

Ámon Gergely,¹  Bene Katalin² 

Villámárvizek kialakulásának bizonytalansági vizsgálatai feltáratlan vízgyűjtőkön³

Uncertainty Studies of Flash Flood Events on Ungauged Watersheds

Az elmúlt évek rövid időtartamú, nagy intenzitású csapadékeseményei szükségszerűvé teszik a kisvízgyűjtők feltérképezését és a villámárvizek viselkedésének pontosabb megismerését. Általánosan jellemző Magyarországon a vízgyűjtők feltáratlansága. A klasszikus empirikus módszerekkel szemben a növekvő csapadékintenzitások hatásainak elemzéséhez komplex módon felépített numerikus modellek szükségesek. A rövid időtartamú, nagy intenzitású, csapadékeltette, felszíni lefolyásból képződő árhullámok nagy esésű vízgyűjtőkön általában jól leírhatók részlegesen összevont paraméterezésű modellekkel. Így az érzékeny paraméterek mértéke leszűkíthető, ezáltal a modell eredményeinek bizonytalansága csökken. A hirtelen megjelenő árhullámok esetében ugyanakkor arányaiban kisebb mennyiség- és időbeli bizonytalanság is hatással lehet annak mértékére, hogy valós vízkár keletkezik-e. A vizsgálatokhoz hatékony eszköz a hidrológiai és vízgyűjtőre kiterjesztett hidrodinamikai modellek alkalmazása. A vízgyűjtőn területi átlagolással paraméterezett hidrológiai modell és a rácsáló alapú hidrodinamikai modell eredményei a kifolyási peremen hasonlíthatók össze. Jelen cikk célja az összehasonlító modellezés alkalmazhatóságának bemutatása. A vizsgálat két eltérő fizikai tartalmú modellen alapul ugyanazon vízgyűjtőn. Cél kimutatni, hogy a rendelkezésre álló adatok hiányossága ellenére a modellek összehasonlító elemzésével megfelelő képet lehet kapni a feltáratlan vízgyűjtő működéséről és a kialakuló árhullámok hatásáról.

¹ Széchenyi István Egyetem Közlekedésépítési és Vízmérnöki Tanszék Vízgazdálkodási Kutatócsoport, e-mail: amon.gergely@sze.hu

² Széchenyi István Egyetem Közlekedésépítési és Vízmérnöki Tanszék Vízgazdálkodási Kutatócsoport, e-mail: benekati@sze.hu

³ A publikáció a Víztudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Széchenyi István Egyetem, Közlekedésépítési és Vízmérnöki Tanszék / Vízgazdálkodási Kutatócsoport támogatásával készült.

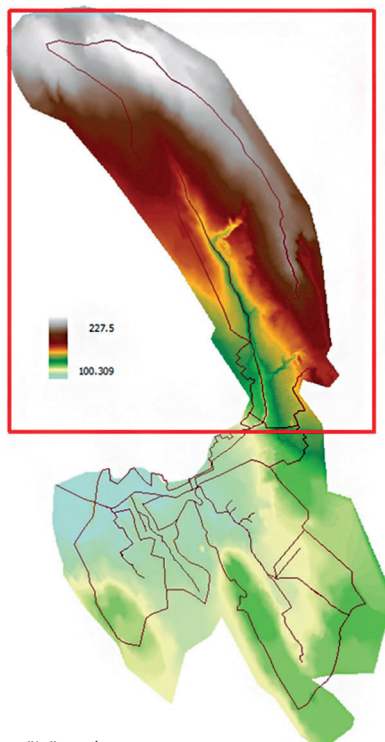
Kulcsszavak: vízgyűjtő hidrológia, hidrodinamikai, paraméterérzékenység, numerikus módszerek, Clark-egységárhullám, sekélyvízi egyenletek

The rainfalls events with high intensity and short duration of the last years are urging necessarily to gauge steep-sloped small watersheds, and to recognise the behaviour of flash floods. In Hungary generally the watersheds are ungauged, where the classic analytical methods should be used wary. Therefore properly analysing flash flood events need complex numerical models, or different stages of numerical models. In general floods from intense overland flow can be estimated with models using semi-lumped parametrization. The amount sensitive parameters can be reduced therefore the uncertainty of the model is also decreasing. On the other hand, during flash floods smaller uncertainties of volume and time could have an effects on a possible water damages. A useful tool for such investigations the use of hydrological and hydrodynamical model on watershed scale. An area averaged hydrological and a mesh based hydrodynamical model's results can be compared on the outflow section. The goal of this study is presenting the usefulness of comparing different models. The investigation is based on two different models with different physical background on the same watershed. Besides lack of measured data, the comparison of different models can give a proper view on the behaviour of a watershed during a flash flood event.

Keywords: Watershed hydrology, hydrodynamics, parameter sensitivity, numerical modelling, Clark Unit hydrograph, shallow water equations

Bevezetés

A publikáció célja a villámárveszélyes vízgyűjtőn a mennyiségi és időbeli bizonytalanságok feltárása. A csapadék keltette villámárvizek kárelhárítási folyamatai között az időbeliség, azaz az időelőny meghatározása az emberélet és a gazdasági javak szempontjából közvetlenül fontos, a mennyiségi szempontok pedig közvetve, főleg a gazdasági károk elkerülése céljából igényelnek megfelelően kiépített vízelvezető rendszert, amelyre havária esetén megfelelő védelmi stratégiát kell felépíteni. A vízgyűjtők modellezésének egyik kutatási iránya a hidraulikai viselkedés modellezése kapcsolt hidrológiai és hidrodinamikai modellek segítségével.



1. ábra: Az Aszalvölgyi-csatorna vízgyűjtő rendszere

Forrás: EUDEM

A vízhasznosítási problémák mellett a publikációban tárgyalt villámárvízhatás egy, a csapadékesemények intenzitásának átalakulásával egyre nagyobb jelentőségű folyamat. Várhatóan a közeljövőben a növekedő intenzitású csapadékesemények gyakorisága is növekedni fog, ennek megfelelően ez több oldalról is kutatások fókuszába kell hogy terelje a jelenséget. Egyrészt a vízkár elhárítása (hogyan védekezzünk műszakilag és gazdaságilag hatékonyan), mit lehet kezdeni az egyre rövidebb idő alatt megjelenő vízmennyiségekkel (hol lehet tárolni, mire lehet felhasználni). A publikáció az idő- és tetőző hozambeli bizonytalansággal foglalkozik, olyan kérdésekre keresve a választ, hogy a változó helyzetből és a geometriai és talajtani feltáratlanságból adódó bizonytalanságok mellett találhatók-e és megfelelően definiálhatók-e olyan paraméterek, amelyek mellett megbízhatóan működő modelleket lehet felépíteni. Országosan jellemző, hogy főleg a kisebb vízgyűjtők (<50–100 km²) adatellátottsága szegényes, hidrológiai, területhasználati és geometriai szempontból egyaránt, tehát feltáratlannak tekinthetők.

A publikációban egy ilyen konkrét vízgyűjtővel foglalkozunk, amely a Székesfehérvár belterületét is érintő Aszalvölgyi-csatorna felső, 27,4 km² kiterjedésű felső vízgyűjtője (1. ábra). A munka célja egy korábbi, teljes vízgyűjtőre kiterjedő modellvizsgálat kalibrációját alapul

véve⁴ összevont paraméterezésű hidrológiai és peremfeltételként csapadékidősort felhasználó hidrodinamikai modellek összehasonlító elemzésével pontosabb rálátást kapjunk a vízgyűjtő paraméterérzékenységére, ezáltal az idő- és mennyiségbeli bizonytalanságokra. Ennek eszköze kétféle, ugyanazon területre felépített, eltérő működésű modell, amelyek eredményei hatással vannak a kalibrációkra, az összehasonlító elemzés alapján az eredmények érzékenysége pedig rámutat a modellek megbízhatóságára.

A modellvizsgálat alapját, a teljes vízgyűjtő hidrológiai modelljének korábbi kalibrálása adta, amely a 2010-es májusi mért csapadékeseményeken alapult, amelyhez egy, a 3% relatív gyakoriságú, torkolati permanens vízhozam volt egyedül hozzárendelhető adat. A kalibráció ellenőrzésként a 10% és 1%-os csapadékeseményekhez való eltérés mértéke adta meg a modell megbízhatóságát a különböző nagycsapadékokra. Mivel a teljes vízgyűjtőrendszer hozamának jelentős részét a felső vízgyűjtő befolyásolja, kimondható, hogy a teljes vízgyűjtőmodell érzékenységének mértéke hasonló a felső vízgyűjtőéhez.⁵

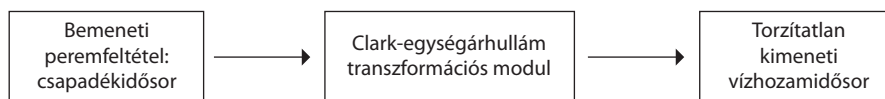
Modellfelépítés

Az összehasonlító elemzés két lépésben történt. Első lépésben a hidrológiai modell csapadékidősort nem redukáltuk, tehát nem feltételeztünk veszteségeket. A hidrodinamikai modellben ugyanezt a csapadékidősort használtuk peremfeltételnek, és a kifolyási pontnál a hidrológia modell által meghatározott vízhozamidősről volt az n érdességű tényező kalibrálási alapja. A második lépésben a korábbi kutatások során kalibrált hidrológia modell, amely tartalmazta a veszteségeket is, volt az alapja a hidrodinamikai vizsgálatoknak.⁶ A redukálatlan és a redukált csapadékidősről meghatározott vízhozamidősről összehasonlítottuk, és meghatároztuk a redukációs tényezőt. A redukációs tényezőt kétféleképpen alkalmaztuk, egyrészt a kifolyási vízhozamidősoron és a bemeneti csapadékidősoron.

Modellstruktúra

Hidrológiai modell elvi (moduláris) felépítése:

Első lépésben alkalmazott veszteségmentes hidrológiai modell (csak a lefolyást befolyásoló geometriai paraméterek jelennek meg a modellben).



2. ábra: Veszteségmentes hidrológiai modell sémája

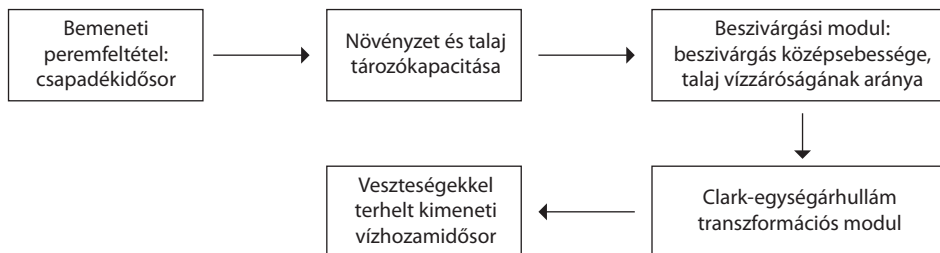
Forrás: HEC-HMS felszínlefolyás-modulok

⁴ ÁMON 2016: 26.

⁵ ÁMON 2016: 37.

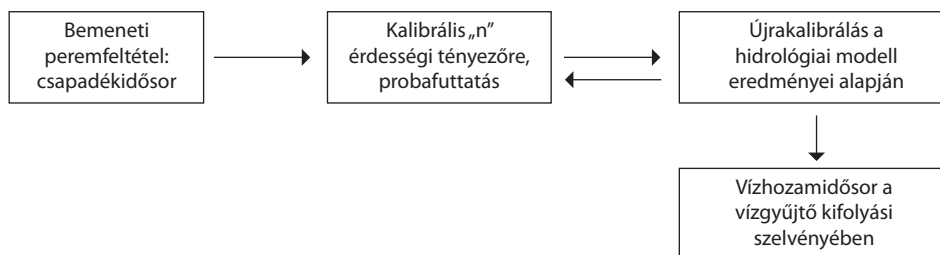
⁶ ÁMON-BENE 2022.

Második lépésben alkalmazott teljes hidrológiai modell sémája (a lefolyást befolyásoló összes modul bevezetésével).



3. ábra: Hidrológiai modell sémája veszteségekkel
 Forrás: HEC-HMS felszíni lefolyás és szivárgási modulok

Hidrodinamikai modell sémája.



4. ábra: Hidrodinamikai modell sémája
 Forrás: HEC-RAS felszíni lefolyás rendszer

Az elemzés során HEC-HMS hidrológia modellt és 2D HEC-RAS hidrodinamikai modellt alkalmaztuk.

Hidrológiai modell lefolyásszámítása Clark-egységárhullám módszerrel, HEC-HMS környezetben:⁷

Alapegyenlet, lineáris tározók elve szerint:

$$\begin{aligned}
 dS &= (I - O)dt \\
 Q &= x \cdot I + (1 - x) \cdot O \\
 S &= K \cdot Q
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Ahol S a tározott víztérfogat, I a belépő vízhozam, O a kilépő vízhozam, x a Muskingum-féle tározási tényező, K a tározási együttható.

⁷ FELDMAN 2000.

A felszíni lefolyás számítása:

$$\frac{A_t}{A} = f(x) = \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{t_c}\right)^{1.5}, & t \leq \frac{t_c}{2}, \\ 1 - 1.414 \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^{1.5}, & x \geq 0, \end{cases} \quad (2)$$

Ahol A_t a kumulált aktív vízgyűjtőterület időegység alatt, A a teljes vízgyűjtőterület, t_c az összegyülekezési idő.

A Clark-egységárhullám könnyen, kevés adatból paraméterezhető, stabil számítási modell.⁸ Az alkalmazott modellszámítások esetében a stabilitás, az iterációs lépések csökkentése kiemelten fontos a modellek bizonytalanságának mérséklése érdekében.

Hidrodinamikai modell:

- Vektorizált terepadatok alapján épített digitális terepmodell (DTM), ortofotós terület-használati térképpel kiegészítve;
- Navier–Stokes-egyenleteket alkalmazó megoldó motor, végestérfogat-módszerrel, kiegészítő turbulencia-modell nélkül.

Alapegyenlet, sekély vízi egyenletek $x - y$ irányban:⁹

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \end{aligned} \quad (3)$$

Ahol $u, v - x, y$ irányú sebességkomponensek, $H -$ vízmélység az adott cellában, g a nehézségi gyorsulás, v_t a vízszintes örvényviszkózitási együttható, c_f a fenékcúsztató feszültség együtthatója, f a Coriolis-paraméter. A felszíni lefolyás pontos közelítése igényli a teljes hidrodinamikai alapegyenletek minél jobb közelítését.¹⁰

A csapadék keltette lefolyás hidrodinamikai modellezésénél turbulenciamodellel kiegészített, teljes sekély vízi egyenleteket használó numerikus megoldókat célszerű alkalmazni, amelyhez szivárgási modell is tartozik.¹¹

Ugyanakkor a kutatásban vizsgált vízgyűjtő nagy esésű, egy torkolati szelvényre vonatkoztatott vízhozamidősor létrehozása a cél, ezért a turbulenciát vizsgáló kiegészítő modul elhanyagolható.

A lokális turbulens hatások abban az esetben lennének a vízgyűjtőn mérvadók, ha a fluxus nem nagy, vagy valamilyen műtárgy, akadály környezetének pontos viselkedését akarjuk leírni.¹² Az adathiányból adódóan a szivárgási modell rácshálóra kiterjesztve bizonytalan eredményeket adna, ezért a hidrológiai modell paraméterezési összefüggései alapján redukált csapadékmennyiségeket vettünk figyelembe, a későbbi fejezetekben bemutatottak szerint.

⁸ SZILÁGYI 2018: 277–279.

⁹ BRUNNER 2020.

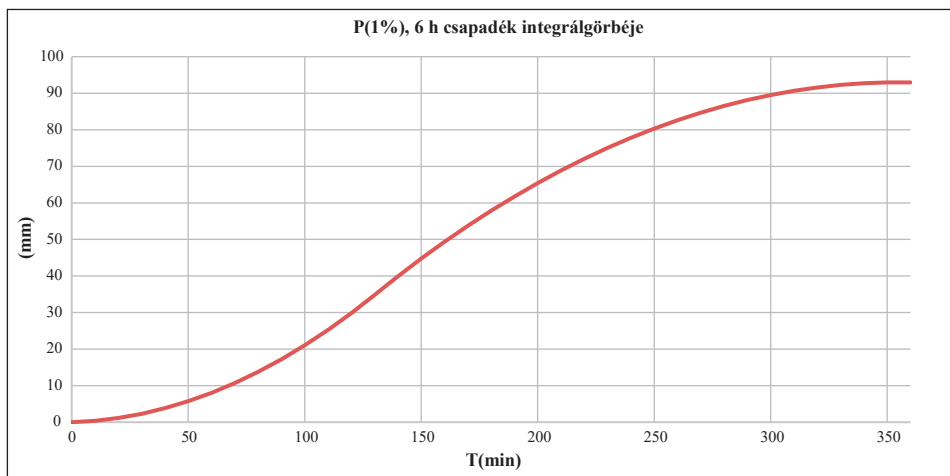
¹⁰ CÁNOVAS et al. 2011: 970–979.

¹¹ HUANG et al. 2015: 1203–1218.

¹² ÁMON–BENE 2019: 67.

Peremfeltétel

A bemeneti peremfeltétel mindkét modell esetében megegyezik, azaz a csapadékmaximum függvények által meghatározható, $p = 1\%$ relatív gyakoriságú, 6 óra időtartamú csapadék-esemény (5. ábra).



5. ábra: 1% relatív gyakoriságú, 6 órás csapadék integrálgörbéje

Forrás: e-UT 03.07.12. alapján

A hidrodinamikai modell kifolyási peremfeltétele az energiavonal esésével volt reprezentálható. Ebben az esetben az energiavonal esése közelíthető a kifolyási perem környezetében a terep esésével, amely értéke 7‰.

Kezdeti feltételként a hidrodinamikai modellnél, illetve a torzítatlan hidrológiai modellnél száraz rendszert feltételeztünk. A teljes hidrológiai modell esetében a futtatások során kiderült, hogy a modell mérsékelten érzékeny a kezdeti feltételekre, azaz a teljes vízgyűjtő kalibrációjánál, a 2010. májusi események előzményeként felhasznált április végi állapotok minimálisan befolyásolták mind a végeredményt, mind az érzékenységet.

Modellek kalibrálása

A vízgyűjtő feltáratlan hidrológiai értelemben. Terepmodellt topográfiai térképi adatok vektorizálásával lehetett létrehozni, amelyből raszteres digitális terepmodell (DTM) alakult ki.

Hidrológiai modell

Az összegyülekezés és a tározás időtartamát a Clark-egységárhullám-modell paraméterezéséhez a terepmodell alapján számítottuk, amelyet regressziós egyenletekkel ellenőriztünk.

A vízgyűjtőterület (A), átlagos terepesés (S), le hosszabb lefolyási hossz (L) paraméterek függvényében a szakirodalom több eltérő összefüggést ismer,¹³ jó illeszkedésű regressziós egyenleteket javasolt nagyobb kiterjedésű vízgyűjtőkön, de a felületmodell alapján számolt összegyülekezés és becsült tározási együttható értékét mégis az alábbi egyenlet közelítette meg megfelelően:¹⁴

$$t_c = 1,54 \cdot L^{0,875} \cdot S^{-0,181}; R = 16,4 \cdot L^{0,342} \cdot S^{-0,79} \quad (5)$$

A fenti egyenletek egyértelműen nem terjeszthetők ki minden vízgyűjtőre. Megbízható értékeket az összegyülekezési idő és a tározási paraméter meghatározására akkor lehetne kapni, ha a modell időlépéseiben keletkező paraméterhibák hatását külön-külön értékeljük. Ezzel betekintést lehet nyerni a Clark-együtthatók viselkedésébe, és pontosabban lehetne meghatározni az összegyülekezés és tározás értékeit.¹⁵

A növényzet, és főleg a talaj viszonylatában kevesebb adat állt rendelkezésre, ezért a további bizonytalanságokat okozó változók kiküszöbölésére csak összevont paraméterezésű modell építésében lehetett gondolkodni. Ennek megfelelően a talaj vízmészítő hatását talajtípustól és a vízgyűjtő esésétől függő súlyozott átlagolással osztottuk szét a vízgyűjtő területen.

Hidrodinamikai modell

A modell kalibrálásánál tagoltabb paraméterezést alkalmaztunk a területhasználati térkép által megadott eloszlás szerint. A kalibrációs paraméter a felület érdességét leíró n paraméter. Fontos megjegyezni, hogy a csapadék keltette lefolyás esetében a vízmozgás a felszínen lefelszerű, tehát az általánosan mederbeli lefolyásnál alkalmazott érdességi értékekhez képest a felületi egyenetlenség okozta súrlódás sokkal nagyobb hatást gyakorol az áramlásra, ezért az értékek nagyságrendileg változnak a lefelszerű áramlás vizsgálatakor. Ezen változás meghatározására egzakt módszer jelenleg nem fellelhető, a modellkísérletben a hidrodinamikai modell kalibrálását indirekt módon, a hidrológiai modell kifolyási szelvényében számított idősorhoz igazítottuk. Tájékoztató jelleggel (1. táblázat) az egyes felületekhez tartozó érdekességeket nagyvízi mederbeli vízmozgás és csapadék keltette lefelszerű lefolyás esetén összefoglaltuk.

1. táblázat: Felületi érdességek természetes felületeken nagyvízi árhullám és csapadék keltette lefelszerű lefolyás esetén

	n	
	Nagyvíz	Csapadék
Vízmosás, természetes meder	0,045	0,1125
Ritkás fás terület	0,08	0,6375
Erős bozótos	0,08	0,6375
Erdő	0,12	0,9
Szántó	0,06	0,7031

Forrás: a szerzők szerkesztése

¹³ OSMAN-ABUSTAN 2011: 126-141.

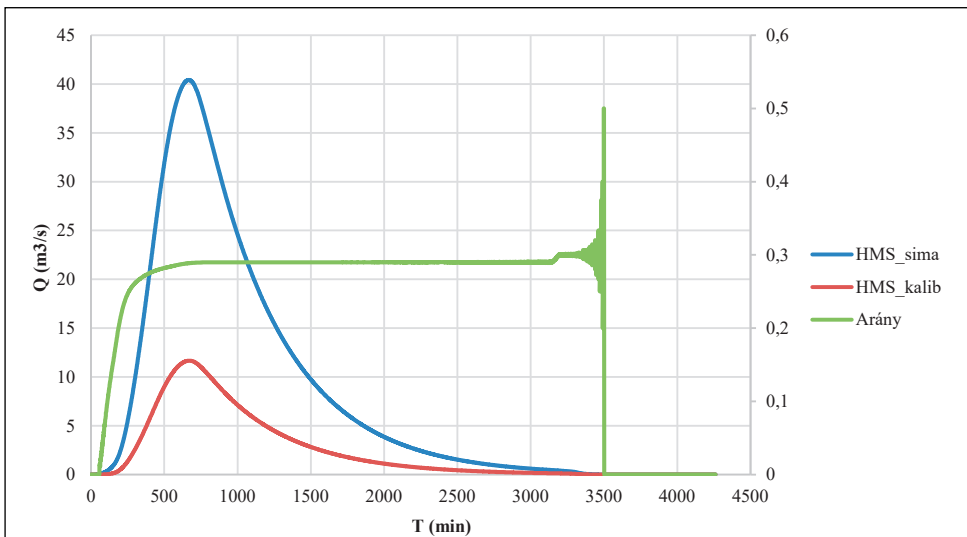
¹⁴ FELDMAN 2000.

¹⁵ MÁTYÁS-BENE 2018: 175-186; ALSILIBE-BENE 2021: 88-93.

A hidrodinamikai modell kalibrációját első lépésben a hidrológiai modell veszteség nélküli eredményei alapján kalibráltuk, amelyek n értékei az 1. táblázat 2. oszlopában láthatók. Összehasonlítva a mederbeli lefolyás és a csapadék keltette felszíni lefolyás n értékeit, nagyságrendi eltérés tapasztalható.

A hidrológiai modell kiértékelése

A kalibrált vízgyűjtőmodell megfelelő árhullámképet ad, amelyhez hozzácsatoltuk a redukálatlan árhullámot, azaz a Clark-féle transzformációs paraméter kivételével mindent kivettünk a modellből. Erre azért van szükség, hogy látható legyen a terepi adottságok és a talaj redukáló hatása a hidrodinamikai modell peremfeltételének meghatározásához (6. ábra).



6. ábra: Kalibrált és veszteségmentes kifolyásvízhozam-idősorok – hidrológiai modellfuttatások eredményei a hidrológiai modellből

Forrás: a szerzők szerkesztése

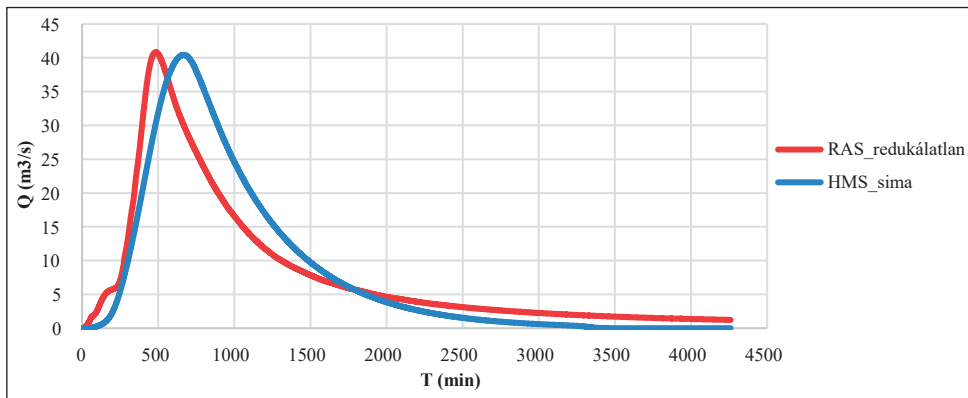
A valós és a veszteségmentes idősor között a különbségek trendjéből az $\alpha = 0,288$ redukációs tényező állapítható meg.

A hidrodinamikai modell kiértékelése

A redukációs tényező hatásának bemutatása

Az első szakasz hidrodinamikai modell eredményeit összevetve a redukálatlan hidrológiai modell kimeneti idősorával láthatóan jó illeszkedést mutat, a tetőzési idő esetében van némi

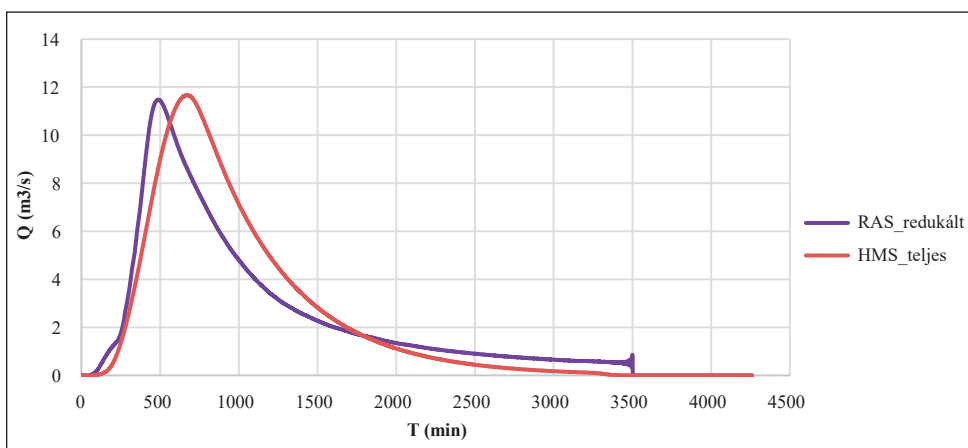
eltérés, de a csúcshozam illeszkedése megfelelő, az apadó ágak eltérései a villámár tetőzése szempontjából elhanyagolhatók (7. ábra).



7. ábra: Vesztégmentes hidrológiai modell és redukálatlan hidrodinamikai modell számított kifolyásvízhozam-idősor eredményeinek összehasonlítása

Forrás: a szerző szerkesztése

A modellezés második szakaszában bevezetve a hidrodinamikai modell kifolyási idősorán az α redukációs tényezőt, az illeszkedés a valós kilépő vízhozamnál is megfelelő (8. ábra). Az árhullámcsúcs értékében számottevő különbség a teljes hidrológiai modell és a redukált eredményű hidrodinamikai modell között nem jelentős, az időbeli eltérés pedig változatlan a redukálatlan modellhez képest.

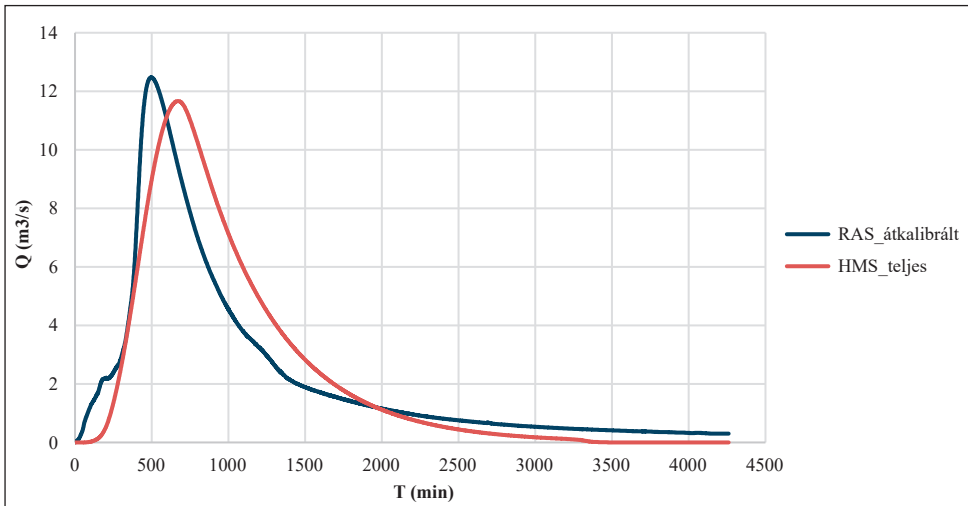


8. ábra: Teljes hidrológiai modell és redukációs tényezővel torzított hidrodinamikai modell számított kifolyásvízhozam-idősor eredményeinek összehasonlítása

Forrás: a szerző szerkesztése

Hidrodinamikai modell futtatása redukált csapadékmennyiséggel

A modellezés következő lépésében a bemeneti peremfeltételt, azaz a teljes modelltre kiterjesztett, egyenletesen eloszló csapadékidősört redukáltuk a redukációs tényezővel. A modellt a módosított bemeneti peremfeltételhez újra kellett kalibrálni. Összehasonlítottuk a teljes hidrológiai modell és a redukált csapadék alapján kalibrált hidrodinamikai modell kimeneti idősorait (9. ábra).



9. ábra: Teljes hidrológiai modell és az átkalibrált hidrodinamikai modell számított kifolyási vízhozam idősorainak összehasonlítása

Forrás: a szerzők szerkesztése

A tetőzés időpontja szempontjából az eltérés hasonló a korábbi eredményekhez, az árhlámcsúcs tekintetében az újonnan kalibrált hidrodinamikai modell némileg magasabb tetöző hozamot produkál. A 2. táblázat 1. oszlopa mutatja a redukálatlan csapadékidősorhoz tartozó kalibrált értékeket, a 2. pedig a redukált csapadékidősorhoz készített kalibráció értékeit.

2. táblázat: Az n érték változása különböző területhasználatok esetén a redukációs tényező bevezetésének hatására

	n	
	Csapadék	Csapadék_red
Vízmosás, természetes meder	0,1125	0,0422
Ritkás, fás terület	0,6375	0,1195
Erős bozótos	0,6375	0,1195
Erdő	0,9	0,1688
Szántó	0,5625	0,1055

Forrás: a szerzők szerkesztése

A redukció kisebb n értékeket eredményezett. További vizsgálatokat igényel az n érték csökkenési okának meghatározása, azaz milyen mértékben okoz problémát a terület geometriája, vízmegállásos helyek mértéke, eloszlása. Jól látható, hogy a kis- és nagyvízi kalibrációk között az eltérések nagyságrendiek, ezért n értékével kapcsolatban további kutatások szükségesek kisvízi esetekben.

Érzékenységvizsgálatok

A villámárvizek szempontjából fontos, hogy a feltáratlan vízgyűjtőn az aktuális állapot (talaj telítettsége, területhasználat változása, csapadékesemény évszakos eloszlása stb.) terhelhető bizonytalanságokkal, amelyek vízgyűjtőnként változnak, tehát az időelőny és a mennyiség szempontjából befolyásoló szerepük lehet.

A hidrológiai modell bizonytalanságelemzései

A hidrológiai modell esetében Monte Carlo-szimulációt alkalmaztunk, normál eloszlást feltételezve. Minden paraméter esetében a kalibrálthoz képest $\pm 25\%$ -ot mozdítottunk ki, minden paraméterre 1000 különböző szimulációt futtattunk le, az összegyűlekezés ideje (T), a tározási paraméter (K), a talaj kezdeti telítettségi foka (IS), a beszivárgás sebessége (k), valamint a vízzáróság aránya (IMP) leíró paramétereire, az intervallumokon egyenletes eloszlás szerint az alábbi értékekkel (3. táblázat). A szórást a minimum- és maximumértékek alapján határoztuk meg. A minimum- (Min) és maximum- (Max) értékek a kalibrált értékekhez képest $\pm 25\%$ -kal vannak kimozdítva a bizonytalanságvizsgálatban, mindegyik paraméter esetén.

3. táblázat: Bizonytalanságvizsgálat kimozdított értékei és szórásuk

	T (h)	K (h)	IS (mm)	k (mm/h)	IMP
Max	8,75	11,25	40	1,62	37,5
Min	5,75	6,75	10	0,54	22,5
μ	7	9	25	1,08	30

Forrás: a szerzők szerkesztése

A bizonytalansági futtatások során adódó eredmények szerint a beszivárgás sebességének (k) és a kezdeti telítettségnek (IS) nem volt számottevő hatása annak ellenére, hogy a talajvíz a területen nem jellemző, illetve a vízgyűjtőt majdnem teljesen jó vízemésztő képességű, löszös talaj borítja. A többi Monte Carlo-futtatás eredményét a 4. táblázatban foglaltuk össze, ahol a „közép” jelenti a kalibrált értékhez tartozó vízhozamcsúcsot és tetőzési időpontot, a „max” az intervallum maximális értékéből, a „min” a minimális értékéből származó vízhozamcsúcsot és tetőzési időpontot.

4. táblázat: Paraméterértékek kimozdításának hatására kialakuló eltérések a számított közép-, nagy és kis vízhozamban, valamint az összegyülekezési időben 1000 modellfuttatás után

	$Q_{\text{közép}}$ (m ³ /s)	Q_{max} (m ³ /s)	Eltérés	Q_{min} (m ³ /s)	Eltérés	$T_{\text{közép}}$ (h)	T_{max} (h)	Eltérés	T_{min} (h)	Eltérés
T	12,2	12,98	6,39%	11,59	5,00%	9,67	8,57	11,41%	10,33	6,86%
K	11,73	13,8	17,65%	10,1	13,90%	11	10,82	1,67%	11,33	3,03%
IMP	11,67	14,55	24,68%	8,75	25,02%	10,17	11,17	9,84%	11,17	9,84%

Forrás: a szerzők szerkesztése

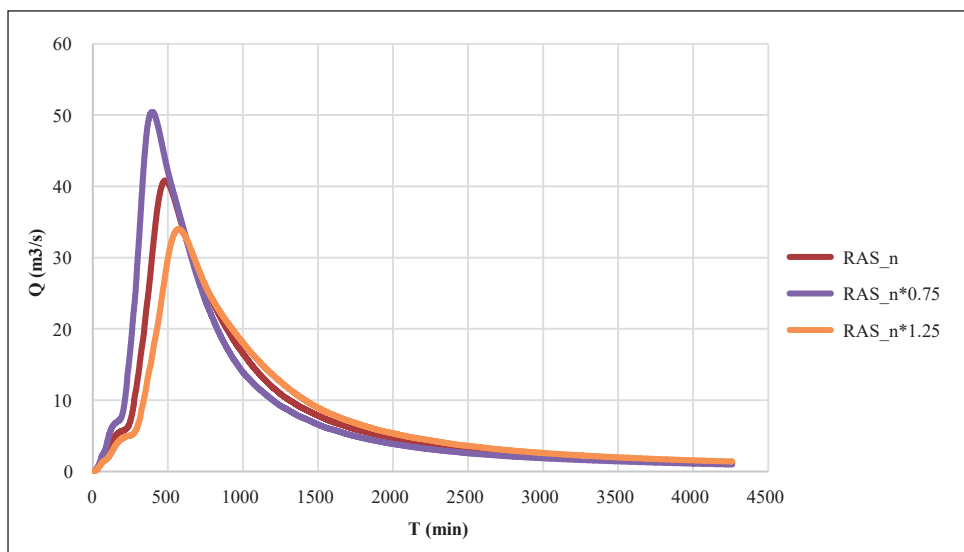
Összegyülekezési idő (T) esetében villámárvíz szempontjából sem a tetőzéssel szembeni időelőny változása, sem a maximális vízhozamnál jelentős változás nem tapasztalható (maximum 10% körüli az eltérés). A tározási együttható (K) változása is érdemben mennyiségi változást okoz (a csúcsok közti eltérés eléri a 17%-ot), az időbeli eltérés elhanyagolható. Ezen eltérések mértéke 1%-os relatív gyakoriságú csapadék esetén egy jól kiépített elvezető rendszeren nem szabad, hogy gondot jelentsen. Ugyanakkor a vízzáróság arányára (IMP) meglepően érzékenyen reagál a modell, vízhozam szempontjából az eltérés megegyezik a paraméter kimozdításának mértékével (~25%).

Az eredmény azzal is magyarázható, hogy összevont paraméterezésű modell esetében, nagy esésű, talaj szempontjából homogén, területhasználat szempontjából mérsékelt differenciált területen, a legérzékeny paraméter önmagában képes reprezentálni a vízgyűjtő érzékenységet.

A vízzáróság arányát kifejező paraméter (IMP), amely jelen esetben nem a klasszikus értelemben vett vízzáró felületeket (kőzet, burkolat stb.) foglalja magában. Jelen esetben a nagy intenzitású árhullám kialakulásakor azokat a paramétereket is, amelyeknek a gyorsan kialakuló felszíni lefolyásra nem tudnak hatást kifejteni. Ezek jellemzően a vízborított vagy vízmegállásos területek eloszlása és telítettsége, a növényzet fedettségének eloszlása és tározókapacitása, illetve a talaj vízemésztő képessége és kezdeti telítettsége.

A hidrodinamikai modell érzékenységvizsgálata

A hidrodinamikai modell esetében reprezentatív eredményt a redukátlan bemenő idősorhoz készített kalibráció ad (10. ábra). Látható, hogy az érzékenység hasonló az n együttható $\pm 25\%$ -os kimozdítására pozitív és negatív irányban egyaránt. Az illeszkedés hozam szempontjából megfelelő, időelőny tekintetében némileg szélesebb intervallumot mutat a hidrológiai modellhez képest.



10. ábra: Hidrodinamikai modell érzékenységvizsgálatának kiértékelése a kifolyási perem számított vízhozam idősorainak felhasználásával, n paraméter 25%-os kimozdítására

Forrás: a szerzők szerkesztése

Ugyanakkor a 25%-os változás, lepletszerű vízmozgás esetén – tekintve, hogy ilyen nagy csapadékokra téli, fagyott időszakban, amikor az érdeesség jóval kisebb, nem kell számítani –, megfelelően lefedi a vízgyűjtő természetes állapotának változásait. Megművelt vízgyűjtők esetében természetesen az évszakos állapotoknak megfelelően kell a modellt átkalibrálni. Ebben az esetben az érdeességi paraméter nemcsak közvetlen a felülettel való fizikai kapcsolat leírására alkalmas, hanem bizonytalanságából látszik a redukált csapadékmennyiség alapján, hogy következtetni lehet a vízgyűjtő aktuális telítettségi állapotára, vízmegállásos helyek hatására, abban az esetben, amikor mértékadó kezdeti feltétel nem áll rendelkezésre a kalibrált modell futtatásához.

Következtetések

A fenti vizsgálatok alapján természetes, nagy esésű, feltáratlan vízgyűjtő esetén az alábbi következtetések vonhatók le:

- A modellvizsgálatok alapján kimondható, hogy az egyes érzékeny paraméterek között a különböző modelleknél kapcsolat állapítható meg. Jelen esetben a hidrológiai modell alapján meghatározott lefolyást befolyásoló redukációs tényező, amely a hidrodinamikai modellnél a bemeneti peremfeltétel redukáló tényezőjeként jelenik meg. A lehetséges összefüggések vizsgálatához további kutatás szükséges.

- A vízgyűjtő megfelelően vizsgálható összevont paraméterezésű modellel a villámárvíz kázattal szemben akkor is, ha csekélyebb mennyiségű adat (legalább geometriai adatok, kis felbontású talaj- és területhasználati térképek, legalább egy relatív gyakorisághoz tartozó mérési vagy statisztikai/analitikus alapon meghatározott vízhozamérték mint kontrolladat) áll rendelkezésre.
- A hidrodinamikai modell jó kiegészítése a hidrológiai modellnek, amennyiben egy megfelelő felbontású (például teljes mérettől függően 10–50 m-es osztású) rácsháló felépíthető. A hidrodinamikai modell pontosabb képet ad a lefolyásviszonyokról és a vízmegállásos területekről. Viszont a hidrológiai modell segítségével a kalibráció folyamatos visszaellenőrzése lehetséges.
- Bizonytalanság szempontjából nagy mértékű paraméterkimozdítás (25%) esetén az időelőny befolyásolása nem jelentős, azonban vízhozam szempontjából a vízzáróság arányának vizsgálatakor a bizonytalanság jelentősebb, tehát a modell tetőző vízhozammal szembeni érzékenységét egyértelműen reprezentálja.
- Az összevont paraméterezésből hidrológiai modellben, villámárvíz esetén, a legérzékenyebb paraméter segítségével lehet jellemezni a vízgyűjtő viselkedését. A vizsgált vízgyűjtő esetében a vízzárósági hányad eredményezte a legnagyobb bizonytalanságot. Ez azzal magyarázható, hogy a gyors összegyülekezés és lefolyás esetén nemcsak a fizikailag vízzáró felületek, hanem az időben lassabban felépülő veszteségek a vízzáróságot növelik.

Felhasznált irodalom

- ALSILIBE, Firas – BENE, Katalin (2021): Watershed Subdivision and Weather Input Effect on Streamflow Simulation Using SWAT Model. *Pollack Periodica: An International Journal for Engineering and Information Sciences*, 17(1), 88–93. Online: <https://doi.org/10.1556/606.2021.00349>
- ÁMON Gergely (2016): *Az Aszalvölgyi-csatorna mértékadó árvízi hozamának becslése a torkolatának rendezéséhez*. Szakmérnöki diplomamunka. Budapest: BME
- ÁMON, Gergely – BENE, Katalin (2019): *Adaptive Data Parameterization of Baseflow and Flashflood Models of an Ungaged Watershed*. 15th Miklos Ivanyi International PhD-DLA Symposium, Pecs, Hungary, October 28–29., Paper no. P-67.
- ÁMON, Gergely – BENE, Katalin (2022): *Impact of Hydrological, Hydraulic Modelling Approach to a Flash Flood Event in the Hidegvíz Watershed in Hungary*. Bécs, Hydrocarpath Conference, 2022. november 24.
- BRUNNER, Gary W. (2016): *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, California. Online: www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/latest/theoretical-basis-for-one-dimensional-and-two-dimensional-hydrodynamic-calculations/2d-unsteady-flow-hydrodynamics
- CÁNOVAS, J. A. B. et al. (2011): Estimating Flash-Flood Discharge in an Ungauged Mountain Catchment with 2D Hydraulic Models and Dendrogeomorphic Palaeostage Indicators. *Hydrological Processes*, 25(6), 970–979. Online: <https://doi.org/10.1002/hyp.7888>
- FELDMAN, Arlen D. (2000): *Hydrologic Modelling system HEC-HMS. Technical Reference Manual*. Online: www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm
- HAPUARACHCHI, H. A. Prasantha et al. (2011): A Review of Advances in Flash-Flood Forecasting. *Hydrological Processes*, 25(18), 2771–2784. Online: <https://doi.org/10.1002/hyp.8040>

- HUANG, Wei et al. (2015): Full 2D Hydrodynamic Modelling of Rainfall-induced Flash Floods. *Journal of Mountain Science*, 12(5), 1203–1218. Online: <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3466-1>
- MÁTYÁS, Kevin – BENE, Katalin (2018): Using Numerical Modeling Error Analysis Methods to Indicate Changes in a Watershed. *Pollack Periodica: An International Journal for Engineering and Information Sciences*, 13(3), 175–186. Online: <https://doi.org/10.1556/606.2018.13.3.17>
- OSMAN, Sazali – ABUSTAN, Ismail (2011): Estimating the Clark Instantaneous Unit Hydrograph Parameters for Selected Gauged Catchments in the West Coast of Peninsular Malaysia. *ASEAN Engineering Journal Part C*, 1(3), 126–141.
- SZILÁGYI, József (2018): On the Clark Unit Hydrograph Model of HEC-HMS. *Periodica Polytechnica, Civil Engineering*, 62(1), 277–279. Online: <https://doi.org/10.3311/PPci.11141>