

NUMERIKUS MODELLEZÉS LEHETŐSÉGEI AZ ORFŰI-TÖRENDSZER PÉLDÁJÁN

NAGY GÁBOR – RONCZYK LEVENTE – CZIGÁNY SZABOLCS

NUMERICAL MODELING POSSIBILITY
IN CASE OF LACK OF DATA THE EXAMPLE OF THE ORFŰ LAKE SYSTEM

Abstract

Torrential rainfalls may increase the risk of overflow of lakes and lake systems. Prevention and mitigation activities may be eased by the use of numeric models; nonetheless, often there is insufficient measured data available for the parameterization of the models. In the example of the Orfű Lake System in South Western Hungary we analyzed the impact of infiltration, time of concentration, and antecedent soil moisture content on the behavior of the water budget in the model developed for the four lakes. We also calibrated the model by comparing the simulated data with measured data for three selected rainfall events in 2014. When the period between January 1 and November 30, 2014 was modeled, with multiple flood waves, our results indicated only partial correspondence, and no influence of antecedent soil moisture content between the measured and simulated data for Pécs Lake. However, when single flood waves were simulated, then simulated data indicated high correlation with the measured data for the scenarios run with low and medium antecedent soil moisture contents. To improve stage forecasting efficiency, elaboration of a monitoring system providing data of sufficient spatial and temporal resolution is required in order to avoid the garbage in garbage out (GIGO effect) in the models.

Keywords: HEC-HMS; Clark Unit Hydrograph; Orfű Lakes; model verification; heavy rainfall

Bevezetés

A Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (2008) szerint gyakoribbá válnak az időjárási szélsőségek, növekedni fog mind tartósságuk, mind pedig intenzitásuk, mint ez az utóbbi évtizedek során tapasztalható volt (BARTHOLY J. et al. 2010). Az éghajlatváltozás hatására a téli árhullámok gyakorisága megnő, míg a hóolvadásból származó tavaszi árhullámok korábban jelentkeznek a gyorsabb olvadás miatt (NOVÁKY B. et al. [szerk.] 2011). Következésképpen a klímaváltozás felveti annak szükségességét, hogy megértsük a vízfolyások és a törendszerek működését, valamint modellezésük lehetőségeit, különös tekintettel az extrém időjárási helyzetekre.

A hidrológia már régóta próbálja számítógépes modellekkel leképezni a megfigyelt folyamatokat (KIRKBY, M. J. et al. 1987). Az utóbbi 20 évben a számolási kapacitás és a számítástechnika fejlődésével párhuzamosan egyre több szoftver jelent meg, amelyek segítségével a teljes hidrológiai ciklus (LAHLOU, M. et al. 1998), vagy az egyes részfolyamatok váltak modellezhetővé, reprodukálhatóvá (SINGH, V. P. – FREVERT, D. K. 2013).

A HEC-HMS (HEC Hydrologic Modeling System, US Corps of Engineers, Davies, CA) (HEC-HMS 2013) program képes modellezni a csapadéklefolyási folyamatokat és a hidrológiai ciklus egyes elemeit is a vízgyűjtő rendszerekben, valamint széleskörűen alkalmazható különböző hidrológiai problémák megoldására. Ilyen problémák közé tartoznak a nagy vízgyűjtők vízellátási és árvíz-előrejelzési lehetőségei, illetve a kisvárosi és természetes vízgyűjtők lefolyásának modellezése múlt- és jövőbeli lehetséges környezeti paraméterek alapján (STRAUB, T. D. et al. 2000).

A HEC-HMS-t számos kutató használta a vízfolyások lehetséges jövőbeli hidrológiai forgatókönyveinek vizsgálatára. A modell futtatásai során több szerző is azt tapasztalta,

hogy a földhasználat változása jelentős hatással van a vízgyűjtők hidrológiai folyamataira, a beépítettség és a földhasználat változásával nő az árhullám nagysága, valamint rövidül a lefolyás és az összegyűlekezés időtartama (CHEN, Y. et al. 2009). A múltbeli időjárási események árhullámai gyakran szignifikáns különbséget mutatnak a jelen állapot alapján modellezettekhez képest, ami a felszínhasználat változásával hozható összefüggésbe (ALI, M. et al. 2010). A városi és az impermeábilis felületek növekedésével a gyors válaszüdejű árvizek száma nő, lineáris kapcsolat van a betonnal borított felszínnek nagysága és a kis-árvizek száma között (DU, J. et al. 2012).

A klímaváltozás hatással lehet a lefolyásra is (CANDELLA, L. et al. 2012; KLUG, H. – OANA, L. 2015); egyes szerzők szerint a melegedéssel párhuzamosan a hidrológiai ciklus is egyre intenzívebbé válik (BARTHOLY J. et al. 2011). Éghajlati scenáriók azonban a Kárpát-medence szárazabbá válását is előrevetítik (BARTHOLY J. et al. 2005). A legtöbb nemzetközi irodalmi forrás, illetve az IPCC (2007, 2013) beszámolója alapján azonban az extrém események időbeli gyakorisága nő (BARTHOLY J. et al. 2011). Ennek ellentmondani látszik több, a Mecsek környékére, illetve Magyarországra vonatkozó éghajlati megfigyelés (BÖTKÖS, T. 2006; PIRKHOFFER, E. et al. 2009).

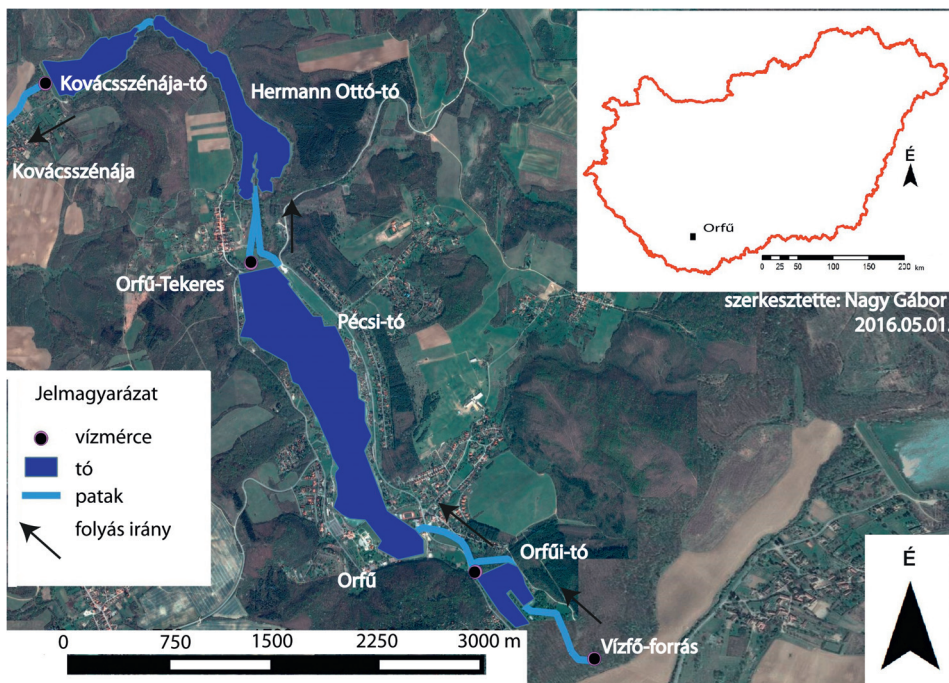
Árhullámok tavakon történő előrejelzéséről eddig nagyon kevés tanulmány készült, s ezek is általában egyetlen tó-vízgyűjtő rendszerre készültek. NIEDDA, M. és munkatársai (2014) a Saturated Subsurface Flow Routing (SSFR) modell alapján, egy Szardínia szigetén található tó esetében azt tapasztalták, hogy a tó vízszintjét elsősorban a köztes lefolyás (*interflow*) szabályozta. Több szerző, domborzati modellek hiányában, csak egyszerű modellekre támaszkodott (WESTOBY, M. J. et al. 2014). Az ausztriai Mondsee-tavon (Salzkammergut) 2014 októberében, AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment Tool) modellel végzett szimulációk során a szerzők azt tapasztalták, hogy a modell képes volt reprodukálni a jelentős árhullámokat, pontos tetőzőárhullám-előrejelzés azonban nem volt lehetséges (KLUG, H. – OANA, L. 2015). A hosszú távú hidrológiai hatásvizsgálati (L-THIA) modellt alkalmazták az Észak-Indiana területén fekvő Maxinkuckee-tó vizsgálatok, ahol három földhasználati adathalmazt alkalmaztak a parametrizáció során (1951, 1972 és 1997), négy földhasználati scenárió lefuttatására. Mind a négy scenárió esetében azt tapasztalták, hogy a tó hosszú távú átlagos és maximális szintje enyhén emelkedett és növekedett a lefolyás is az urbanizáció miatt (ENGEL, B. A. et al. 2015). Tavak – mint összetett ökológiai rendszerek – esetében a multi-skálás elemzés és a Synthetic Aperture Radar (SAR) segítségével végzett monitoring is javasolt a változások nyomon követésére (POLITI, E. et al. 2016).

Vizsgálatunk célja a 2014. év csapadékadatai alapján a felszíni lefolyás és a jelentősebb árhullámok modellezése és reprodukálása a HEC-HMS szoftver használatával, a tórendszer pontos keresztmetszelvevényeinek és mélységadatainak ismerete nélkül. A vizsgálatokat a 2014. január 1. és november 30. közötti időszakra, valamint a jelentősebb egység-árhullámokra is elvégeztük. Kutatásunkkal arra is rá kívántunk mutatni, hogy a rendelkezésre álló korszerű hidrológiai szoftverek és a vízügyi szervezetek által gyűjtött adatok kompatibilitásának megteremtése az ágazat fejlődésének kulcskérdése.

Eszközök és módszerek

A vizsgált terület

A vizsgált terület, az Orfűi-tórendszer a Mecsek É-i lábánál, Pécs-től megközelítőleg 18 km-re ÉNy-ra helyezkedik el (*1. ábra*). A mintegy 5 km hosszú tórendszert négy tó alkotja: Orfűi-, Pécsi-, Herman Ottó-, Kovácsszénája-tó (*1. táblázat*).



1. ábra Az Orfűi-tórendszeren elhelyezett vízmércék (fekete pontok) (RONCZYK L.)
 Figure 1 Water level and flow gages on the Orfű lake system (RONCZYK, L.)

1. táblázat – Table 1

Az Orfűi-tórendszer tavainak és vízgyűjtőinek területe
 (a DDVIZIG adatai alapján NAGY G.)
 The area of the lakes in the Orfű lake system and their catchment areas
 (NAGY, G. based on DDVIZIG data)

A tó neve	Területe (üzemvíz-szinten), ha	A tóhoz tartozó vízgyűjtő terület, km ²
Orfűi-tó	10	22,2
Pécsi-tó	71	9,6
Herman Ottó-tó	29	5,8
Kovácsszénája-tó	15,5	2,2

A tórendszer fő táplálója az Orfűi-patak, amely a Vízfő-forrásból ered. A tavak kis kiterjedésű, önálló vízgyűjtő területtel is rendelkeznek (1. táblázat), innét is kapnak vizet, bár ez közel sem olyan jelentős, mint a forrásból származó vízmennyiség. A vízellátást karsztos vízgyűjtő terület biztosítja, 4,5 millió m³/éves vízhozammal. Az Orfűi-patak átlagos vízhozama 0,1 m³/sec. A tórendszerre jellemző, hogy az üzemvízszint felett ~ +50 cm vízoszlopot képes még biztonságosan tározni. A modell felépítése során, az egyszerűsítés miatt, illetve a modell lefutása érdekében, minden egyes tó a modellben üzemvízszintről indul, referencia-értékként ezt állítottuk „0” értéknek.

A monitoring rendszer jellemzői

Orfű térségében a Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság három hidrometeorológiai állomása található, Sásd, Bükkösd és Orfű-Tekeres településeken, ahol módosított *Hellmann-(Oláh–Csomor-)* féle csapadékgyűjtő berendezésekkel manuális adatgyűjtést végeznek. Mivel csak napi csapadékösszeg-adatok álltak rendelkezésre, a csapadékintenzitás és az összegyülekezési idő között függvényyszerű összefüggést nem tudtunk előállítani. A modellfuttatások mintaévének a 2014. évet választottuk, ebben az évben január 1. és november 30. között 851 mm csapadék hullott az orfű-tekeresi mérőállomáson.

Folyamatos vízállásmérések három tó, az Orfűi-, a Pécsi és a Kovácsszénája-tó kifolyási pontján történnek, Dataqua DA-S-LTRC 130 adatgyűjtővel. Folyamatos adatsorokat a Pécsi-tó kifolyási pontjára a Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság biztosított számunkra, azonban a másik két tó adatsorához műszaki okokból nem fértünk hozzá.

Null-hipotézisek

A modell felépítése és a szimuláció futtatása során az alábbi null-hipotéziseket és peremfeltételeket alkalmaztuk a modell egyszerűsítése végett. A modellben, az Orfűi-tórendszer teljes vízgyűjtőjén, ugyanaz a csapadékmennyiség hullott. Ehhez az Orfű-Tekeres állomáson mért csapadék-idősort tekintettük mérvadónak, s ezt használtuk minden modellfuttatás során. A csapadék lejutása a részvízgyűjtőkről a hozzájuk tartozó tavakhoz azonos időt vett igénybe, ami az összegyülekezési idő 60%-a volt. Az időbeli késleltetés kiszámításához WANIELISTA, M. P. és munkatársai (1997) az alábbi egyszerű tapasztalati összefüggést ajánlják:

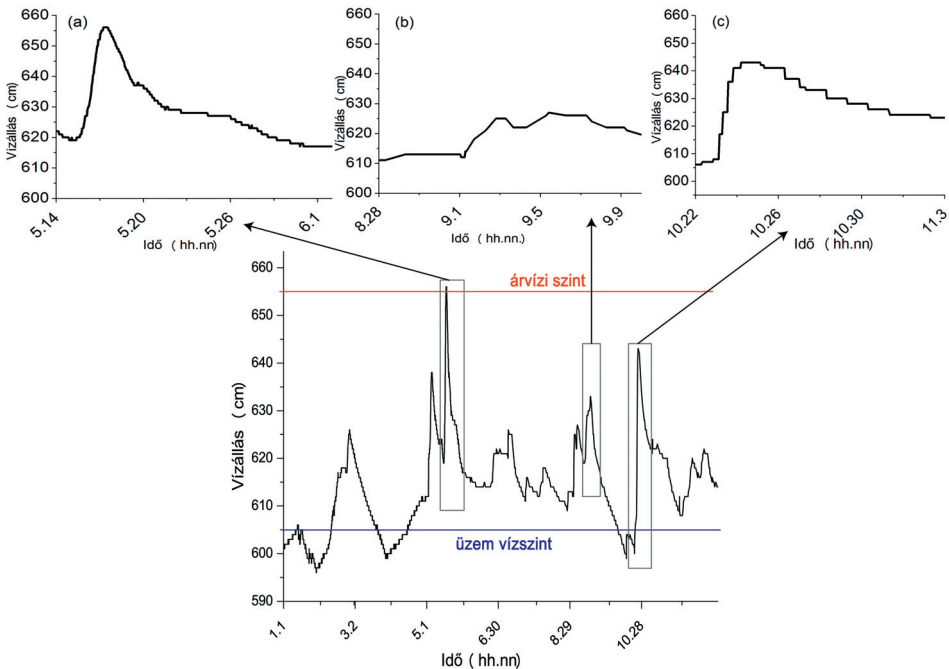
$$t_{\text{lag}} = 0,6 \cdot t_c,$$

ahol t_{lag} az átfolyási idő, t_c pedig az összegyülekezési idő.

A tavak közötti összeköttetést csak az Orfű-patak biztosítja, ezért az árhullám azon is végigvonul. A tavak vízállását üzemvíz-szinten levőnek tekintettük, ezért nincs be- és kifolyás a modellezés kezdetén az egyes tavakból. A modellben a tavaknak nincs párolgásból eredő veszteségük, a levegőt vízgőzzel telítettnek tekintettük, a part menti és mederperemi üledékek pórusai évtizedek alatt kolmatálódtak, eltömődtek, ezért a beszivárgásból eredő veszteséget nem vettük figyelembe. A vízszintet csak a be- és kifolyó vízhozam szabályozza, s ezek mennyisége azonos (STELCZER K. 2000). A tórendszer védművei, zsilipjei és árapasztói tökéletesen, a tervezéskori üzemgörbéik szerint működtek a modellben.

A modellezett időszakok

A futtatások alapján három jellemző időszakot különítettünk el a talaj víztelítettségét illetően (száraz $\Theta_v = 0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; átmeneti $\Theta_v = 0,40$ és nedves $\Theta_v = 0,49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). A modellezéshez a májusi, az augusztusi és az októberi csapadékeseményeket választottuk ki, ennek oka az volt, hogy a futtatások során nem lehetett árhullámot kimutatni az üzemvízszint alatt mért vízállásoknál, csak a feltöltődést követően, miközben a modell több kisebb árhullámot is jelzett (2. ábra). A száraz időszaknak a 2014. május 14. és június 3. közötti időszakot választottuk a futtatások intervallumául, ez időszak alatt a részvízgyűjtők területére 74,3 mm csapadék hullott. A nedves időszaknak a 2014. október 21. és november 2. közötti időszakot választottuk, mivel a 2014. évnek ez a szakasza kifejezetten csapadékos volt. A vizsgált időszakban 76 mm csapadék hullott, míg az azt megelőző héten 30 mm csapadékot regisztráltak a mérőműszerek, amely jelentősen előnedvesítette a talajt.



2. ábra HEC-HMS modellfuttatásokhoz kiválasztott egység- és egyedi árhullámok (NAGY G. és CZIGÁNY SZ.).
 – a – száraz; b – átmeneti; c – nedves időszakok

Figure 2 Selected single flood waves (unit hydrographs) for the HEC-HMS simulations (NAGY, G. and CZIGÁNY, Sz.).
 – a – dry; b – medium; c – wet periods

Modell-parametrizáció

A modellfuttatások során az összegyülekezési idő, a tározási koefficiens és a végső beszivárgási sebesség hatását vizsgáltuk a négy tó vízszintjére. Az összegyülekezési idő (*time of concentration*) és a tározási együttható (*storage coefficient*) hatásának megállapításához a GRAF, J. B. et al. (1982) összefüggését használtuk fel, akik a két paraméter arányát az Illinois állam területén levő vízfolyásokra és vízgyűjtőkre az alábbi összefüggéssel határozták meg:

$$R/(R + t_c),$$

ahol R a tározási együttható, t_c az összegyülekezési idő. *Eredményeik* alapján a szerzők azt tapasztalták, hogy a gyakorlatban a dimenzió nélküli hányados értéke $0,3–0,7$ között változhat dombosági területeken és enyhén hullámos felszínű vízgyűjtőkön, Illinois államban. Amennyiben R értéke kisebb, mint az összegyülekezési idő, akkor a hányados értéke $0,5$ alatti, ellenkező esetben $0,5$ feletti (*2. táblázat*). A modell parametrizációja során figyelembe vettük ezt az összefüggést, a későbbi futtatások során $t_c = 20$ órának véve (a tényleges összegyülekezési idő $20–30$ óra a tórendszerben; a mérések és a számításaink szerint, a modell futtatásakor a 20 óra bizonyult megfelelő közelítésnek), a képlet és az arány segítségével határoztuk meg a hozzá tartozó tározási együttható (*storage coefficient*) értékeit.

A veszteségi paraméterek kiszámításához az *Intital and Constant* modellt választottuk, a hidraulikai modellnek pedig a Clark egység-árhullámot (*Clark Unit Hydrograph*). Veszteség modulban a próbafuttatások folyamán ugyanezt a beállítást alkalmaztuk a vízzel

Az összegyülekezési idő (t_c) és a tározási együttható, R egymáshoz viszonyított aránya
(GRAF, J. B. et al. 1982 alapján NAGY G.)
Ratios of the times of concentration and the storage coefficient
(NAGY, G. based on GRAF, J. B et al., 1982)

Egymáshoz arányított érték	$R/(R + t_c)$
$R < t_c$	0–0,4
$R = t_c$	0,5
$R > t_c$	0,6–1

telített talajra számított szimuláció során (*Loss method*), ugyanis azt feltételeztük, hogy a talaj víztelítettsége miatt nincs beszivárgás, azaz a lehullott teljes csapadékmennyiség lefolyt a felszínen. Száraz és átmeneti (közepes) talajnedvesség esetében a folyamatok szimulálására, terepi mért értékek alapján, a 0,3 és 0,7 mm/h közötti értékeket választottuk a végső beszivárgási sebességek (a modellben *constant rate*) értékeknek.

A modell futtatása során a 10 napos modellezési periódust találtuk megfelelőnek, ennek során mind a négy tavon levonult az árhullám. Az árhullám lefutását akkor tekintettük *befejezettnek*, amikor a referenciaszintet érte el újra a vízhozamgörbe és a vízállás ismételtelen a kiindulási üzemvízszintre jutott. A tószerkezet (a keresztiszelvények alakja és a mélység) pontos felépítése és tényleges ismerete nélkül tudtuk az egyes tavak modelljét felépíteni. A terület karsztos jellegét csak közvetve, a beszivárgási és hidrológiai-hidraulikai paramétereken keresztül illesztettük a modellbe, mivel pontos ismeretekkel nem rendelkezünk a terület felszín alatti áramlásrendszerének viszonyairól (LOVÁSZ, GY. 1971; LOVÁSZ GY.–WEIN GY. 1974; CZIGÁNY SZ.–PARRAG T. 1997; CZIGÁNY SZ.–LOVÁSZ GY. 2006).

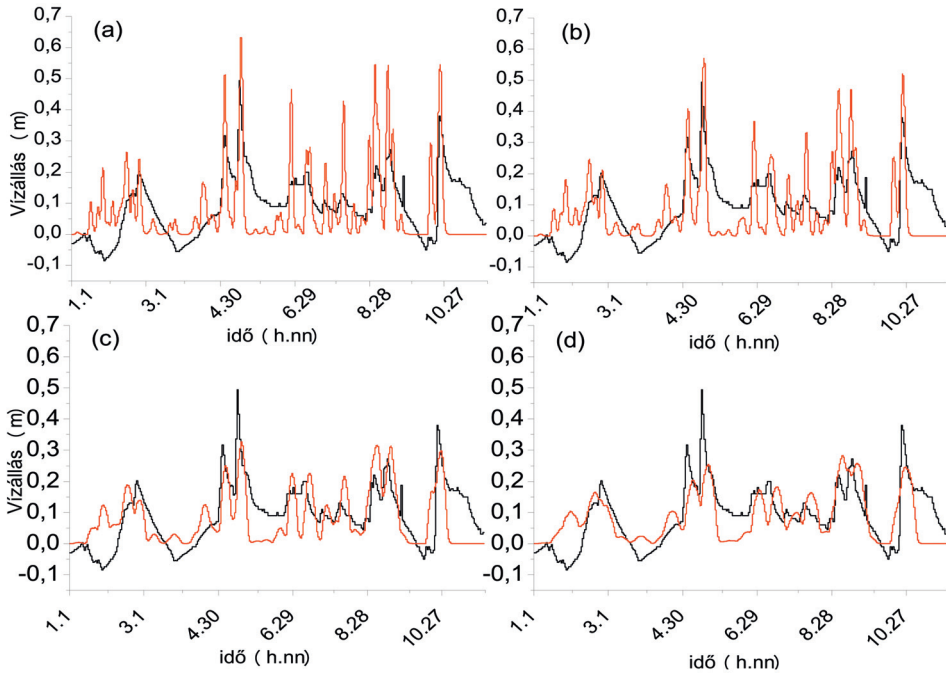
A szükséges adatokat a terepmódul tározási számítási módszer határozza meg (*Reservoir tool*) a modellben. A modell-beállításunk a vízszintemelkedés, terület, kifolyás (*elevation-area-discharge*) volt, amihez a vízszintemelkedés–kifolyás (*elevation-discharge*) és a vízszintemelkedés (*elevation-area*) adatpárokat az üzemvíz-görbék segítségével adtuk meg. A tervezési adatokat, valamint az üzemvíz-görbéket és a maximális tározásimagasság-értékeket a DDVIZIG (Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság) bocsátotta rendelkezésünkre.

Eredmények

A teljes időszakra (2014. január 1.–november 30.) történtő futtatások eredményei az Orfűi-tórendszerre

Ugyan az összegyülekezési idő értéke minden csapadékesemény során eltérő – mivel jelentősen befolyásolja a csapadékintenzitás, a felszín- és a lombkorona-borítottság, valamint a talajnedvesség is –, futtatásaink során a 20 órás összegyülekezési értéket használtuk mint jellemző átlagértéket a 2014-es évre. Így a tározási együttható (*storage coefficient*) változtatása során mindig 20 órának tekintettük az összegyülekezési időt a teljes időszakra nézve. Amikor a két paraméter együttes *hatását* vizsgáltuk [$R/(R + t_c)$], akkor 4 különböző scenárióval végeztünk futtatásokat, 0,3, 0,4, 0,5 és 0,7 $R/(R + t_c)$ hányados-értékekkel. A modellezett vízállás-idősorok a mért vízálláshoz képest laza korrelációt ($r=0,3–0,5$) mutattak a teljes időszakra nézve, mind a négy scenárióra. Az eredmények azt mutatják, hogy a futtatások tetőző árhullámai a 0,3 arányú $R/(R + t_c)$

kivételével késtek a mért árhullámokhoz viszonyítva (3. ábra). A mért vízálláshoz képest a 0,3 és 0,4-es $R/(R + t_c)$ futtatások árhullámainak magassága mintegy 30 cm-rel haladta meg a mért árhullámok tetőző értékeit. A 0,5 és 0,7 $R/(R + t_c)$ arányhoz tartozó beállítással időben a modell tetőző vízállása nem csak késett, de pontatlan is volt a szimuláció. Az $R/(R + t_c)=0,3$ szcenárió kivételével nem tapasztaltunk jelentős eltérést a száraz és a nedves futtatások között, azaz eredményeink alapján a kezdeti talajnedvesség nem befolyásolta a futtatás eredményeit (3. táblázat).



3. ábra A Pécsi-tó mért vízállás- és modellezett vízállás-idősorai a teljes időszakra (2014. január 1.–november 30.) nézve a Clark Unit Hydrograph $R/(R + t_c)$. – a – 0,3; b – 0,4; c – 0,5 és d – 0,7 arányú futtatási eredményeivel (NAGY G.)
 Figure 3 Comparison of measured and modeled water levels for the Pécs Reservoir at $R/(R + t_c)$ values of a – 0.3; b – 0.4; c – 0.5 and d – 0.7 for the entire modeled period between January 1, 2014 and November 30, 2014 (NAGY, G.)

3. táblázat – Table 3

A Pécsi-tó mért vízállása és a szimulációs eredmények közötti korreláció a 2014. évi teljes időszakra (2014. január 1–november 30.) a száraz és nedves kezdeti talajnedvesség-értékek esetében (NAGY, G.)

Correlation between the measured and modeled water levels in the Pécs Reservoir for dry and wet scenarios over the entire 2014 measurement period between January 1, 2014 and November 30, 2014 (NAGY, G.)

Az összegyűlekezési idő és a tározási együttható aránya $R/(R + t_c)$	0,3	0,4	0,5	0,7
Korreláció a mérthez képest száraz körülmények között	0,355	0,439	0,474	0,564
Korreláció a mérthez képest nedves körülmények között	0,435	0,449	0,470	0,570

Egység-árhullámok modellfuttatásainak eredményei az Orfői-tórendszerre

Amikor az egység-árhullámok modellfuttatásai során az $R/(R + t_c)$ hányadosában a t_c értékét kisebbnek vettük, mint 20 óra a száraz időszak futtatásainál, akkor a modellezett vízállásgörbe korrelációja a mérthez képest jelentősen csökkent. Ez az eredmény megerősítette a méréseink alapján kapott 20 órás jellemző értéket a 2014. évre, emiatt csak ezt az értéket használtuk modellfuttatásaink során. A modellezett tetőző vízállások és a Pécsi-tó mért vízállásai között beállítástól függően maximum 23 cm volt az eltérés ($t_c 20 0,3d_1$), a legkisebb különbséget a $t_c 20 0,7d_1$ szcenárió esetében tapasztaltuk (4. táblázat). A korreláció fordítottan arányosnak bizonyult a tetőző vízállás értékével. Minél nagyobbak voltak a tetőző vízállás különbségei a mért és a modellezett értékek között, annál kisebb volt az időbeli eltérés a tetőzés időpontja között (4. táblázat).

4. táblázat – Table 4

A száraz időszak egységárhullámára vonatkozó futtatások eredményeinek korrelációja a Pécsi-tó mért vízállás-értékeivel (NAGY, G.)

Correlation between the measured and modeled water levels for the Pécs Reservoir at the dry-period unit hydrograph (NAGY, G.)

	A tetőzés kezdete (h)	Tetőzés-eltérés (h)	A tetőzés tartama (h)	Abszolút tetőző vízállás (m)	Tetőző vízállás, relatív (m)	A tetőzés magasság-különbsége (m)	Korreláció a mért értékkel
Mért	06.00	–	8	0,514	0,340	–	–
$t_c 20 0,3d_1^*$	18.00	12	1	0,571	0,571	0,231	0,882
$t_c 20 0,3d_2$	17.00	11	4	0,519	0,519	0,179	0,885
$t_c 20 0,3d_3$	16.00	10	3	0,436	0,436	0,096	0,89
$t_c 20 0,3d_4$	07.00	1	4	0,308	0,308	–0,032	0,893
$t_c 20 0,4d_1$	21.00	16	3	0,549	0,549	0,209	0,894
$t_c 20 0,4d_2$	22.00	15	1	0,488	0,488	0,148	0,897
$t_c 20 0,4d_3$	19.00	13	3	0,403	0,403	0,063	0,903
$t_c 20 0,4d_4$	14.00	8	2	0,289	0,289	–0,051	0,91
$t_c 20 0,5d_1$	02.00 (máj 18)	20	1	0,512	0,512	0,172	0,904
$t_c 20 0,5d_2$	01.00 (máj 18)	19	1	0,433	0,433	0,093	0,911
$t_c 20 0,5d_3$	23.00	17	3	0,357	0,357	0,017	0,915
$t_c 20 0,5d_4$	19.00	13	2	0,268	0,268	–0,072	0,919
$t_c 20 0,7d_1$	06.00 (máj 18)	24	2	0,337	0,337	–0,003	0,923
$t_c 20 0,7d_2$	02.00 (máj 18)	20	5	0,293	0,293	–0,047	0,918
$t_c 20 0,7d_3$	05.00 (máj 18)	23	1	0,261	0,261	–0,079	0,902
$t_c 20 0,7d_4$	03.00 (máj 18)	21	6	0,208	0,208	–0,132	0,897

* d_1 végső beszivárgás 0,3 mm/h
 d_2 végső beszivárgás 0,4 mm/h
 d_3 végső beszivárgás 0,5 mm/h
 d_4 végső beszivárgás 0,3 mm/h

A száraz futtatási eredményekhez hasonlóan, a nedves futtatások közül, a Pécsi-tavon mért valós tetőzéshez képest ($t_c=20$ óra), egyik modellezett árhullám sem előzte meg a mért tetőzés kezdetét. A modellezett árhullámok tetőzése 2–17 órával később következett be (5. táblázat). Növekvő $R/(R + t_c)$ esetén nőtt az eltérés a mért és a modellezett vízállás tetőzésének kezdete között. A legrövidebb tetőzési időtartamot a $t_c20 0.4w$ és a $t_c20 0.5w$ scenárió eredményezte, a 0.7-es scenárió esetében azonban ismét megnőtt a tetőzés időtartama. A legjobb korrelációt a $t_c20 0.7$ -es modell-scenárió mutatta a mért vízállás adatsorával. A magasságbeli eléréseink a scenárióink során növekvő korrelációt mutattak a növekvő $R/(R + t_c)$ arány esetén.

5. táblázat – Table 5

A nedves futtatások eredményeinek összevetése a Pécsi-tó mért vízállás-értékeivel, állandó összegyülekezési idő mellett, a beszivárgási sebességet változtatva (RONCZYK L.)

Comparison of measured and modeled water level at various infiltration rates at constant time of concentration for the Pécs Reservoir (RONCZYK, L.)

	A tetőzés kezdete (h)	Tetőzés-eltérés (h)	A tetőzés tartama (h)	Abszolút tetőző vízállás (m)	Tetőző vízállás, relatív (m)	A tetőzés magasságkülönbsége (m)	Korreláció a mért értékkel
Mért	04.00		4	0,38			
$t_c20 0.3w$	06.00	2	3	0,596	0,596	0,216	0,522
$t_c20 0.4w$	11.00	7	1	0,562	0,562	0,182	0,585
$t_c20 0.5w$	16.00	12	1	0,516	0,516	0,136	0,653
$t_c20 0.7w$	21.00	17	5	0,33	0,33	-0,05	0,836

Az eredmények értékelése

A HEC-HMS program alkalmazhatósága egymást követő árhullám-sorozatokra az Orfűi-tórendszer esetében

A modellfuttatások során azt tapasztaltuk, hogy a tavak vízszintjét a modellben a Clark Unit Hydrograph alkalmazásához szükséges paraméterek, az összegyülekezési idő, a tározási együttható és a végső beszivárgási sebesség hármasa szabályozta. Impermeábilis felszín, illetve telített talajnedvesség esetén azt tapasztaltuk, hogy az összegyülekezési idő növelésével a görbe csúcsa ellaposodott, így a tetőző vízállás kisebb lett, az árhullám időtartama pedig megnőtt, emiatt további futtatásink során a 20 óra összegyülekezési időt alkalmaztuk. A tározási együttható növelésének hatására a tetőző vízállás csökkent, az árhullám ellaposodott, így az átfolyó vízhozam is csökkent. A beszivárgás növelésével szintén csökkent a tetőző vízállás. A futtatásunk alapsokaságára szignifikáns hatással volt a végső beszivárgási sebesség is, amikor azt 0,3 és 0,7 mm/h között változtattuk. Ekkor $p < 0,05$ valószínűség mellett a beszivárgási sebesség megváltoztatása statisztikailag is bizonyítható hatással volt a futtatásra (6. táblázat). Ha az összetartozó futtatások mediánjait összehasonlítjuk, azt kapjuk, hogy a növekvő beszivárgási sebesség csökkenti az árhullámok magasságát. Az operatív beavatkozás során, a védekezési és előrejelzési gyakorlat szerint akkor fogadtuk el a futtatási eredményt megfelelőnek, amikor legfeljebb 5 cm volt a különbség a modellezett és a mért értékek között.

Az állandó beszivárgás paraméter változtatásának hatása a nedves futtatási minta alapsokaságra a Wilcoxon teszt alapján (NAGY G. és CZIGÁNY SZ.)

Impact of the final infiltration rate on water level values at wet antecedent soil moisture contents based on the Wilcoxon test (NAGY, G. and CZIGÁNY, SZ.)

$R/(R + t_c)$	0.3		0.4		0.5		0.7	
	száraz ¹	nedves	száraz ²	nedves	száraz ³	nedves	száraz ⁴	nedves
Elemiszám	264		264		264		264	
Átlag	0,1334	0,0759	0,0604	0,1347	0,1361	0,0566	0,1301	0,0481
Medián	0,0245	0,0085	0,006	0,032	0,0485	0,011	0,1	0,03
p	$6,93 \cdot 10^{-37}$		$1,63 \cdot 10^{-39}$		$5,80 \cdot 10^{-42}$		$8,88 \cdot 10^{-42}$	

¹ beszivárgási sebesség = 0,3 mm/s

² beszivárgási sebesség = 0,4 mm/s

³ beszivárgási sebesség = 0,5 mm/s

⁴ beszivárgási sebesség = 0,7 mm/s

Ha a tározási együtthatót és a végső beszivárgási sebességet együttesen változtattuk az $R/(R + t_c)$ arány növelésével, akkor a modellben a tavak tetőző vízállása csökkent, miközben a tetőzés időtartama azonos scenárión belül is eltért egymástól, mivel a két paraméter kombinációjában szinte végtelen számú variáció lett volna lehetséges. A tározási koefficiens értékét úgy számoltuk ki, hogy a hányados értéke 0,3 és 0,7 között változzon, alkalmazva GRAF J. B. et al. (1982) adatait, 20 órás összegyülekezési idő esetében. Magasabb $R/(R + t_c)$ arány esetén növekvő korrelációt tapasztaltunk a mért és a modellezett vízállás-adatsorok között a *Kruskal–Wallace-teszt* alapján is. Ennek az lehet az oka, hogy a futtatások során a modellezett árhullám-tetőzések időpontja, növekvő $R/(R + t_c)$ esetén egyre jobban eltér a mért árhullámcsúcs időpontjától, azonban a tetőzés vízszintek értéke egyre jobban egyezik a mért vízállás hasonló értékeivel, mind a nedves, mind a száraz futtatások esetében.

A 2014. évben a teljes mért időszak futtatása során azt tapasztaltuk, hogy nincs jelentős különbség a korrelációkban a száraz és a nedves futtatások között, mint az a 3. táblázatban látható. Ez azt jelenti, hogy a teljes időszakra nézve nincs hatással a kezdeti talajnedvesség a vízszintváltozásra. Ez ellentmond a korábbi tanulmányok eredményeinek (pl. CZIGÁNY, SZ. et al. 2010; HEGEDŰS, P. et al. 2013; HUZA, J. et al. 2014; ZUCCO, G. et al. 2014), ahol azt tapasztalták, hogy a kezdeti talajnedvesség mint paraméter jelentősen befolyásolja az árhullám lefutásának idejét és az árhullám nagyságát is, bár ezek a tanulmányok vízgyűjtőkre és nem tavakra vonatkoznak. Másrészt megmagyarázható azzal, hogy az egység-árhullám modellt használtuk többszörös, egymást követő árhullámok modellezésére. A talajnedvesség mint paraméter dinamikusan változott a vizsgált időszak alatt a természetben, azonban mi egy értéket adtunk meg a teljes modellezett időszakra. Véleményünk szerint a Clark Unit Hydrograph modell nem alkalmas többszörös árhullámok modellezésére, mivel egyes kezdeti dinamikusan változó peremfeltételek, mint például a talajnedvesség csak egyszer adható meg.

A HEC-HMS-program alkalmazhatósága egység-árhullámokra az Orfűi-tórendszer esetében

A száraz időszakra futtatott scenárióink (2014. május 14–június 3.) megmutatta, hogy a Clark Unit Hydrograph $R/(R + t_c)$ parametrizációjával meg lehet találni az állandó

beszivárgás együtthatóját, a veszteség ismerete nélkül többféle beszivárgás kombinációja is megfelelő lehet egy kiválasztott csapadékesemény és árhullám reprezentálására. A futtatások során azt tapasztaltuk, valamint statisztikailag is sikerült bizonyítanunk, hogy a végső beszivárgási sebesség az a paraméter, amely szignifikánsan képes a scenáriók során futtatott árhullámok megváltoztatására. A parametrizáció során a talaj kezdeti nedvességtartalma nem volt ismert a teljes területre, területi eloszlására csak következtetni lehetett, holott térben igen változékony paraméterről van szó (pl. BROCCA, L. et al. 2010; PENNA, D. et al. 2009). A végső beszivárgási sebesség változtatásával sikerült a korrelációt javítanunk az eredeti mért görbe és a modellezett adatsor között, valamint a beszivárgási sebesség értékének növelése a futtatások tetőző vízállásainak csökkenéséhez is vezetett. A száraz időszakokra modellezett scenárióink szerint a törendszer vízállás-tetőzései minden esetben ugyanazon a napon mennek végbe, mint a mért értékek. Az árhullámokért a törendszeren az Orfűi-tó 22,1 km² kiterjedésű részvízgyűjtő területe volt felelős, a törendszer többi tagjának csak tetőzést eltoló, egyszerismind időben elnyújtó hatása volt. Ez másodsorban az összes vízgyűjtőre és tóra egységesen alkalmazott parametrizáció következménye lehet, mivel a modell szerint minden részvízgyűjtőn ugyanolyan környezeti peremfeltételek voltak beállítva. Az árhullámok levonulási idejét és a tetőző vízállásokat továbbá a kifolyó víz mennyisége, a tó feltöltöttsége a szimuláció kezdetén, valamint az árapasztó műtárgyak, zsilipek keresztmetszete határozza meg a technikai paraméterek közül. A futtatások az épp üzemszinten levő tavakra történtek, amelyeken minden műtárgy megfelelően üzemelt.

A nedves talajra végzett futtatások (október 21 – november 2.) során csak a *Clark Unit Hydrograph* paramétereit (az összegyülekezési időt és a tározási koefficiens) változtattuk. Mivel a modellezett terület egészén csak lefolyás ment végbe, beszivárgás nem, emiatt a beszivárgási sebességet nem vizsgáltuk a nedves futtatásokra elvégzett scenáriók során. A nedves kezdeti talajnedvesség-scenáriókra is megvizsgáltuk a korrelációk és tetőző vízállások tartama és mérete közötti összefüggéseket, valamint ANOVA-tesztel összevetettük a mért és a modellezett futtatások adatsorainak varianciáját is. A 6. táblázat alapján jól látható a nedves futtatások esetén is, hogy minél jobb a korreláció a mért vízállás görbéjéhez képest, annál kisebb a tetőző vízállás, amely egyre későbbi időpontra csúszik; ez az eredményképként kapott futtatási görbe ellaposodásával, azaz a tározási együttható hatásával magyarázható. A varianciaanalízis eredményei azt mutatják, hogy a futtatások során kapott eredmények más alapsokaságból származnak, mint a mért vízállás értékei. Ez a futtatások különbözőségét mutatja a mintához képest, $p = 5\%$ szignifikancia-szint mellett.

A közepes kezdeti talajnedvesség-tartalmú futtatásokat nem lehetett helyesen modellezni az egység-árhullám módszerével, a kiválasztott időszak alatt többszörös árhullám vonult le mért adatok szerint. Az első árhullám reprodukálása viszonylag sikeres volt $R/(R + t_c) = 0,3$ -as beállítás mellett, azonban a modellezett tetőző vízhozam kevesebb, mint 10% eltérést mutatott a Pécsi-tóra, míg jelentősebb, 2,5-szeres eltérést a Kovácsszénája-tóra (7. táblázat).

Mindhárom, a kezdeti talajnedvességre történő modellfuttatások során azt tapasztaltuk, hogy a törendszer tagjai közül a Kovácsszénája-tó túlsordult a száraz és a nedves futtatás eredményként, míg az átmeneti talajnedvességű talajra nézve az árhullám a gáton belül maradt a modellezett vízállás szerint. Ez azzal magyarázható, hogy a száraz kezdeti talajnedvességű esemény során kevesebb, ellenben nagyobb intenzitású és időben koncentráltabb csapadék hullott le (60 óra alatt 76,6 mm), míg a közepes talajnedvességű időszak során, augusztus 31. és szeptember 15. között mennyisége 120,0 mm volt.

Ha összehasonlítjuk a legjobb korrelációjú modellfuttatási scenáriókat a tetőző vízhozamokkal és a kifolyó kumulatív vízmennyiségekkel (7. táblázat), akkor megfigyelhető, hogy míg a száraz és az átmeneti időszakra történő (legjobb korrelációjú) modellfuttatások

7. táblázat – Table 7

A tetőző vízhozam-értékek (m^3/s) számított és mért mennyiségének összevetése időszakok szerint (NAGY G., HEC-HMS modellfuttatások és a DDVIZIG adatai alapján).
Comparison of measured and modeled peak discharge values at various antecedent soil moisture contents (NAGY, G. based on HEC-HMS results and DDVIZIG data)

	Tetőző vízhozam, m^3/s			
	Pécsi-tó, kifolyó		Kovácsszénája-tó, kifolyó	
Futtatási időszak	Mért	Számított	Mért	Számított
Száraz	3,4	4,9	3,1	7,8
Nedves	3,9	3,6	2,5	6,1
Átmeneti	1,8	2,6	0,98	3,8
Száraz számított/mért		1,441		2,516
Nedves számított/mért		0,923		2,440
Átmeneti számított/mért		1,444		3,877

esetén 1,44-szeres az eltérés, addig nedves időszakra csak 0,92-szeres a tetőző vízhozamok esetében. A Kovácsszénája-tó esetén a kifolyó kumulatív vízmennyiség jelentős eltérést mutatott a modellezett és a mért idősorok esetében, bármely kezdeti talajnedvesség esetén. A száraz és nedves időszak futtatása során az eltérés $\sim 2,5$ -szeres a számított/mért adatok között, addig az átmeneti időszak során ennek értéke $\sim 3,9$ -szeresre nőtt (8. táblázat). A kumulatív kifolyó vízmennyiségben tapasztalt jelentős eltérés oka a Kovácsszénája-tó esetében a tó feletti tavak állapotában, árapasztó műtárgyainak és zsilipjeinek működésében, működőképességében keresendő. A műtárgyak karbantartása több esetben sem volt megfelelő, emiatt kevesebb víz tudott rajtuk átfolyni, mint az az üzemeltetési tervben szerepel. A tórendszerben a Pécsi-tó képes a legnagyobb vízmennyiséget, 1,3 millió m^3 vizet tárolni árvízi szinten; ha az árapasztó és a bukóaknás zsilip megfelelően működik, ideális esetben $10 \text{ m}^3/\text{s}$ vízhozammal távozhat belőle a kifolyó víz

8. táblázat – Table 8

A Pécsi-tó vízforgalmának összevetése mérés alapján számított és a futtatások során kapott értékkel (NAGY G.)
Comparison of the measured and modeled water budgets of the Pécs Reservoir (NAGY, G.)

	A Pécsi-tavon árhullám során átfolyt víz mennyisége, m^3		
	Száraz időszak	Nedves időszak	Átmeneti időszak
Mért	872 640	4 078 080	1 615 680
Számított	845 900	1 594 900	1 383 200
Számított/mért	0,9694	0,3911	0,8561

A futtatások során az eredményül kapott vízállás-idősorok különböző mértékben korreláltak a mért vízállással, mind a száraz és a nedves, mind az átmeneti időszakot tekintve. A $Q-h$ görbe segítségével kiszámítottuk a mért vízállás alapján a tavon kifolyó vízhozamokat és vízmennyiséget, amelyből az alapvízhozami távozó víz mennyiségét kivontuk. Erre azért volt szükség, mert a modellünk mindig üzemvízszintről indult, míg

a természetes árhullám általában ennél magasabb vízállásról. Az így kapott különbség eredményét összevetve a futtatások során kapott eredménnyel, azt tapasztaltuk, hogy a száraz és az átmeneti időszakok értékei hasonlóan legjobban a vizsgált időszakok mért értékeihez, azaz növekvő kezdeti talajnedvesség esetén a modell pontatlansága nőtt. A száraz időszak esetén a 0,7 arányú $R/(R + t_c)$ Clark Unit Hydrograph-elemek és 0,3 mm/h végső beszivárgás mellett a számított/mért kumulatív kifolyó vízmennyiségek hányadosa 1,5, addig a 0,7 $R/(R + t_c)$ arányú Clark Unit Hydrograph 0,7 mm/h állandó beszivárgás mellett a számított/mért aránya 0,9694-szeres. Az átmeneti időszak hasonló beállítása esetén a számított/mért értékek hányadosa 0,8561. Elmondható, hogy a száraz időszak szimulálására, a kifolyó víz meghatározására a 2014. év tekintetében a 0,7 arányú Clark Unit Hydrograph 0,3 mm/h végső beszivárgással ad jó közelítést. A nedves időszak alapján modellezett érték és a mérésből számított érték között 2,5-szeres eltérés volt, amikor a 0,7 arányú Clark Unit Hydrograph-ot alkalmaztuk beszivárgás nélkül (8. táblázat).

Összefoglalás

A HEC-HMS program futtatása során azt tapasztaltuk, hogy benne az Orfői-tórendszer modellje felépíthető és segítségével különböző rövid távú időjárási körülmények és jó közelítéssel azok közvetlen hidrológiai következményei is szimulálhatók. A futtatásaink során a HEC-HMS programba beépített *Clark Unit Hydrograph* elnevezésű hidrodinamikai függvényt alkalmaztuk, amelynek parametrizációja során, irodalmi adatok alapján, területreprezentatív $R/(R + t_c)$ tartományt használtunk, 0,3 és 0,7 között. Eredményeink szerint a többszörös árhullámok magasságára a kezdeti talajnedvesség értéke nem gyakorol jelentős hatást, míg az egység-árhullámok reprodukálása során hatása jelentősnek bizonyult. Mivel a modellben a talajnedvesség értéke nem változtatható a szimuláció során dinamikusan, emiatt a Clark Unit Hydrograph hidrodinamikai modell, mint azt a neve is jelzi, valamint eredményeink is alátámasztják, csak egység-árhullámra alkalmazható. Természetesen a felsorolt tényezők mellett nem szabad megfeledkezni a vizsgált terület speciális vízföldtani környezetéről (Vízfő-forrás), ami jelentősen módosíthatja a lefolyási folyamatokat.

Az egység-árhullámok reprodukálása során jelentősen eltérő mennyiségű vízmennyiség folyt le a száraz, a nedves és az átmeneti kezdeti talajnedvességű futtatások esetében. A modellfuttatások közül a száraz és az átmeneti időszakok eredményei mutatták a legjobb egyezést a mért értékekkel, a lefolyt kumulatív vízmennyiségeket tekintve. Eredményeink alapján a HEC-HMS csapadék-lefolyás program alkalmas tavak, tórendszerek modellezésére és azok releváns hidrológiai, hidrodinamikai folyamatainak bemutatására, valamint egység-árhullámainak vizsgálatára; pontosságának a rendelkezésre álló adatsorok precízítése, illetve az adatok idő- és térbeli felbontása szab határt. A többszörös árhullámok modellezhetőségével ellentétben a HEC-HMS Clark Unit Hydrograph modellje, fenntartásokkal ugyan, de használható egyetlen, a tórendszeren végigvonuló árhullám modellezésére, főleg száraz és közepes talajnedvességi peremfeltételek esetén, s feltételezhetően más, hasonló környezeti körülményekkel és tulajdonságokkal jellemezhető tórendszerek vizsgálatakor is. Az egység-árhullámok esetében a modellt a tetőző vízállásértékeket jó közelítéssel tudta reprodukálni, azonban a kifolyó vízmennyiséget (görbe alatti területet) rendszeresen alulbecsülte, valamint minél pontosabban reprodukálta a modell a tetőző vízállást, annak időpontját viszont egyre pontatlanabban jelezte.

A hidrológiai modellezésben rejlő lehetőségeket igen nehéz kihasználni, ha a parametrizáció során a szükséges adatok nem megfelelő térbeli és időbeli felbontásban állnak

rendelkezésre (GIGO-effektus). A karszterületen a felszín alatti vizek és a talajvizek mozgáspályái sok esetben nem ismertek, ezért kutatásokat és külön tanulmányokat igényelnének, amelyek nélkül ugyanis nem rendelkezünk elegendő számú és biztos paraméterekkel. A korszerű vízügyi döntéshozatal alapvető követelménye a megfelelő monitoring hálózat kiépítése, megfelelő adatpolitika, ami nem jöhet létre az ágazatba történő anyagi befektetések (eszközök és humán erőforrások) nélkül.

NAGY GÁBOR

PTE Földtudományok Doktori Iskola, Pécs
gnagy@gamma.ttk.pte.hu

RONCZYK LEVENTE

PTE Térképészeti- és Geoinformatikai Tanszék, Pécs
hidrogen@gamma.ttk.pte.hu

CZIGÁNY SZABOLCS

PTE Természet- és Környezetföldrajzi Tanszék, Pécs
sczigany@gamma.ttk.pte.hu

IRODALOM

- ALI, M.–KHAN, S. J.–ASLAM, I.–KHAN, Z. 2011: Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. – *Landscape and Urban Planning*, 102. pp. 271–279.
- BARTHOLY J.–PONGRÁCZ R. 2005: Néhány extrém éghajlati paraméter globális és Kárpát-medencére számított tendenciája a XX. században. – *AGRO-21 Füzetek* 40. pp. 70–93.
- BARTHOLY, J.–PONGRÁCZ, R.–GELYBÓ, GY. 2007: Regional climate change expected in Hungary for 2071–2100. – *Applied Ecology and Environmental Research* 5/1. pp. 1–17.
- BARTHOLY J.–PONGRÁCZ R.–TORMA Cs. 2010: A Kárpát-medencében 2021–2050-re várható regionális éghajlatváltozás, RegCM-szimulációk alapján. – „Klíma-21” Füzetek 60. pp. 3–13.
- BARTHOLY J.–BOZÓ L.–HAPSZRA L. 2011: Klímaváltozás, 2011. Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére. – *A Magyar Tudományos Akadémia és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszéke, Budapest.* 281 p.
- BROCCA, L.–MELONE, F.–MORAMARCO, T.–MORBIDELLI, R.–BROCCA, L.–MELONE, F.–MORAMARCO, T.–MORBIDELLI, R. 2010: Spatio-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales. – *Water Resources Research* 46. W02516
- BÓTKÖS, T. 2006: Precipitation trends in Pécs Pollution and water resources. – *Columbia University seminars*, XXXVI. pp. 171–178.
- CANDELLAM L.–TAMOH, K.–OLIVAERS, G.–GOMEZ, M. 2012: Modelling impacts of climate change on water resources in ungauged and data-scarce watersheds. – *Application to the Siurana catchment (NE Spain).* *Science of the Total Environment* 440. pp. 253–260.
- CHEN, Y.–XU, Y.–YIN, Y. 2009: Impacts of land use change scenarios on storm-runoff generation in Xitiaoqi basin, China. – *Quaternary International* 208. pp. 121–128.
- CZIGÁNY SZ.–PARRAG T. 1997: Adatok az Abaliget-barlang vízkémiájához. – *Közlemények a Janus Pannonius Tudományegyetem Természetudományi Kar Természetföldrajz Tanszékéről.* 7. szám.
- CZIGÁNY SZ.–LOVÁSZ GY. 2006: A mecseki karszt térképezésének újabb eredményei. – *Közlemények a Pécsi Tudományegyetem Földrajzi Intézetének Természetföldrajz Tanszékéről.* 28.
- CZIGÁNY, SZ.–PIRKHOFFER, E.–GERESDI, I. 2010: Impact of extreme rainfall and soil moisture on flash flood generation, 2010. – *Időjárás (Quarterly Journal Of The Hungarian Meteorological Service)* 114. 1–2. pp. 79–100.
- DU, J.–QIAN, L.–RUI, H.–ZUO, T.–ZHENG, D.–XU, Y.–XU, C.-Y. 2012: Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin, China. – *Journal of Hydrology* 464–465. pp. 127–139.
- ENGEL, B. A.–AHIABLAME, L. M.–LEROY, J. D. 2015: Modeling the impacts of urbanization on lake water level using L-THIA. – *Urban Climate* 14. pp. 578–585.

- GRAF, J. B.–GARKLAWS, G.–OBERG, K. A. 1982: A Time of concentration and storage coefficient values for Illinois streams. – U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 82/13.
- GREEN, J. I.–NELSON, E. J. 2002: Calculation of time of concentration for hydrologic design and analysis using geographic information system vector objects. – *Journal of Hydroinformatics* 04. 2. pp. 75–81.
- HEGEDŰS, P.–CZIGÁNY, SZ.–BALATONYI, L.–PIRKHOFFER, E. 2013: Analysis of Soil Boundary Conditions of Flash Floods in a Small Basin in SW Hungary. – *Central European Journal of Geosciences* 5. 1. pp. 97–111.
- HUZA, J.–TEULING, A. J.–BRAUD, I.–GRAZIOLI, J.–MELSEN, L. A.–NORD, G.–RAUPACH, T. H.–UIJLENHOET, R. 2014: Precipitation, soil moisture and runoff variability in a small river catchment (Ardèche, France) during HyMeX Special Observation Period 1 – *Journal of Hydrology* 516. pp. 330–342.
- Hydrologic Modeling System, HEC-HMS User's Manual 2013: U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, St Davis, California. 442 p.
- IPCC 2007: Éghajlatváltozás 2007: Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) negyedik értékelő jelentése, Genf. – <http://www.ipcc.ch/> – 2015.04.19. keresés alapján.
- IPCC 2013: Éghajlatváltozás 2013: Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) ötödik értékelő jelentése, Genf. – <http://www.ipcc.ch/> – 2015.04.19. keresés alapján.
- KIRKBY, M. J.–NADEN, P. S.–BURT, T.–BUTCHER, D. P. 1987: *Computer Simulation in Physical Geography*. – John Wiley Sons, Chichester. 227 p.
- KLUG, H.–OANA, L. 2015: A multi-purpose weather forecast model for the Mondsee Catchment. – *Journal for Applied Geoinformatics. GI_Forum*, 2015/1. pp. 602–611. KvVM 2008: Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia, 2008–2025. – Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, Budapest. <http://www.kvvm.hu/cimg/documents/nes080214.pdf> – 2015.04.19 keresés alapján.
- LAHLOU, M.–SHOEMAKER, L.–CHOUDHURY, S.–ELMER, R.–HU, A.–MANGUERRA, H.–PARKER, A. 1998: *Better Assessment Science Integration Point and Nonpoint Sources – Basins 2.0 User's Manual*. – United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC. 348 p.
- LOVÁSZ GY. 1971: Adatok az Abaligeti-karszt geomorfológiai és hidrológiai jellemzéséhez. – *Földrajzi Értesítő* pp. 283–296.
- LOVÁSZ GY.–WEIN GY. 1974: Délkelet-Dunántúl geológiája és felszínfejlődése. – Baranya Megyei Levéltár Kiadója, Pécs. pp. 180–181.
- NIEDDA, M.–PIRASTRU, M.–CASTELLINI, M.–GIADROSSICH, F. 2014: Simulating the hydrological response of a closed catchment-lake system to recent climate and land-use changes in semi-arid Mediterranean environment. – *Journal of Hydrology* 517. pp.732–745.
- PENNA D.–BORGIA M.–NORBIATO D.–FONTANA, G. D. 2009: Hillslope scale soil moisture variability in a steep alpine terrain. – *Journal of Hydrology* 364. pp. 311–327.
- PIRKHOFFER, E.–CZIGÁNY, SZ.–GERESI, I. 2009: Impact of rainfall pattern on the occurrence of flash floods in Hungary. – *Zeitschrift für Geomorphologie* 53. 2. pp. 139–157.
- POLITI, E.–ROWAN, J. S.–CUTLER, M. E. J. 2016: Assessing the utility of geospatial technologies to investigate environmental change within lake systems. – *Science of the Total Environment* 543. pp. 791–806.
- SINGH V. P.–FREVERT D. K. 2013: *Watershed Models*. – CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida. 680 p.
- SOMLYÓDY L. 2011: Magyarország vízgazdálkodása: helyzetkép és stratégiai feladatok – In: NOVÁKY B.(szerk.): *Éghajlatváltozás hatásai*. Akadémiai Kiadó, Budapest. pp. 85–100.
- SOMLYÓDY L. 2011: Magyarország vízgazdálkodása: helyzetkép és stratégiai feladatok – In: NOVÁKY B.–LIGETVÁRY F.–SOMLYÓDY L. (szerk.): *Éghajlatváltozás hatásai*. Akadémiai kiadó, Budapest. pp. 233–255.
- STELCZER K. 2000. *A vízkészlet-gazdálkodás hidrológiai alapjai*. – ELTE Eötvös Kiadó, Budapest. 410 p.
- STRAUB, T. D.–MELCHING, CH. S.–KOCHER, K. E. 2000: *Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois*. – U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00–4184. Urbana, Illinois. 36 p.
- WMO, 1974: *Guide to Hydrological Practices*. – WMO, Genf, Svájc, No. 168.
- WANIELISTA, M. P.–KERSTEN, R.–EAGLIN, R. 1997: *Hydrology: Water Quantity and Quality Control*. – Wiley, New York. 567 p.
- WESTOBY, M. J.–GLASSER, N. F.–BRASINGTON, J.–HAMBREY, M. J.–QUINCEY, D. J.–REYNOLDS, J. M. 2014: Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes. – *Earth-Science Reviews*, 134. pp. 137–159.
- ZUCCO, G.–BROCCA, L.–MORAMARCO, T.–MORBIDELLI, R. 2014: Influence of land use on soil moisture spatial-temporal variability and monitoring. – *Journal of Hydrology* 516. pp. 193–199.