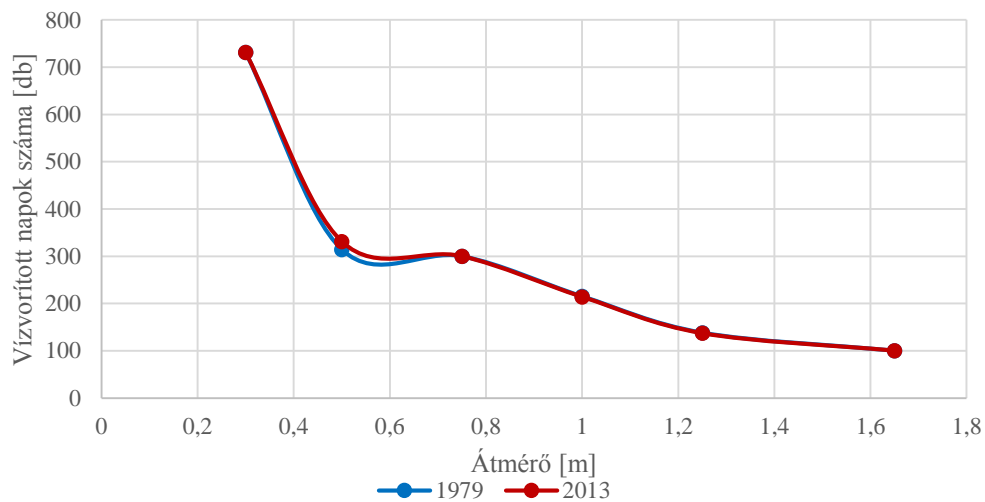
A modellbe beépítettem a műtárgyat az eredeti áteresz paramétereit használva. Az alkalmazott paraméterek a következők:

- hossz: 43,0 m;
- átmérő: 0,5-0,75-1,0-1,25-1,65 m;
- esés: 3 ‰;
- belépési és kilépési veszteségtényező: 1,0.

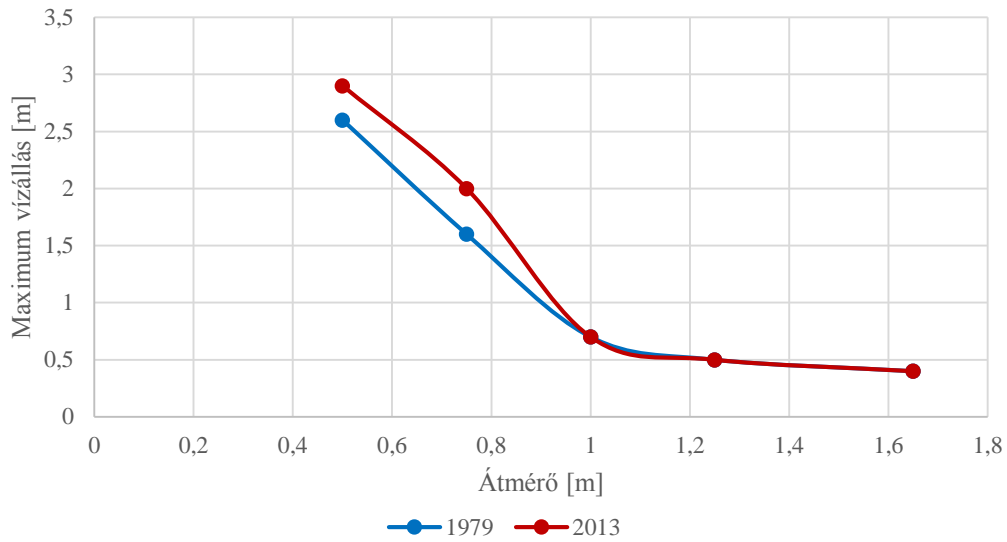
A futtatások során kapott vízállások a 28. ábrán láthatók. A jobb átláthatóság érdekében csak a 0,5-0,75-1,0 m átmérőjű áteresz esetén kapott eredményeket ábrázoltam. A 29. ábrán a vízborított napok száma látható az alkalmazott átmérők függvényében. A 30. ábra a maximális vízállások alakulását mutatja be, a 31. ábrán pedig az átlagos vízhozamok eredeti értéktől való százalékos eltérése látható. A kapott eredményeket táblázatos formában az 9. táblázat tartalmazza.



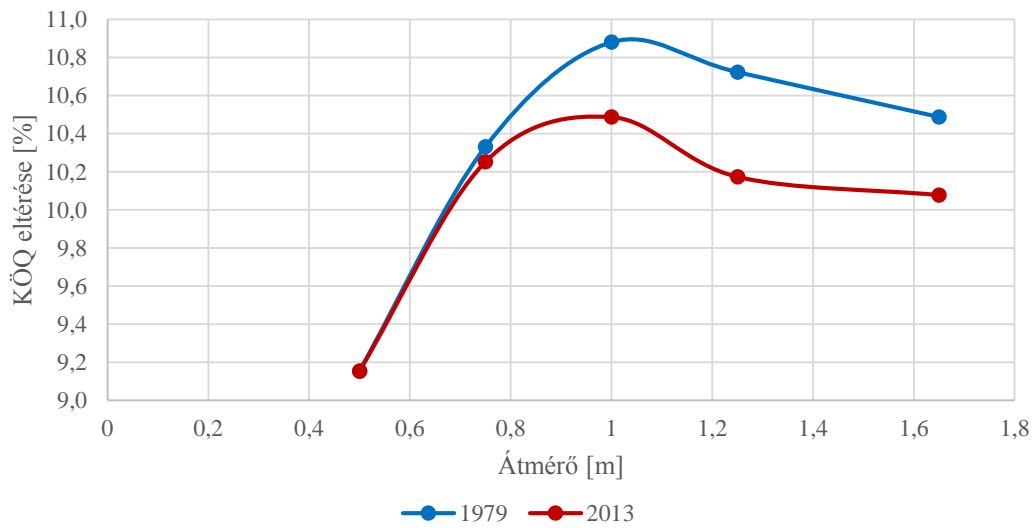
28. ábra: Vízállások alakulása különböző átmérők esetén az eredeti és az új morfológiai görbe alkalmazása mellett



29. ábra: Vízborított napok számának alakulása különböző átmérők esetén az eredeti és az új morfológiai görbe alkalmazása mellett



30. ábra: Maximális vízállások alakulása különböző átmérők esetén az eredeti és az új morfológiai görbe alkalmazása mellett



31. ábra: Közepes vízhozamok alakulása az eredeti középvízhozamhoz képest különböző átmérők esetén az eredeti és az új morfológiai görbe alkalmazása mellett

9. táblázat: A futtatások jellemző értékei

	D=0,3 m	D=0,5 m	D=0,75 m	D=1,0 m	D=1,25 m	D=1,65 m	Eredeti
1979							
Vízborított napok [nap]	731	314	300	215	138	100	-
Leghosszabb vízborított időszak [nap]	731	65	55	32	18	8	-
H _{max} [m]	-	2,6	1,6	0,7	0,5	0,4	5,61
LKQ [m ³ /s]	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,030
LNQ [m ³ /s]	-	0,5	0,9	1,0	1,0	1,0	0,949
KÖQ [m ³ /s]	-	0,190	0,192	0,193	0,193	0,192	0,174
KÖQ% [%]	-	9,2	10,3	10,9	10,7	10,5	-
2013							
Vízborított napok [nap]	731	331	300	214	137	100	-
Leghosszabb vízborított időszak [nap]	731	61	55	32	18	8	-
H _{max} [m]	-	2,9	2,0	0,7	0,5	0,4	5,61
LKQ [m ³ /s]	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,030
LNQ [m ³ /s]	-	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,949
KÖQ [m ³ /s]	-	0,190	0,192	0,192	0,192	0,192	0,174
KÖQ% [%]	-	9,2	10,3	10,5	10,2	10,1	-

A kapott értékek azt mutatják, hogy a morfológiai görbe változása nem okoz számottevő különbséget, tehát a tározó esetleges kotrásának mértéke nem befolyásolja jelentősen a kialakuló vízmélységeket és vízhozamokat. Ez a tározó méretéhez képest kis levonuló vízhozamoknak köszönhető, mivel azonban ezek nem mértékadó vízhozamok a zöldtározó létesítésének hatásának vizsgálata rövidtávú futtatással is indokolt rendkívüli eseményekre. Mivel a modell csak tizedes pontossággal képes számítani a vízhozamokat, a legkisebb vízhozamok értéke jelen esetben nem értékelhető. A legnagyobb alvízi vízhozamok azért nem vesznek fel 1,0 m³/s-nál nagyobb értéket, mert a beérkező vízhozamok maximuma sem nagyobb ennél. A futtatások kimutatták, hogy 0,3 m átmérőjű átereszt szükséges ahhoz, hogy a tározó túltelítődjön, tehát ennél mindenképp nagyobb átmérő alkalmazása szükséges.

A vizsgált értékek alapján *0,75 m átmérőjű csőátereszt alkalmazását javasolom*, mivel ez esetben a kialakuló legmagasabb vízállás nem túl magas, tehát a tározó nagyobb árhullámokat is könnyedén megfog. A tározó ebben az esetben közel 40%-ban van víz alatt és a leghosszabb tartózkodási idő két hónap. A 28. ábrán látható, hogy ezen átmérő alatt hirtelen megnő a vízborított napok száma, a 29. ábrán pedig az látható, hogy ezen átmérő felett meglehetősen kicsiny vízállások alakulnának ki, tehát a tározó kapacitása erősen kihasználatlan lenne. Hogy az alvízi átlagvízhozam ne növekedjen túlzottan és ne alakuljanak ki nagyobb sebességek az alvízi mederben, ekkora átmérő használata célszerű (30. ábra.). Ez az átfolyási keresztmetszet a jelenlegi átereszt esetében hozzávetőlegesen 0,43 m-es zsilipnyítás esetén jönne létre.

További vizsgálatok szükségesek nagyvízi állapotokra, erre azonban csak rövidtávú modell felállításával van lehetőség. Vizsgálendő továbbá a tározóban felfogott víz vízminőségi szempontból. Nem megengedhető, hogy a felfogott víz a túlzott tartózkodási idők miatt esetlegesen többlet tápanyagszennyezést okozzon a vízfolyáson.

4. Összefoglalás, konklúziók

Dolgozatom során a HEC-HMS összevont paraméterű vízgyűjtőmodellt sikeresen kalibráltam és validáltam a Tarján-patak vízgyűjtőjére, valamint sikeres vizsgálatokat végeztem a zöldsztározó létesítésével kapcsolatban. A HEC-HMS modellt a dolgozatban foglaltak alapján gyakorlati alkalmazásra megfelelőnek találom. Fontos azonban a modell körültekintő alkalmazása.

A dolgozat készítése során szerzett fontos tapasztalat, hogy tározó vízállására kalibrálni problémás, mivel a modell nagyon érzékeny a tározó vízmérlegére. Ahhoz, hogy a tározó vízállás időszora, mint mért ellenőrzési idősor felhasználható legyen a kalibrációnál, szükséges a nagy pontosságú morfológiai görbe ismerete, mivel ilyen méretű vízgyűjtő esetében a tározó jelentős szerepet vállal a levonuló vízhozamok alakításában. Ehhez a tározók medrének rendszeres felmérése lenne szükséges, azonban ez hazai gyakorlatban nem jellemző. Problémát jelent továbbá, hogy a tározók esetében legtöbbször csak az alvizen található mércezelvény, így a tározóba érkező vízhozamokat számítással szükséges előállítani. Ez a számítás is pontos morfológiai görbét és pontos mért idősorokat igényel. Esetemben nem voltak tökéletesek a számított vízhozam értékek. A kifolyó vízhozam idősor és tározó vízállás idősorából visszszámított befolyó vízhozamok többször is olyan nagy negatív értékek lettek, amelyek a tóparólgás figyelembe vételével sem váltottak előjelet. Ilyen esetekben a hibás mérési adatokat tartalmazó időszakokat eltávolítottam és interpolálással kellett kiküszöbölnöm az adathiányt. A vízállásra történő kalibrálás problémája hazai viszonyok esetében általában fennállhat, ezért nem ajánlott. Elkerülése pontos morfológiai görbék és hosszú, megbízható idősorok segítségével lehetséges.

Hosszútávon rendkívül fontos eleme a vízgyűjtőmodellnek a párolgás, az ennek számításához szükséges adatok megfelelősége jelentős lehet. Emiatt javasolt különböző párolgászámítási módszerek összehasonlító vizsgálata, a területi átlaghoz való viszonyítása. A vizsgált időszakokban jelentős hányadát képezte a lefolyásnak a felszín alatti hozzáfolyás, ennek pontosabb modellezéséhez, illetve a vízgyűjtő vízháztartásának részletesebb feltérképezéséhez talajvíz kutak vízállásának vizsgálata is javasolt.

Összevont paraméterű modell alkalmazásával ugyan csökkenthető a szabad paraméterek száma, azonban így is jelentős számú olyan paraméter kalibrálása szükséges, amelyek az összevont szemlélet miatt már sokszor nem hordoznak magukban közvetlen fizikai tartalmat. Emiatt is fontos, hogy kellően jó minőségű hidrometeorológiai adatsorok és terepmodell álljon rendelkezésre a modell felállításához, arányosításához és a vizsgálati futtatások végzéséhez. Mivel a modell nagy számú számítási lehetőséget kínál és ezek közül meglehetősen kevés adaptálása történt meg magyarországi vízgyűjtőkre, ezek további vizsgálata fontos és szükséges. A nagy mennyiségű szabad paraméter miatt érzékenységvizsgálat is javasolt, erre azonban jelen dolgozat során a bonyolult kalibrációs folyamat miatt, nem volt kapacitásom kitérni.

Ugyan a futtatások végzését bonyolítja, azonban a kalibrálás folyamatát segíti a futtatás éveinek szakaszokra bontása. A szélsőséges események (villámárvizek) modellezése kifejezetten rövidtávú futtatással javasolt, mivel így sokkal részletesebb és pontosabb eredmények kaphatók.

A téma folytatásaként hasznosítani tervezem a kihelyezett műszerek által mért adatokat rövidtávú futtatásokban. A modell lehetőséget ad különböző csapadékesemények generálására, mellyel fiktív villámárvizek is modellezhetők. Ezek segítségével tovább elemezhető a tározó működtetése. Lehetőség lenne továbbá a Zagyva tározórendszerének vízgyűjtőmodellel történő vizsgálatára is. A modellel feltárható lenne a jelenlegi üzemirányítás mellett a tározók egymásra hatása és az eredmények függvényében akár egy hatékonyabb szabályrendszer felállítása is.

Végül a dolgozat utolsó szakaszában elvégezett vizsgálattal igyekeztem rámutatni, hogy egy ilyen fizikai alapú modell gyakorlatban jól alkalmazható tározó méretezéshez és tározó vízgyűjtőn való elhelyezésének megállapításához is.

5. Irodalomjegyzék

- Allen P. G., Pereira L. S., Smith M., Raes D., Wright J. L. (2005): *FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering.
- Balatonyi L., Czigány S., Pirkhoffer E. (2010): *Impact of canopy cover on hydrometeorological parameters in a flash floodaffected watershed*. In: Schweckendiek (szerk.), *Comprehensive Flood Risk Management Research for Policy and Practice*.
- Das, T., Bárdossy, A., Zehe, E. (2008): *Comparision of conceptual model performance using different representations of spatial variability*, Journal of Hydrology, 356. pp. 106-118.
- Fischer M., Trnka M., Hlavinka P., Orság M., Kučera J., Žalud Z. (2011): *Identifying the FAO-56 Crop Coefficient for High Density Poplar Plantation: The Role of Interception in Estimation of Evapotranspiration*, In: Šiška B., Hauptvogel M., Eliašová M. (szerk.), *Bioclimate: Source and Limit of Social Development International Scientific Conference*, Slovakia.
- Flaming M., Neary V. (2004): *Continuous Hydrologic Modeling Study with the Hydrologic Modeling System*, Journal of Hydrologic Engineering, 9(3).
- Feldman A. D. (2000): *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*, Technical Reference Manual, California.
- Hajnal G., Koris K. (2014): *Hidrológia I. Fizikai hidrológia*, BME, Egyetemi jegyzet, Budapest.
- Keve G., Hajnal G., Bene K., Torma P. (2014): *Extrapolating flood hazard potential of Eger creek due to climate change*, In: Tóth A., Piskóti-Kovács Zs. (szerk.) *Sustainable Regional Development: Landscape, Social, Economic and Educational Challenges Conference Proceedings*, Eger.
- Kiss M (2014): *Physical interaction mechanisms at the littoral-pelagic interface of shallow lakes*, BME, PhD thesis, Budapest.
- Koch R., Bene, K., Hajnal G. (2012): *Hydrological Characterization of the Aggtelek Karst Springs*, In: *Catchment processes in regional hydrology: from experiment to modeling in Carpathian drainage basins*, International Conference, Sopron.
- Koch R. (2015): *Karsztforrások hidrológiai vizsgálata*, Doktori értekezés, SZE, Győr.
- Kontur I., Koris K., Winter J. (2003): *Hidrológiai számítások*, Limnográf, Budapest
- Kovács Á. D. (2011): *Tó- és területi párolgás becslésének pontositása és magyarországi alkalmazásai*, Doktori értekezés, BME, Budapest.
- Közép-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság (2013): *A Tarján-pataki tározó víz- és iszapminőségi állapotának felmérése*, Budapest.
- 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. (2013): *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*, User's Manual, California.

Sridhar V. (2007): *Evapotranspiration Estimation and Scaling Effects Over The Nebraska Sandhills*, Great Plain Research, 17. pp. 35-45, University of Nebraska, Lincoln.

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. (2014): *Application of a lumped model to the watershed of Pöllau*, BSc thesis, BME-TU Graz, Budapest.

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.

6. Mellékletek

1. számú melléklet: Bányaterenyei tározó műszaki adatai

Tározó térfogata:

- üzemvízszintnél: 350 em³
- 10%-os árvízszintnél: 1870 em³
- 1%-os árvízszintnél: 2667 em³

Tározó területe:

- üzemvízszintnél: 17 ha
- 10%-os árvízszintnél: 59 ha
- 1%-os árvízszintnél: 72 ha

Tározó térfogati teljesítő képessége:

- árvízcsúcs-csökkentés: 2.317 em³
- szennyvízülepítés: 350 em³

Tározó alatti mederszakasz tervszerinti vízzállító képessége: NQ10%= 8 m³/sec

Jellemző vízhozamok:

- Q1% = 38 m³/sec
- Q10% = 21 m³/sec

Az egyesített műtárgy főbb adatai:

- az árapasztó bukó keresztmetszetének mérete: 9,64 * 9,64 m
- a bukóél hasznos hossza: 32 m
- a bukóél magassága: 203,23 mBf.
- fenékleürítő: 1 db táblás zsilip

A fenékleürítő legnagyobb vízzállítása csúcsüzemi vízszint mellett: 18,5 m³/sec

Párolgási és szivárgási veszteség: 119 em³/év (700 mm/év)

Vészárasztó:

- koronaél hossza: 12 m
- bukóél magassága: 203,23 mBf.
- teljesítőképessége: Q1% = 38 m³/sec

Vízmerce "0" pontjának abszolút magassága: 194,62 mBf.

Normál állapotnak nevezzük azt a tározó állapotot, amikor a tározó vízszintje az üzemvízszint olyan adott környezetében van, amely vízszint mellett a tározó képes kielégíteni a járulékos hasznosítási célt. Amennyiben a Tarján-pataki ill. Maconkai tározó vízszintje a normál állapot vízállástartománya alá, illetve fölé esik, úgy a tározó rendkívüli kisvízi, illetve nagyvízi állapotba kerül.

Normál állapotban a vízállástartomány a tározóban: 470 - 540 cm, a tartandó vízszint 520 cm. Ekkor a tározóban lévő víz térfogata 330 em³. Rendkívüli nagyvízi állapotban 541-920 cm a vízállástartomány.