

UDK: 556.06:519.876.5

Оригинални научни рад

<https://doi.org/10.2298/GSF1919033E>

СИМУЛАЦИЈЕ ПРОЦЕСА ПАДАВИНЕ-ОТИЦАЈ НА СЛИВУ ЛУКОВСКЕ РЕКЕ КОРИШЋЕЊЕМ HEC-HMS МОДЕЛА

Маст. инж. грађ. Ранка Ерић, Универзитет у Београду, Шумарски факултет, ranka.eric@sfb.bg.ac.rs

Др Андријана Тодоровић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Др Јасна Плавшић, Универзитет у Београду, Грађевински факултет

Др Весна Ђукић, Универзитет у Београду, Шумарски факултет

Извод: Хидролошки модели су веома важни за ефикасно управљање водним ресурсима на нивоу слива. У овом раду је приказана употреба софтверског пакета HEC-HMS-а за моделирање отицаја са слива Луковске реке. За потребе моделирања коришћени су подаци током пет поплавних таласа осматрених на хидролошкој станици Мерћез на Луковској реци. Разматрани поплавни таласи су из два различита временска периода и из две сезоне, т.ј. са различитим доминантним механизмима генерисања отицаја. Стога су поплавни таласи подељени у групе „садашњост“ и „прошлост“, и у групе „пролеће“ и „лето“. Оптималне вредности параметара за сваку групу таласа су добијени осредњавањем оптималних параметара за појединачне таласе унутар групе. Да би се проценила преносивост модела, т.ј. његова примењивост за симулације поплавних таласа који нису разматрани у калибрацији модела, извршена је унакрсна валидација. Резултати показују да се параметри модела разликују за појединачне таласе и групе таласа, и да пренос параметара генерално доводи до значајних грешака у пиковима и запреминама хидрограма, са изузетком симулације летњих догађаја са параметрима из групе „пролеће“. На основу ових резултата дате су препоруке за моделирање отицаја од појединачних епизода.

Кључне речи: калибрација, поплавни догађаји, преносивост хидролошких модела, HEC-HMS, хидролошки модели епизода

УВОД

Хидролошки (падавине-отицај) модели су поједностављене представе процеса генерисања отицаја на сливовима. Ови модели се углавном користе за хидролошке прогнозе, процену меродавних протока за пројектовање хидротехничких објеката, за анализу градских система за одвођење кишних вода, процене количине водних ресурса, али и за разумевање хидролошких процеса на сливу. Другим речима, хидролошки

модели су неопходни и важни у управљању водним ресурсима и због тога се од њих очекује да прецизно репродукују осматрене хидролошке величине. Поред тачности резултата симулација, пожељно је да хидролошки модели имају што једноставнију структуру, како би и њихова примена била што једноставнија (Gayathri et al., 2015).

Примена хидролошких модела резултује симулираним хидролошким величинама, првенствено отицаја на излазу са слива, на основу метеоролошких величина (нпр., падавина, температура, потенцијалне евапотранспирације). Захтеване улазне величине, као и хидролошке величине које се симулирају зависе од конкретног модела, односно, различити модели захевају различите улазне податке и симулирају различите величине (нпр. отицај, влажност земљишта, подземне воде, стварна евапотранспирација). Поред променљивих стања (нпр. садржај воде у земљишту) и флуксева (нпр. отицај, инфилтрација, евапотранспирација), једначине модела садрже и параметре. Неки параметри се могу одредити на основу мерења (нпр. проценат непропусних површина на сливу, нагиб речног дна, итд.), али већина параметара представља тзв. процесне параметре чије се вредности могу одредити само калибрацијом модела. Калибрација подразумева варирање вредности параметара са циљем да се добије што боље слагање симулираних и осмотрених величина, пре свега протока (Beven, 2003).

Развој неког хидролошког модела обухвата више фаза. Прва фаза је формирање перцептуалног модела (детекција и квалитативни опис процеса формирања отицаја на сливу), друга фаза је формирање концептуалног модела (математички опис процеса формирања отицаја), трећа фаза подразумева формирање процедуралног модела (кодирање концептуалног модела). Последње две фазе у развоју модела су његова калибрација и валидација (Beven, 2012).

Постоји много хидролошких модела као и њихових класификација. Према томе како третирају просторне неравномерности, хидролошки модели могу бити дистрибуирани, семи-дистрибуирани и просторно хомогени. Просторно хомогени модели не препознају просторну хетерогеност, тако да је слив представљен једним скупом параметара, а метеоролошке величине су упросечене за целу површину слива. Код дистрибуираних модела слив је подељен на рачунске ћелије (мрежу), и хидролошке величине се рачунају посебно за сваку ћелију, при чему свака ћелија има своје параметре и своје улазне податке (Pechlivanidis et al., 2011). Семи-дистрибуирани хидролошки модели обухватају просторну варијабилност

величина на сливу кроз поделу на подсливове, при чему се за сваки подслив креира модел са хомогеним параметрима (Jovanović, Radić, 1990). Sorooshian et al. (2008) су поделили моделе на моделе догађаја (епизода) и континуалне моделе. Континуални модели укључују компоненте за симулацију различитих процеса на сливу (нпр., интерцепција, капацитет површинских депресија, инфилтрација, трансформација отицаја, топљење снега, базни отицај и пропација хидрограма). Код модела епизода неки процеси као што су интерцепција, топљење снега и евапотранспирација се могу занемарити, због релативно кратког периода симулације (Ilić et al., 2018).

Велики проблем у хидролошком моделирању представља одређивање вредности параметара. Параметри модела се најчешће оптимизују у поступку калибрације тако да се добије што боље слагање симулираних и осмотрених величина (најчешће само протока). Другим речима, у поступку калибрације потребно је оценити велики број параметара на основу најчешће само једне осмотрене величине, па је проблем оптимизације параметара неодређен. Ова неодређеност се додатно погоршава тиме што се слагање осмотрених и симулираних величина се најчешће представља само једним показатељем ефикасности модела, који се рачуна агрегацијом низа резидуала. Услед неодређености проблема оптимизације параметара модела, различити скупови параметара модела могу да резултују (приближно) истом ефикасношћу модела у калибрацији (енг. *equifinality*), али, ако се примене ван калибрационог периода, могу да резултују потпуно другачијим хидрограмима (Wagener et al., 2003). Додатно, поред показатеља ефикасности модела у калибрацији, на оцене параметара модела утичу и неизвесности у осматрањима, период калибрације, односно поплавни таласи на основу којих се модели калибришу у случају модела епизода (Beven, 2012). На пример, параметри модела се могу „подесити“ током калибрације да у некој мери компензују неподударане између осматрања падавина и протока (Beven, Westerberg, 2011). Адекватна идентификација параметера подразумева довољно дугачке и информативне низове података. На пример, једноставни модели епизода који имају само четири или пет па-

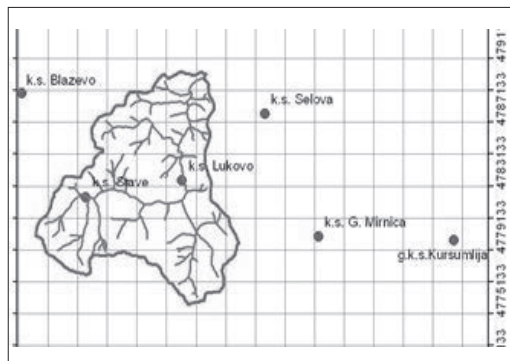
раметара, захтевају најмање 15 до 20 осмотре-них хидрограма како би се параметри идентификовали. Уколико је изражена сезон-ска варијабилност падавина потребан је и дужи период осматрања, односно већи број осмотрених поплавних таласа за идентифика-цију параметара (нпр. Kirkby, 1975; Gupta, Sorooshian, 1985; Hornberger et al., 1985).

Овај рад се бави проблемима калибрације модела епизода и његове применљивости за симулације поплавних таласа из различитих пе-риода и из две сезоне са различитим доми-нантним механизмима генерисања отицаја. За формирање модела у овом раду коришћен је софтверски пакет HEC-HMS (Hydrologic Engineering Centre-Hydrologic Modelling System), који је одабран због своје флексибилности и успешне примене при моделирању речних сли-вова из различитих делова света (McColl, Agget, 2007; Yusop et al., 2007). На основу пет поплавних таласа је приказана унакрсна кали-брација и валидација модела, а резултати су анализирани са гледишта примене модела у временски удаљеним периодима и у другим сезонама у којима доминирају другачији меха-низми генерисања отицаја.

МЕТОДОЛОГИЈА

Опис слива и расположиви подаци

Луковска река је десна притока реке Топлице која припада сливу Јужне Мораве. Овај слив



Слика 1. Слив Луковске реке и метеоролошке станице

представља пример бујичног слива у коме до-минирају велики нагиби. Надморске висине у сливу се крећу од 515 m до 1652 m. Површина слива износи 114.3 km² (Ђukić, 2010).

Педолошка карта слива указује да је хуму-сносиликатно земљиште заступљено на 70% укупне површине слива, а на преосталих 30% површине је еутрично смеђе земљиште на фли-шу. Хумусносиликатно земљиште је веома плитко и задржава малу количину воде док већи део отиче површинским путем. Еутрично смеђе земљиште, услед веће дебљине профи-ла, може да задржи већу количину воде. Што се тиче вегетације на сливу доминирају шуме, које заузимају око 80% површине слива, док је оста-так слива под пољопривредним површинама, ораницама, пашњацима, воћњацима и ливада-ма (Ђukić, 2010).

Табела 1. Карактеристике разматраних поплавних таласа и кишних епизода које су их изазвале

Период симулације	t_k (h)	P_{uk} (mm)	i_{sr} (mm/h)	V_{ot} (mm)	Q_{max} (m ³ /s)	η (/)
07.05.1974. (08:00h) -11.05.1974. (23:00h)	12	41.51	3.77	15.54	9.2	0.37
05.06.1976. (00:00h) -08.06.1976. (05:00h)	47	80.44	1.71	25.33	34.6	0.32
21.08.1979. (07:00h) - 24.08.1979. (00:00h)	11	45.61	4.15	10.17	14.1	0.22
17.04.2014. (18:00h) -23.04.2014. (13:00h)	60	92.51	1.47	48.8	36.8	0.53
01.05.2016. (00:00h) - 10.06.2016. (06:00h)	79	70.46	0.72	39.81	11.1	0.57

Мерћез је хидролошка станица на којој се врше свакодневна осматрања од 1960. године. У близини слива налази се главна климатолошка станица Куршумлија, где се врше плувиографска мерења падавина (слика 1) (Ђукић, 2010). За хидролошке симулације у овом раду коришћена су часовна осматрања протока на хидролошкој станици Мерћез и часовне падавине регистроване на метеоролошкој станици Куршумлија. На располагању су били подаци из седамдесетих година и подаци из новијег периода, у току 2014. и 2016. године. У табели 1 су приказане су карактеристике разматраних поплавних таласа (запремина отицаја, $V_{от}$, максимални проток, Q_{max} и коефицијент отицаја, η), као и карактеристике кишних епизода које су изазавале ове поплавне таласе (трајање кише, t_k , укупна висина кише, $P_{ук}$ и просечни интензитет кише, i_{sr}).

HEC-HMS хидролошки модел

HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System*) је јавно доступан софтвер који се користи за хидролошке симулације. Овај софтвер омогућава корисницима велику флексибилност: конкретно, он омогућава креирање модела епизода и модела за континуалне симулације, као и развој просторно хомогених, семи-дистрибутивних и дистрибутивних хидролошких модела (Тодоровић, Плавшић, 2013). Додатно, HEC-HMS омогућава корисницима да развијају сопствене структуре модела у зависности од намене модела и од доступних података. HEC-HMS модел генерално представља моделирање компоненти као што су: интерцепција, површинско задржавање воде, модел губитака (тј. раздвајање падавина на отицај и инфилтрацију), трансформација ефективних падавина у површински (директни) отицај, базни отицај и пропација таласа у водотоцима (Feldman, 2000).

У овом раду структура HEC-HMS модела је формирана у складу са наменом модела и према доступним подацима. Имајући у виду да је површина слива Луковске реке мала и са малим варијацијама у намени и типовима земљишта, као и да су доступни подаци о падавинама

са само једне метеоролошке станице, усвојен је простоно хомоген тип модела. Модел је намењен симулацијама изолованих поплавних таласа (модел епизода), па је формирана структура модела која садржи компоненте за симулације отицаја, односно ефективних падавина, директног отицаја и базног отицаја. Интерцепција, површинско задржавање воде, топљење снега и евапотранспирација су занемарени у овом раду. Слив се налази на великој надморској висини тако да пролећни поплавни таласи могу бити узроковани комбинацијом падавина и топљењем снега. Међутим, симулације формирања и топљења снежног покривача захтева дугачак период осматрања како би се оптимизовали параметри везани за модел снега. Модел снега је обично део континуалних хидролошких модела, док се код модела епизода занемарује. У овом раду је претпостављено да ће се евентуално присуство снега на сливу непосредно пре и током разматраних поплавних таласа одразити на оцене параметара модела губитака (почетни губитак I_a и број CN криве), чиме ће се индиректно обухватити и утицај снега у овом моделу.

За хидролошке симулације у овом раду одабране су једноставне методе. Запремина отицаја је симулирана SCS (Soil Conservation Service) методом, која је прилично једноставна и често се користи у пракси. Директни отицај је симулиран Кларковим јединичним хидрограмом (Clark's Unit Hydrograph) који пружа велику флексибилност. Базни отицај симулиран је методом рецесије, која је једноставна и погодна за симулацију епизода (Feldman, 2000). Методе које се користе у раду су укратко описане у наставку.

Америчка агенција Soil Conservation Service (SCS) развила је методу за прорачун ефективних падавина, која се заснива на претпоставци да је однос стварне висине ефективне кише, P_e (тј., отицаја) и потенцијалне ефективне кише ($P-I_a$) једнак односу стварне количине воде упијене у земљиште након почетка отицаја, F_a , и максималног капацитета тла, d , (Chow et al., 1988):

$$\frac{P_e}{P - I_a} = \frac{F_a}{d} \quad (1)$$

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (2)$$

$$I_a = \lambda \cdot d \quad (3)$$

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + d} = \frac{(P - I_a)^2}{P - (1 - \lambda) \cdot d} \quad (4)$$

$$d = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (5)$$

Вредност броја криве CN зависи од намене земљишта, типа земљишта и претходне влажности земљишта (Chow et al., 1988). Овај параметар модела утиче на пик хидрограма: већа вредност CN броја узрокује веће пикове и обратно. Почетни губитак (I_a) обично укључује интерцепцију, површинско задржавање воде и инфилтрацију кише пре формирања отицаја, а процењује се као део максималног капацитета тла. CN вредности за просечне претходне услове које се обично наводе у литератури односе се на λ вредности од 0.2 (Woodward et al., 2003). Међутим, треба напоменути да се у литератури предлаже да се вредности λ процене на основу осматраних падавина и отицаја, ако су доступни (Petroselli et al., 2013; Walega, Rutkowska, 2015). SCS метода у НЕС-HMS-у укључује следеће параметре: почетни губитак I_a (mm), број CN криве (-) и удео непропусних површина на сливу (*Impervious* (%)). Падавине са непропусних површина се директно усмеравају у водоток, без икакве накнадне инфилтрације. Ако није другачије задато, почетни губитак (у милиметрима) се аутоматски рачуна на основу вредности CN броја са вредношћу λ од 0.2 (Feldman, 2000).

Трансформација ефективних падавина у директни отицај са слива је симулирана помоћу Кларковог јединичног хидрограма. Ова метода симулира транслацију отицаја до излазног профила слива помоћу криве време-површина, а ублажење отицаја симулира методом линеарног резервоара, која укључује једначину континуитета (6) и једначину линеарног резервоара (7).

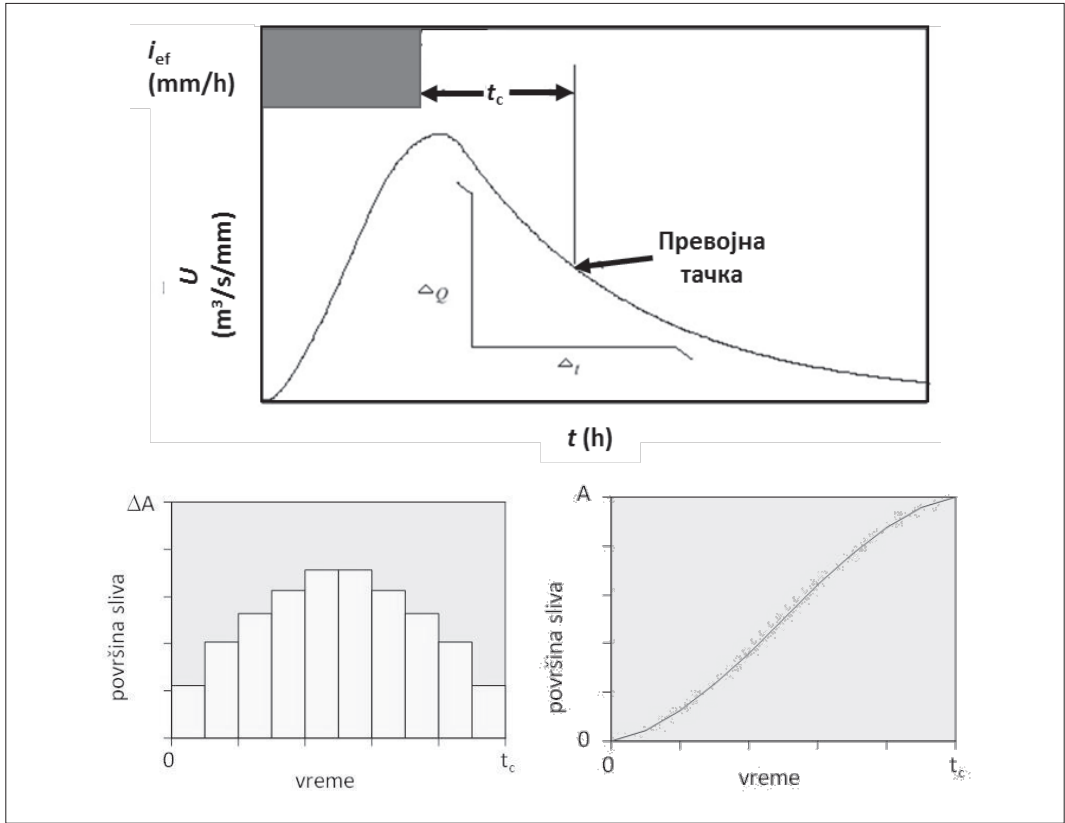
$$\frac{dV(t)}{dt} = U(t) - I(t) \quad (6)$$

$$V(t) = R \cdot U(t) \quad (7)$$

где је $U(t)$ доток у резервоар и $I(t)$ излаз из резервоара у тренутку t , а $V(t)$ запремина у резервоару у тренутку t . Параметар модела R је константа линеарног резервоара. Кларкова метода у НЕС-HMS-у има два параметра: време концентрације, t_c (h), које је потребно да би се добила зависност време-површина, и константу линеарног резервоара, R (h), којом се контролише задржавање (ретензирање) отицаја на сливу.

У општем случају, време концентрације представља време течења од најудаљеније тачке на сливу до излазног профила на сливу. Међутим, у моделу Кларковог јединичног хидрограма се под временом концентрације подразумева време од завршетка ефективне кише до превојне тачке на рецесионој грани хидрограма (Straub et al., 2000; слика 2). Време концентрације је потребно да би се дефинисала крива време-површина. У НЕС-HMS-у постоји предефинисана бездимензиона, типска крива време-површина (слика 2), с тим же могуће и да корисник унесе и другачију криву време-површина. У општем случају, требало би дефинисати криву време-површина за сваки слив, узимајући у обзир његову топографију. Међутим, студије које су спроведене у НЕС-у су показале да типска крива време-површина у оквиру НЕС-HMS-а може да се прилагоди различитим конфигурацијама сливова на основу задате површне и времена концентрације, и да се таквом применом типске криве време-површина могу постићи задовољавајући резултати хидролошких симулација (Feldman, 2000). Стога је у овом раду је коришћена типска крива време-површина дефинисана у НЕС-HMS-у.

Вредности параметара Кларковог јединичног хидрограма (времена концентрације t_c и константе линеарног резервоара R) су оцењене калибрацијом модела. Почетне вредности ових параметара у поступку калибрације су добијене на основу емпиријских израза Kirpich-а (1940) (8) и Clark-а (9):



Слика 2. Кларков јединични хидрограм (горе) и предефинисана крива време-површина у НЕС-НМС-у (доле)

$$t_c = 0.0663 \cdot \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} (h) \quad (8)$$

$$R = \frac{\alpha L}{\sqrt{S}} (h). \quad (9)$$

где је L дужина тока у km , S представља нагиб слива и α је коефицијент (вредности варирају од 0.4 до 1.4) (Kanak et al., 2015). Ови параметри највише утичу на пик и облик хидрограма. Модел рецесије претпоставља да се силазна грана хидрограма може апроксимирати експоненцијално опадајућом кривом (10) (Scharffenberg, Fleming, 2010):

$$Q_b = Q_0 \cdot k^t \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (10)$$

где је Q_0 почетна вредност базног протока, k константа рецесије и t време. Константа рецесије дефинише брзину опадања базног протока и узима вредности између 0 и 1. Веће вредности k значе спорије опадање базног протока, док је рецесиона крива хоризонтална линија када је $k = 1$. Ова метода у НЕС-НМС-у такође захтева да се дефинише тачка на хидрограму која је уједно и почетна тачка опадајуће криве (Scharffenberg, Fleming, 2010). У раду је ова тачка дефинисана као проток који представља део максималног протока на хидрограму. Метода рецесије у НЕС-НМС-у има два параметра: рецесиону константу k и удео максималног протока (*Ratio*). Треба имати у виду да овај модел базног отицаја није конзервативан, односно да базни отицај не зависи од садржаја воде у зе-

мљишту и резервоару подземних вода. Са друге стране, идентификација параметара сложене моделије базног отицаја захтевала би дугачке низове осматрања који би обавезно укључили и сушне периоде. Имајући у виду да су предмет овог рада модели епизоде, сложене моделије базног отицаја нису разматрани, већ је метода рецесије усвојена као прихватљива за потребе симулација појединачних поплавних таласа.

Калибрација модела и процена његове преносивости

За потребе калибрације и унакрсне валидације хидролошког модела, на располагању је пет епизоде (табела 1) из два временски раздвојена периода (1970-е и 2010-е) и два различита периода у години (пролеће и лето). На основу ових таласа формиране су четири групе поплавних таласа за калибрацију и валидацију модела. Прва група је „прошлост“ у који спадају епизоде 1974, 1976 и 1979, а групу „садашњост“ чине епизоде 2014 и 2016. Група „пролеће“ убихвата епизоде 1974, 2014 и 2016 и групу „лето“ чине епизоде 1976 и 1979. Груписање таласа као прошлост/садашњост омогућава процену преносивости модела у времену, што може бити ометано променама у сливу, као што су климатске промене или промене у намени земљишта (урбанизација, сеча шума). Поплавни таласи који су се догодили у пролеће изазвани су кишама које су пале на већ засићено тло услед претходног топљења снега, с тим да је могуће да је топљење снега постојало на неким деловима слива и током самих пролећних епизоде. С друге стране, поплавни таласи током лета су изазвани кратким кишним епизодама високог интензитета. Да би се проценила преносивост модела кроз различите сезоне и временске периоде, врши се калибрација и унакрсна валидација HEC-HMS модела.

У овом раду параметри су ручно подешавани (тзв. „ручна калибрација“, енгл. „*trial-and-error*“) за сваку епозоду посебно како би се добиле што повољније вредности одабраних показатеља ефикасности модела, који су обја-

шњени у наставку. Оптимални скуп параметара је одређен за сваку групу поплавних таласа осредњавањем вредности параметара добијених за сваки поплавни талас у оквиру групе таласа. На овај начин добијена су четири скупа параметара модела који су означени као: $\Theta_{\text{прошлост}}$, $\Theta_{\text{садашњост}}$, $\Theta_{\text{пролеће}}$ и $\Theta_{\text{лето}}$. Након калибрације модела урађена је унакрсна валидација прошлост/садашњост и пролеће/лето, тако што се калибрисани параметри за једну групу таласа коришћени за симулације таласима из друге групе, и обрнуто.

Ефикасност модела представљена је помоћу Nash-Sutcliffe коефицијента (NS), грешке у пику хидрограма (12), грешке у запремини отицаја (13) и грешке у времену појаве пика хидрограма (14). Ови показатељи квалитета модела су одабрани да се квантификују различити аспекти квалитета модела, као што су динамика и запремина отицаја. Nash-Sutcliffe је добијен за сваки талас према наредном изразу:

$$NS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{osm,i})^2}{\sigma_{osm}^2} \quad (-) \quad (11)$$

Где су: N – број података у низу, $Q_{sim,i}$ (m^3/s) – симулирани проток, $Q_{osm,i}$ (m^3/s) – опажени проток и σ_{osm} – стандардна девијација осмотрених протока. Nash-Sutcliffe коефицијент има вредност између 1 и $-\infty$, где 1 представља идеално слагање, док вредности мање од 0 указују неприхватљиво лошу ефикасност модела. За континуалне моделе са дневним рачунским кораком вредности NS изнад 0.4 се сматрају задовољавајућим, док вредности изнад 0.75 означавају веома добру ефикасност модела (Moriasi et al., 2007). Не постоје одређене препоруке за моделе епизоде са часовним временским кораком, али се у општем случају од ових модела очекују веће вредности NS-а него код континуалних модела са дневним рачунским кораком.

Грешка у пику хидрограма се рачуна помоћу следећег израза:

$$\varepsilon_{peak} = \frac{Q_{sim} - Q_{osm}}{Q_{osm}} \cdot 100\% \quad (12)$$

Грешка у запремини је дефинисана према следећем изразу:

$$\varepsilon_V = \frac{V_{sim} - V_{osm}}{V_{osm}} \cdot 100\% \quad (13)$$

Грешка у времену појаве пика хидрограма је дефинисана према следећем изразу:

$$\varepsilon_t = t_{sim} - t_{osm}(h) \quad (14)$$

Позитивне вредности ε_t указују да је моделирани максимални проток одложен (тј. да казни) у односу на осмотрени и обрнуто.

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Оптимални скуп параметара је добијен за сваку групу поплавних таласа. Као што је приказано у табели 2, параметри се значајно разликују од догађаја до догађаја. Највећу варијабилност има почетни губитак (I_a), што се очекивало будући да су претходни услови на сливу специфични за сваки од догађаја. Варијације у овом параметру не показују одређени образац (нпр. између пролећних или летњих догађаја). CN

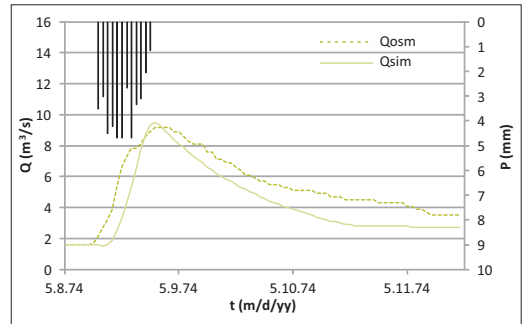
број такође показује велику варијабилност: на пример, вредност CN-а код појединачних догађаја варира између 60 и 81.30. Веће вредности CN броја добијене су за групу „пролеће“ и групу „садашњост“, која је уједно и подскуп групе „пролеће“. Кише се често јављају у пролеће, а заједно са топљењем снега узрокују висок садржај воде у тлу, што одговара већим CN вредностима. Насупрот томе, тло је углавном суво и са већим капацитетом инфилтрације током лета, што одговара нижим CN вредностима у групи „лето“. Слив Луковске реке је мали са процењеним временом концентрације за Кларков јединични хидрограм између 1.5 h и 2 h. Није било значајне урбанизације на сливу, што је у складу са приближно истим вредностима времена концентрације која су добијена за поплавне таласе из прошлости и садашњости. Постоји знатна варијација у оценама коефицијента линеарног резервоара R , које су за све поплавне таласе вишеструко веће од добијених оцена t_c . У општем случају се очекује да оцене ових параметара Кларковог јединичног хидрограма буду приближно једнаке, мада се у литератури наводе и примери где су добијене знатне разлике између вредности ових параметара (Straub et al., 2000; Che et al., 2014). Велике разлике у оценама параметара R и t_c Кларковог

Табела 2. Оптимизовани параметри за четири групе поплавних таласа

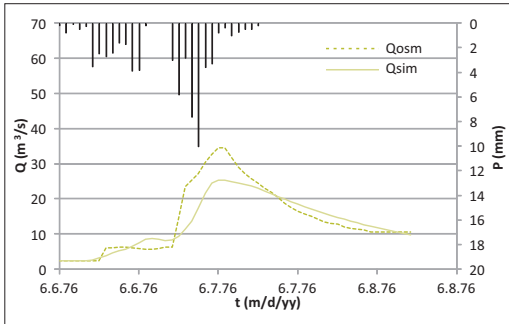
Назив групе	Поплавни талас	Модел губитака		Трансформација ефек. кише у директни отицај		Базни отицај	
		I_a (mm)	CN (-)	t_c (h)	R (h)	k (-)	$Ratio$ (-)
прошлост	1974	0	74	2	50	0.999	0.30
	1976	8	60	2	11.90	0.90	0.30
	1979	8	60	2	11.20	0.90	0.30
	ПРОСЕК	5.33	64.67	2	24.37	0.933	0.3
садашњост	2014	10	81.30	1.5	20	0.999	0.30
	2016	0	70	2	20.20	0.95	0.30
	ПРОСЕК	5	75.65	1.75	20.10	0.975	0.3
пролеће	1974	0	74	2	50	0.999	0.30
	2014	10	81.30	1.5	20	0.999	0.30
	2016	0	70	2	20.20	0.95	0.30
	ПРОСЕК	3.33	75.10	1.83	20.20	0.983	0.3
лето	1976	8	60	2	11.90	0.90	0.30
	1979	8	60	2	11.20	0.90	0.30
	ПРОСЕК	8	60	2	11.425	0.90	0.30

јединичног хидрограма у овом раду се може објаснити и тиме да су на располагању била осматрања падавина са само једне метеоролошке станице, чиме можда није у потпуности представљена временска и посторна неравномерност падавина на сливу. Динамика симулираног хидрограма отицаја у великој мери зависи од динамике падавина, а свака неусклађеност између осматрених падавина и отицаја у овом смислу се одражава на оцене параметара који контролишу динамику отицаја (у овом моделу су то параметри Кларковог јединичног хидрограма). Другим речима, у поступку калибрације се добијају оцене параметара којима се ова неусклађеност на најбољи начин компензује. Ови резултати калибрације модела указују на веома велику осетљивост параметара који контролишу динамику генерисања отицаја на квалитет улазних података (пре свега осматрања падавина и протока) код модела са часовним временским кораком. Параметри

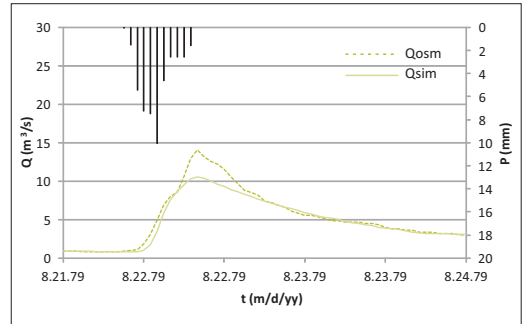
који се односе на базни отицај показују релативно малу варијабилност: при свакој калибрацији почетна тачка опадајуће криве се налази на 30% од максималног протока, *Ratio* је 0.3, док се вредност константе рецесије креће у распону од 0.90 до 0.999.



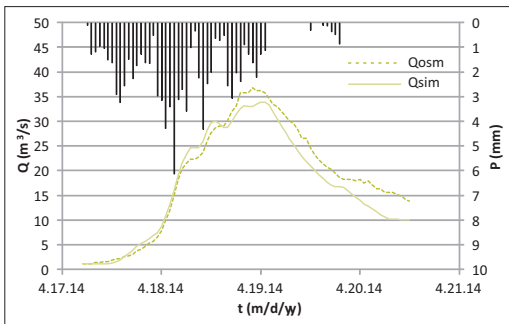
Слика 3. Осматрени и симулирани хидрограм за талас 1974 (прошlost) – калибрација



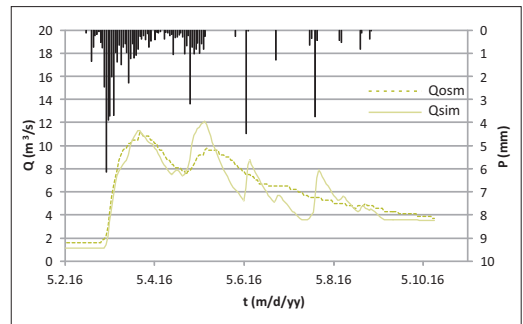
Слика 4. Осматрени и симулирани хидрограм за талас 1976 (прошlost) – калибрација



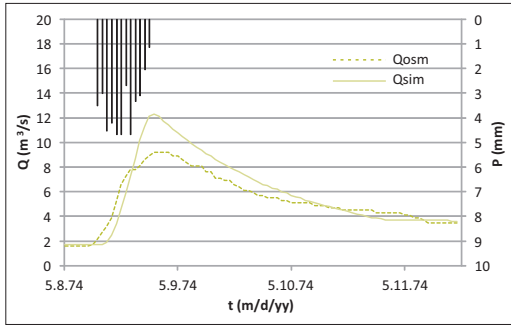
Слика 5. Осматрени и симулирани хидрограм за талас 1979 (прошlost) – калибрација



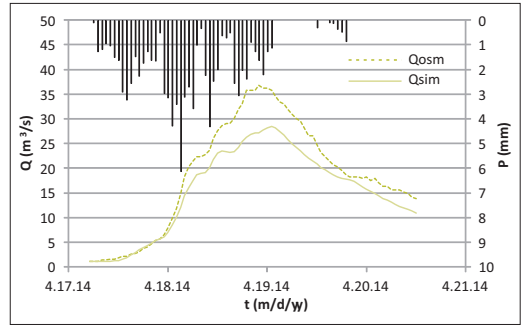
Слика 6. Осматрени и симулирани хидрограм за талас 2014 (садашњост) – калибрација



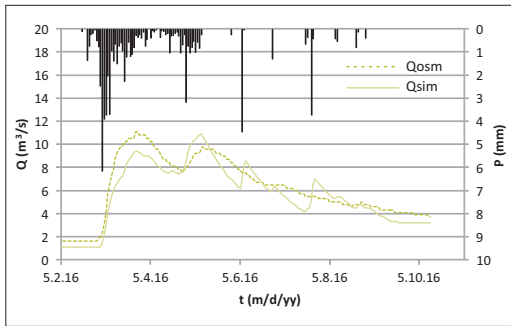
Слика 7. Осматрени и симулирани хидрограм за талас 2016 (садашњост) – калибрација



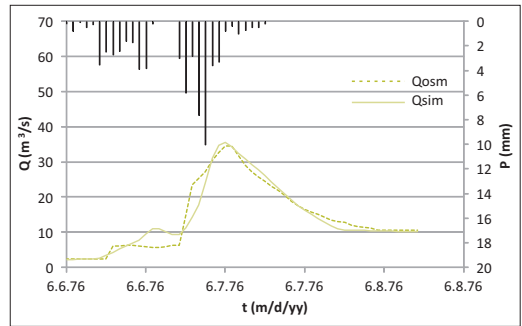
Слика 8. Осмотрени и симулирани хидрограм за талас 1974 (пролеће) – калибрација



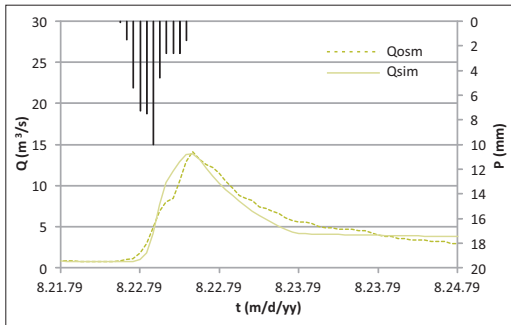
Слика 9. Осмотрени и симулирани хидрограм за талас 2014 (пролеће) – калибрација



Слика 10. Осмотрени и симулирани хидрограм за талас 2016 (пролеће) – калибрација



Слика 11. Осмотрени и симулирани хидрограм за талас 1976 (лето) – калибрација



Слика 12. Осмотрени и симулирани хидрограм за талас 1979 (лето) – калибрација

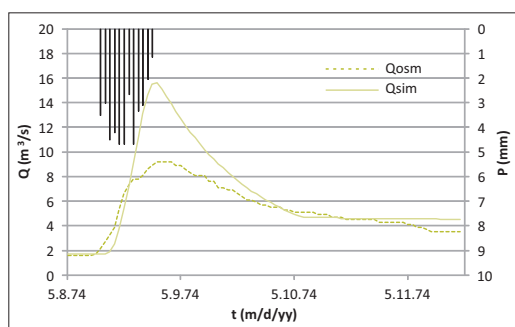
Показатељи ефикасности модела током калибрације су приказани у табели 3 и показују да ефикасност модела веома варира за различите поплавне таласе. Вредности NS веће од 0.8, које се добијају у калибрацијама за готово све таласе, указују на добру ефикасност модела. Пикови и запремина отицаја су прецењени или потце-

њени, са наглашеним одступањима у неким таласима из групе „прошlost“ и „пролеће“, иако су вредности NS-а велике. Интересантно је да су пикови хидрограма током догађаја 1976. и 1979. године тачно репродуковани са групом параметара „лето“, док је за групу параметара из прошлости модел репродуковао неприхватљиво велико потцењивање пика хидрограма, што није добро за моделирање поплавних догађаја. Запремина отицаја је генерално добро репродукована у свим калибрацијама, уз неколико изузетака са одступањем изнад 10%. Модел је такође прецизно симулирао времена појаве максималног протока, осим за догађај из 2016. године. Треба напоменути да грешке у времену јављања максималног протока не зависе само од хидролошког модела, већ и од хијетограма и просторне распореде падавина. Варијације у ефикасности модела више су изражене у групи „прошlost“ и „садашњост“, него у групама „пролеће“ и „лето“. Ово указује да су механизми за

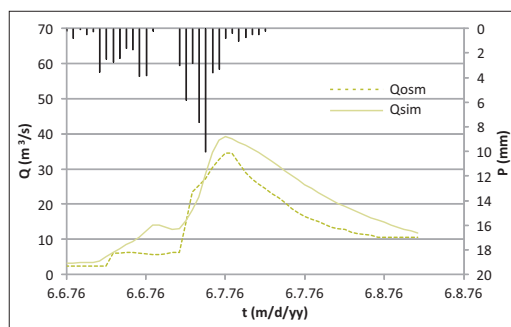
стварање отицаја и претходни услови на сливу је резултирало бољом ефикасношћу и мањом слични токком пролећних и летњих догађаја, што варијабилношћу параметара модела.

Табела 3. Показатељи ефикасности модела у калибрацији

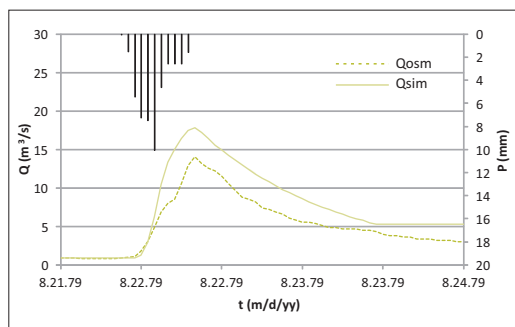
Група	Поплавни талас	NS (-)	$\epsilon_{peak} (%)$	$\epsilon_v (%)$	$\epsilon_t (%)$
прошлост	1974	0.781	3.26	-18.85	0
	1976	0.877	-26.60	-6.83	0
	1979	0.932	-24.82	-8.46	0
	ПРОСЕК	0.863	-16.05	-11.38	0
садашњост	2014	0.938	-7.90	-8.25	+3
	2016	0.864	9	-6.05	+11
	ПРОСЕК	0.901	0.55	-7.15	+7
пролеће	1974	0.821	33.70	1.24	0
	2014	0.856	-22.55	-17.82	+3
	2016	0.885	-1.80	-8.82	+11
	ПРОСЕК	0.854	3.12	-8.47	+4.67
лето	1976	0.956	2.53	-0.40	0
	1979	0.932	-1.42	-4.52	0
	ПРОСЕК	0.944	0.555	-2.46	0



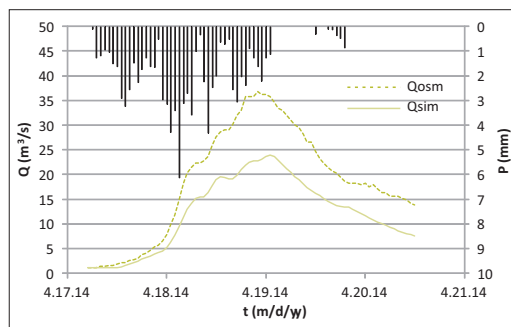
Слика 13. Валидација модела: симулација таласа из групе „прошлост“ из 1974. године са параметрима $\Theta_{садашњост}$



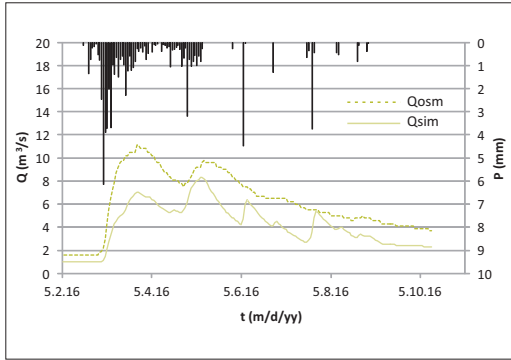
Слика 14. Валидација модела: симулација таласа из групе „прошлост“ из 1976. године са параметрима $\Theta_{садашњост}$



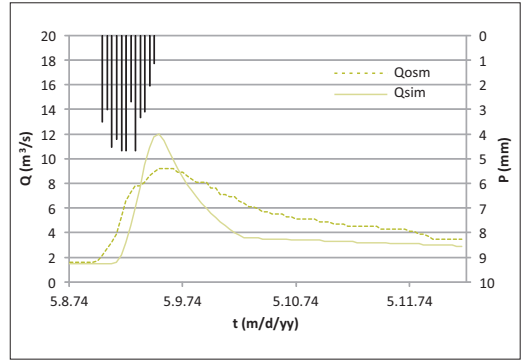
Слика 15. Валидација модела: симулација таласа из групе „прошлост“ из 1979. године са параметрима $\Theta_{садашњост}$



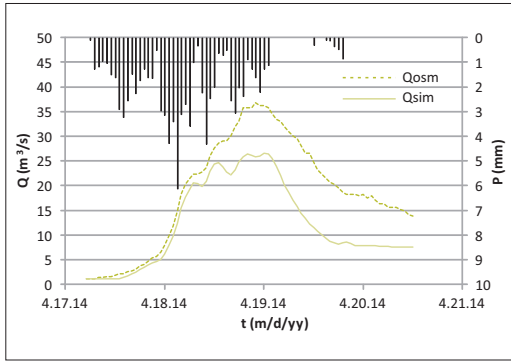
Слика 16. Валидација модела: симулација таласа из групе „садашњост“ из 2014. године са параметрима $\Theta_{прошлост}$



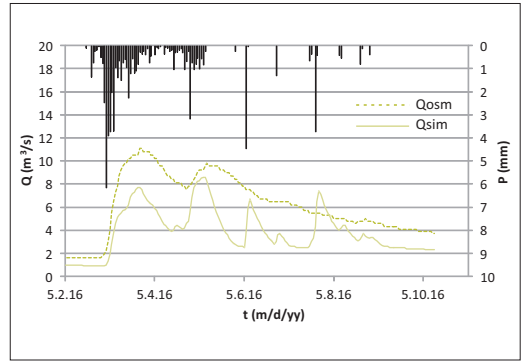
Слика 17. Валидација модела: симулација таласа из групе „садашњост“ из 2016. године са параметрима $\Theta_{\text{прошлот}}$



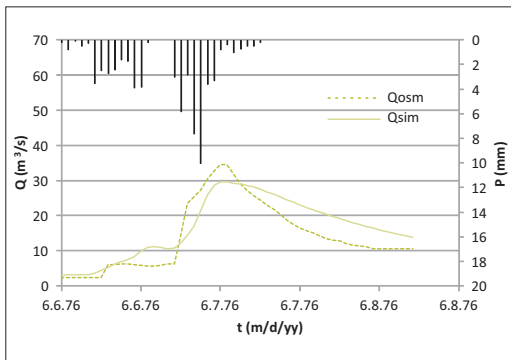
Слика 18. Валидација модела: симулација таласа из групе „пролеће“ из 1974. године са параметрима $\Theta_{\text{ЛЕТО}}$



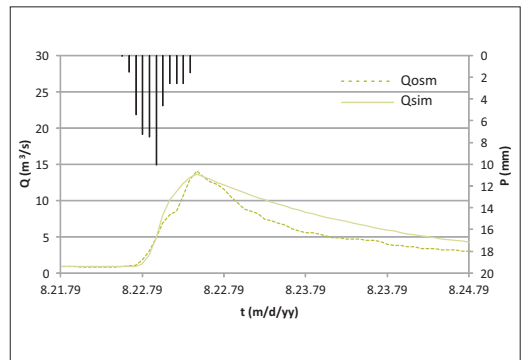
Слика 19. Валидација модела: симулација таласа из групе „пролеће“ из 2014. године са параметрима $\Theta_{\text{ЛЕТО}}$



Слика 20. Валидација модела: симулација таласа из групе „пролеће“ из 2016. године са параметрима $\Theta_{\text{ЛЕТО}}$



Слика 21. Валидација модела: симулација таласа из групе „лето“ из 1976. године са параметрима $\Theta_{\text{пролеће}}$



Слика 22. Валидација модела: симулација таласа из групе „лето“ из 1979. године са параметрима $\Theta_{\text{пролеће}}$

Табела 4. Показатељи квалитета модела током валидације

Калибрација / валидација	Поплавни талас (догађај)	NS (-)	$\epsilon_{peak}(\%)$	$\epsilon_V(\%)$	$\epsilon_t(\%)$
садашњост / прошлост	1974	0.442	69.60	17.63	0
	1976	0.737	13.29	33.16	0
	1979	0.485	26.24	40.41	0
	ПРОСЕК	0.555	36.37	30.40	0
прошлост / садашњост	2014	0.533	-35.05	-34.60	+3
	2016	0.411	-25.23	-33.23	+11
	ПРОСЕК	0.472	-30.14	-33.92	+7
лето / пролеће	1974	0.639	30.44	-19.05	-1
	2014	0.490	-28.0	-34.62	+2
	2016	0.171	-22.52	-37.08	+10
	ПРОСЕК	0.433	-6.69	-30.25	+3.67
пролеће / лето	1976	0.837	-14.16	16.15	0
	1979	0.793	-3.55	25.17	0
	ПРОСЕК	0.815	-8.86	20.66	0

Резултати валидације приказани у табели 4 указују на пад ефикасности модела у односу на резултате калибрације. Веома је важно да NS узима позитивне вредности при свакој валидацији, што говори да је модел прихvatљив. Уочено је веће одступање у пиковима него при калибрацији, посебно у валидацијама између група „садашњост“ и „прошлост“. Запремина отицаја није прецизно симулирана ни у једној валидацији, односно апсолутне вредности грешака у запремини су далеко веће од 10%. Што се тиче времена појаве пика хидрограма, ефикасност модела у овом смислу је слична као у калибрацији, што сугерише да овај показатељ квалитета модела првенствено зависи од хијетограма, тј. од правилног приказа временске и просторне расподеле падавина.

Модел је најосетљивији на промену параметара CN, t_c и R. Ови параметри значајно утичу на кључне карактеристике поплавних хидрограма: запремина, пик и облик хидрограма. Према ефикасности модела (табела 4), догађаји из 1976. и 1979. године издвајају се са најбољим резултатима. Валидација пролеће/лето резултира бољим показатељима квалитета модела од валидације прошлост/садашњост. Дакле, преносивост параметара модела у различитим периодима године је нешто боља него у удаљеним временским периодима. Овакво понашање се може приписати високим вредностима

CN-а и R-а групе „пролеће“, па су перформансе модела сличне као код групе „лето“ са нижим вредностима CN-а и R-а. Ово указује на то да ова два параметра компензују своје ефекте на симулиране хидрограме, тј. да је параметарска еквивалентност (енгл. *equifinality*, Beven, Binly, 1992) уобичајена и за моделе са једноставном структуром, као што је модел епизода који се користи у овом раду. Ови резултати такође указују на то да параметри генерално не би требало да се преносе кроз временски удаљене догађаје, упркос непромењеној намени земљишта на сливу.

Треба имати у виду да су ови резултати добијени на основу само пет поплавних таласа на једном сливу. С тога, ове закључке треба проверити симулацијама са већим бројем поплавних догађаја са различитих сливова (тј. из различитих климатских зона).

ЗАКЉУЧЦИ

Моделирање поплавних догађаја (таласа великих вода) је важно за процену меродавних протока за димензионисање хидрауличких конструкција (нпр. бране) или за заштиту од поплава, које представљају опасност за становништво и животну средину.

Овај рад представља развој НЕС-НМС хидролошког модела епизода који служи за симулацију поплавних догађаја на сливу Луковске реке. Модел се користи за анализу преносивости модела кроз временски удаљене периоде, као и кроз догађаје из различитих годишњих доба (пролеће и лето), тј. кроз различите доминантне механизме формирања отицаја. На тај начин се поред преносивости модела током времена (под сличним условима на сливу) може одредити утицај урбанизације и утицај климатских промена.

Упркос непромењеној намени земљишта на сливу, уочена је значајна варијабилност параметара модела. Највећа варијабилност се примећује код следећих параметара: CN број, коефицијент линеарног резервоара (R) и почетни губитак (I_s). Смањење ефикасности модела у валидацији указује да је модел осетљив на промене параметара, тј., на примену параметара за симулацију других поплавних догађаја. Међутим, у случају слива Луковске реке, резултати указују да груписање поплавних догађаја према доминантним механизмима формирања отицаја, тј. годишњим добима, резултира нешто бољом преносивошћу у односу на временски период њиховог појављивања.

Будући да се највеће поплаве на овом сливу дешавају у пролећним месецима, за процену меродавних протока препоручује се скуп параметара "пролеће" са меродавним рачунским кишамма. Параметри за догађаје из група „прошlost“ и „садашњост“ препоручују се за детаљну анализу утицаја климе и других промена на

сливу. Имајући у виду да пренос параметара кроз временски удаљене периоде доводи до потцењивања пикова хидрограма, скуп параметара добијен на основу догађаја из садашњости се препоручује за потребе прогнозе поплава.

Резултати приказани у овом раду указују на велике неизвесности у симулацијама изолованих поплавних догађаја, као и на веома велику осетљивост резултата на квалитет улазних података. За побољшање модела епизода, неопходни су поуздани подаци који захтевају добро опремљене сливове. Густина мерних станица би требала да буде усклађена са топографијом слива, односно потребне су бројније станице на сливовима који имају изражен рељеф, као што је то случај са планинским сливовима. Додатно, потребни су дужи низови осмотрених падавина и протока који би укључивали бројније поплавне догађаје. Ово је први корак на путу побољшања калибрације и преносивости модела епизода за симулације поплавних догађаја. Из ових разлога, важно је формирати више експерименталних сливова и побољшати системе за прикупљање података. Даља истраживања су потребна за побољшање калибрације модела епизода. Конкретно, треба испитати да ли је осредњавање оптималних параметара добијених за појединачне догађаје унутар групе добар начин за одређивање параметара модела епизода. Калибрација модела епизода могла би се унапредити применом робусних метода оптимизације и удруживања различитих поплавних догађаја у калибрацији.

RAINFALL-RUNOFF SIMULATIONS IN THE LUKOVSKA RIVER BASIN WITH THE HEC-HMS MODEL

Ranka Erić, MSc, University of Belgrade – Faculty of Forestry, ranka.eric@sfb.bg.ac.rs

Andrijana Todorović, PhD, University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering

Jasna Plavšić, PhD, University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering

Vesna Đukić, PhD, University of Belgrade – Faculty of Forestry

Abstract: Hydrologic models are important for effective water resources management at a basin level. This paper describes an application of the HEC-HMS hydrologic model for simulations of flood hydrographs in the Lukovska River basin. Five flood events observed at the Merčez stream gauge were available for modelling purposes. These events are from two distinct periods and two seasons with different prevailing runoff generation mechanisms. Hence the events are assigned to either “present” or “past”, and “spring” or “summer” group. The optimal parameter sets of each group are obtained by averaging the optimal parameters for individual events within the group. To assess model transferability, its applicability for simulation of flood events which are not considered in the model calibration, a cross-validation is performed. The results indicate that model parameters vary across the events, and that parameter transfer generally leads to considerable errors in hydrograph peaks and volumes, with the exception of simulation of summer events with “spring” parameters. Based on these results, recommendations for event-based modeling are given.

Keywords: calibration, flood events, hydrologic models transferability, HEC-HMS, event-based modeling

INTRODUCTION

Hydrological (rainfall-runoff) models are a simplified representation of runoff generation in basins. Hydrologic models are widely used for flow forecasts, design flow estimation, which are used for e.g. the design of flood protection structures, analysis of urban drainage systems, water resources management in a basin, understanding of hydrological processes, etc. In other words, hydrologic models represent a necessary tool for water and environment resource management and because of that, the hydrologic models are expected to accurately reproduce the observed hydrologic variables. In addition to the accuracy of the simulation results, preferably hydrologic models should have as parsimonious structure as possible to facilitate their wide application (Gayathri et al., 2015).

Hydrologic models enable computation of hydrological variables, primarily discharge at the basin outlet, from the meteorological forcing (e.g.,

precipitation, temperature, potential evapotranspiration). The required input as well as the simulated hydrological variables depend on the particular model, i.e., different models require different data and simulate different variables (e.g., runoff, soil moisture, groundwater, actual evapotranspiration). In addition to state variables (e.g., soil moisture) and fluxes (e.g., flow, infiltration, evapotranspiration), model equations also include parameters. Some parameters can be determined from measurements (e.g. share of impermeable surfaces in a basin, riverbed slope, etc.), but most parameters can only be determined by the model calibration. Model calibration implies adjustment of the parameters in order to get the best possible agreement between simulated and observed variables (Beven, 2003).

The process of a hydrologic model development involves several phases. The first phase is the formation of a perceptual model (detection and

qualitative description of prevailing runoff generation processes). The second phase implies creation of a conceptual model (mathematical description of the perceptual model). The third phase is the formation of a procedural model (encoding the conceptual model). The last two phases of the model development are the model calibration and validation (Beven, 2012).

Currently, there are numerous hydrologic models, as well as their classifications. Concerning spatial heterogeneity, hydrologic models are classified as distributed, semi-distributed, and spatially lumped models. Spatially lumped models do not recognise any spatial heterogeneity, so basin area is represented by a single parameter set and the meteorological forcing is averaged over the whole basin area. In fully-distributed models, a basin is divided into computational cells (grid) and the hydrological variables are computed for each cell (Pechlivanidis et al., 2011). Semi-distributed hydrologic models imply basin delineation into sub-basins, and each sub-basin is attributed a lumped model (Jovanović, Radić, 1990). Sorooshian et al. (2008) had classified the models as event based and continuous models. Continuous model consists of various components intended for simulating various processes in a basin (e.g., interception, surface depression storage, infiltration losses, runoff transformation, snow melting, baseflow and hydrograph propagation). For the event-based modelling the processes such as interception, snow melt and evapotranspiration can be neglected due to relatively short simulation period (Ilić et al., 2018).

Parameter estimation is a great challenge in hydrologic modelling. Specifically, parameters are being optimised during model calibration to obtain the best fit between simulated and observed variables (commonly, only flow series). In other words, model calibration should result in the estimates of numerous parameters based on the observations of commonly only one hydrologic variable; hence, model calibration is referred to as an ill-posed optimisation problem. The optimisation ill-posedness is further augmented by the fact that model goodness-of-fit is usually represented by a single performance indicator, which is computed from the model residuals. This ill-posedness results in different parameter sets can yield the same model efficiency in the calibration period (equifinality),

however, they will result in quite divergent simulated variables over an independent period (Wagener et al., 2003). In addition to model performance indicators used for model calibration, parameter estimates are affected by observation uncertainties and calibration period, i.e., flood events in the case of event-based models (Beven, 2012). For example, parameters can be conditioned in the calibration to compensate for inconsistency between the measured rainfall and discharges (Beven, Westerberg, 2011). To enable proper parameter identification, sufficiently long and informative observation series are required. For example, simple, event-based models with up to four or five free parameters require at least 15 to 20 hydrographs for parameter identification. In cases of pronounced seasonal variability, even longer calibration periods or data on more flood events are needed (see, for example Kirkby, 1975; Gupta, Sorooshian, 1985; Hornberger et al., 1985).

This paper is about problems of event-based model calibration and its applicability to simulations of flood events from distinct periods and two seasons with different prevailing runoff generation mechanisms. The model is developed using the Hydrologic Engineering Centre-Hydrologic Modelling System (HEC-HMS), which was selected due to its flexibility and its successful applications across the world (McColl, Agget, 2007; Yusop et al. 2007). The calibration and cross-validation of the model over five flood events in the basin is performed. The results are analysed with respect to the transferability of model parameters across distant time periods and seasons, i.e., different prevailing runoff generation mechanisms.

MATERIAL AND METHODS

Basin and data

The Lukovska River basin is the right tributary of the River Toplica, which belongs to the South Morava River Basin. This basin is a representative example of a torrential basin dominated by steep slopes. The altitude in the basin ranges between 515 and 1652 m. The area of the basin amounts to 114.3 km² (Đukić, 2010).



Figure 1. The Lukovska River basin and meteorological stations

The pedological map of the basin shows that humus silicate soils cover 70% and the eutric brown soils on flysch cover 30% of the total basin area. The humus silicate soil is very shallow and retains a small amount of infiltrated precipitation, while a large portion of precipitation comprises surface overflow. Eutric brown soil can retain more water due to a larger profile thickness. Concerning vegetation, the forests are predominant in the basin covering ~80 % of the basin area, while the remaining area is covered by agricultural arable land, pastures, orchards and meadows (Đukić, 2010).

Merčez is a hydrological station at which daily flow observations have been available since 1960. The meteorological station Kuršumljija, at which precipitation is gauged by a pluviograph, is situated in the vicinity of the basin (Figure 1) (Đukić, 2010). The hourly flows at the Merčez hydrological station and the hourly precipitation from the Kuršumljija meteorological station are used for runoff simulations. Data on flood events in 1970s and data in the recent period from 2014 to 2016 were

made available for runoff simulations. Table 1. shows properties of the considered flood events, such as runoff volume (V_{ot}), maximum rate of runoff (Q_{max}) and runoff coefficient (η) and characteristics of the rainfall events (rainfall duration, t_k , total rain depth, P_{uk} , and average rainfall intensity, i_{sr}).

HEC-HMS hydrologic model

HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) is freely-available software for hydrologic simulations. This software provides users with great flexibility: namely, it enables event-based and continuous simulations, as well as development of lumped, semi- and fully-distributed hydrologic models (Todorović, Plavšić, 2013). In addition, HEC-HMS enables its users to develop their own model structure, depending on the available data and model application purposes. The HEC-HMS models generally include the following modelling components: canopy interception, surface retention, loss model (i.e. partitioning between runoff and infiltration), runoff transformation to direct runoff, baseflow model, and flow routing through stream network. A user can select a computation method for each modelling component, or even omit some components from the model (Feldman, 2000).

The HEC-HMS structure in this study is set according to the modelling purposes and available data. Considering that the Lukovska basin is small with a slight variation in land use and soil types, and that observations from only one meteorolog-

Table 1. Characteristics of considered flood and the causative rainfall events

Simulation period	t_k (h)	P_{uk} (mm)	i_{sr} (mm/h)	V_{ot} (mm)	Q_{max} (m ³ /s)	η (/)
07.05.1974. (08:00h) -11.05.1974. (23:00h)	12	41.51	3.77	15.54	9.2	0.37
05.06.1976. (00:00h) -08.06.1976. (05:00h)	47	80.44	1.71	25.33	34.6	0.32
21.08.1979. (07:00h) - 24.08.1979. (00:00h)	11	45.61	4.15	10.17	14.1	0.22
17.04.2014. (18:00h) -23.04.2014. (13:00h)	60	92.51	1.47	48.8	36.8	0.53
01.05.2016. (00:00h) - 10.06.2016. (06:00h)	79	70.46	0.72	39.81	11.1	0.57

ical station are available, a spatially lumped model setup is adopted. The model is developed to reproduce individual flood events (event-based model), thus model structure includes components intended for simulations of runoff volume, direct runoff, and baseflow. The canopy interception, surface retention, snow melt and evapotranspiration are omitted. The basin is at high altitudes, so spring flood events might be caused by a combination of precipitation and snow melt. However, the snow modelling component requires a long observation period to constrain snow-related model parameters. Therefore, snow component is usually part of the continuous models, and it is omitted from event-based models. In this paper, it is assumed that the presence of snow in the basin will be reflected in the parameters of the loss model (initial abstraction I_a and Curve Number CN), thus snow melt is indirectly accounted for in the model.

Simple, parsimonious methods are selected for runoff modelling in this paper. Runoff volume is simulated by employing the SCS (Soil Conservation Service) method, which is rather simple and often used in practice. Direct runoff is simulated with the Clark's Unit Hydrograph, which provides great flexibility. Baseflow is simulated with the recession method, which is simple and suitable for event simulation (Feldman, 2000). The methods employed are briefly described below.

The American agency Soil Conservation Service (SCS) developed a simple method for runoff volume computations, which relies on the assumption that the ratio between excess rainfall, P_e , (i.e., runoff) and potential excess rainfall ($P - I_a$) is equal to the ratio between the actual volume of water retained in the basin, F_a , and potential maximum retention, d , (e.g., Chow et al., 1988):

$$\frac{P_e}{P - I_a} = \frac{F_a}{d} \quad (1)$$

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (2)$$

$$I_a = \lambda \cdot d \quad (3)$$

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + d} = \frac{(P - I_a)^2}{P - (1 - \lambda) \cdot d} \quad (4)$$

$$d = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (5)$$

The value of Curve Number (CN) is related to land cover, soil type and antecedent moisture conditions (Chow et al. 1988). This model parameter affects the peak of the hydrograph: namely, a larger CN number causes larger peak flows, and vice-versa. Initial abstraction (I_a) generally includes canopy interception, surface retention, and rainfall infiltration prior to runoff onset, and it is estimated as a fraction of maximum basin retention. The CN values for average antecedent conditions that are commonly given in the literature refer to λ values of 0.2 (Woodward et al., 2003). However, it is noteworthy that literature suggests λ values should be estimated from the rainfall-runoff observations, if available (Petroselli et al., 2013; Wałęga, Rutkowska, 2015). The SCS method in HEC-HMS includes the following parameters: initial abstraction I_a (mm), Curve Number CN (-) and share of impervious area in the basin (*Impervious* (%)). The precipitation from the impervious areas is directly routed to the stream network, without any subsequent infiltration. If not specified, initial abstraction (in millimetres) is an automatically computed form the CN value and with λ value of 0.2 (Feldman, 2000).

The transformation of the excess rainfall into direct runoff at the basin outlet is simulated by using the Clark Unit Hydrograph (UH). This method simulates runoff translation to the basin outlet by employing the time-area curve, and runoff attenuation with the linear reservoir method, which includes the mass conservation equation (eq. 6) and the linear outflow equation (eq. 7).

$$\frac{dV(t)}{dt} = U(t) - I(t) \quad (6)$$

$$V(t) = R \cdot U(t) \quad (7)$$

where $U(t)$ denotes inflow in the reservoir at time t , $I(t)$ is the outflow from the reservoir, $V(t)$ denotes the reservoir storage at time t , and R the constant of the linear reservoir, which is a free model parameter. The Clark's method in HEC-HMS has two parameters: time of concentration, t_c (h), is needed for obtaining the time-area curve, while

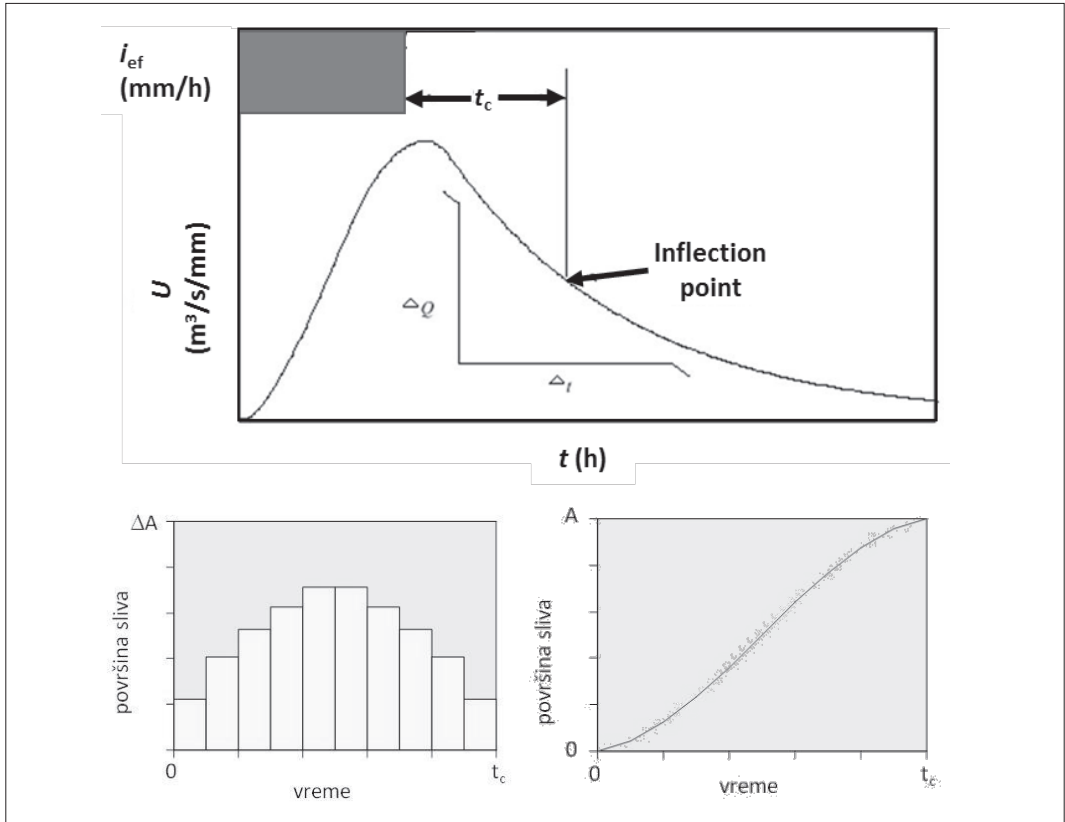


Figure 2. Clark unit hydrograph (top panel) and standard, built-in time-area curve in the HEC-HMS model (bottom panel)

the latter, R (h), represents temporary runoff retention in the basin.

Generally, the time of concentration represents the duration of water flow from the hydraulically remotest point in a basin from its outlet to the basin outlet. However, in the Clark UH method the time of concentration denotes the time elapsed from the end of net precipitation to the inflection point on the falling limb of the hydrograph (Straub et al., 2000; also see Figure 2). The time of concentration has to be specified in order to obtain time-area curve in the HEC-HMS model. Time-area curve in HEC-HMS can be obtained from a standard, dimensionless built-in curve (shown in Figure 2), or, alternatively, it can be user-specified. Generally, a time-area curve should be obtained for each basin taking into account its specific topography. Nevertheless, studies at the HEC have

shown that the standard, built-in curve time-area in the HEC-HMS, adjusted according to the basin-specific area and time of concentration can adequately represent various basin configurations and can yield satisfactorily accurate results of hydrologic simulations (Feldman, 2000). Therefore, built-in time-area curve in the HEC-HMS is used in this study.

Estimates of the Clark UH parameters (time of concentration t_c and storage coefficient R) are obtained through model calibration. However, initial estimates of these parameters are inferred by applying the empirical equations of Kirpich (1940) (8) and Clark (9), respectively:

$$t_c = 0.0663 \cdot \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} (h) \quad (8)$$

$$R = \frac{\alpha L}{\sqrt{S}}(h). \quad (9)$$

where L denotes the length of stream (in km), S represents the land slope of basin and α is coefficient (value varies from 0.4 to 1.4) (Kanak et al., 2015). Both model parameters affect hydrograph shape and, consequently, peak flow.

The baseflow recession model assumes that the falling limb of a hydrograph can be represented by the exponentially decreasing curve (Scharffenberg, Fleming, 2010):

$$Q_b = Q_0 \cdot k^t \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (10)$$

where Q_0 is the initial baseflow rate (initial condition), and k is the recession constant (a free model parameter). The recession constant defines the decrease of the baseflow and takes values between 0 and 1. Higher values of k imply a slight baseflow decrease, while at $k = 1$ the recession curve becomes a horizontal line. This method in HEC-HMS also requires specification of the hydrograph point, which is a starting point of the recession curve (Scharffenberg, Fleming, 2010). In this study, this point is specified as a flow that represents a ratio to peak flow. This method in HEC-HMS requires estimation of the following parameters: recession constant k and the ratio to peak. It should be noted that this baseflow method is not conservative, i.e. baseflow rates depend neither on soil water content nor groundwater storage. On the other hand, the identification of parameters of a more complex baseflow method requires long observation series that would necessarily include prolonged dry periods. Taking into account that the focus of this study is event-based modelling, more complex models are not considered and the recession method is adopted as a suitable method for the modelling purposes in this study.

Model calibration and assessment of its transferability

The considered five flood events (Table 1) are from two distinct periods (i.e., 1970s and 2010s) and from two different seasons (i.e., spring and

summer events) are considered for model calibration and cross-validation. Four groups of flood events are formed for the model calibration and cross-validation. The first group is referred to as “past”, and it includes events in 1974, 1976 and 1979, while the “present” group includes events in 2014 and 2016. The “spring” group includes the 1974, 2014 and 2016 events, while the “summer” group consists of the 1976 and 1979 events. Grouping flood events as past/present enables the assessment of model transferability in time, which can be hindered by changes in the basin, such as climatic changes and/or changes in land use (urbanisation, deforestation). Flood events that occurred in the springs were triggered by rainfall over saturated soil, and probably augmented by snow melt. On the other hand, floods during summers were caused by heavy, convective rain events of high intensity. To assess model transferability across different seasons and periods, the calibration and cross-validation of the HEC-HMS model over the distinct groups are performed.

In this study, the model parameters are manually adjusted (“trial-and-error” calibration) for each individual flood event to achieve the highest possible efficiency according to the selected performance measures outlined below. The optimal parameter set of a group of flood events is obtained by averaging parameters of all events within the group. In this way, four parameter sets are obtained: Θ_{past} , Θ_{present} , Θ_{spring} and Θ_{summer} . After model calibration, the past/present and spring/summer cross-validation is done, meaning that the parameter set optimised for one group of flood events is used to simulate flood events from the complementary group.

The model efficiency is represented by the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NS), and errors in hydrograph peak magnitude (eq. 12), in runoff volume (eq. 13), and in peak timings (eq. 14). These performance measures are selected to quantify different aspects of model performance (e.g. runoff dynamics and volume).

The Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NS) is calculated using the following equation:

$$NS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (Q_{\text{sim},i} - Q_{\text{osm},i})^2}{\sigma_{\text{osm}}^2} (-) \quad (11)$$

where N denotes the length of the flow series, $Q_{sim,i}$ (m^3/s) is simulated flow, $Q_{osm,i}$ (m^3/s) is observed flow and σ_{osm} is the standard deviation of the observed flow series. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficient takes values from 1 to $-\infty$: 1 indicates a perfect match, while values below 0 indicate unacceptable model performance. For continuous models with daily time step, NS values above 0.4 indicate satisfactory, and values above 0.75 very good model performance (Moriasi et al., 2007). There are not such recommendations for event-based models that run with hourly time step, however, these models are generally expected to yield higher NS values than daily, continuous models. Errors in hydrograph peak magnitude and timing are calculated as follows:

$$\varepsilon_{peak} = \frac{Q_{sim} - Q_{osm}}{Q_{osm}} \cdot 100\% \quad (12)$$

Errors in the runoff volume are defined by the equation below:

$$\varepsilon_V = \frac{V_{sim} - V_{osm}}{V_{osm}} \cdot 100\% \quad (13)$$

Errors in peak timings are defined by the following equation:

$$\varepsilon_t = t_{sim} - t_{osm} (h) \quad (14)$$

Positive values in peak timing error suggest that simulated peak flow is delayed compared to the observed one and vice-versa.

RESULTS AND DISCUSSION

Optimal parameter sets are obtained for each group of flood events. As shown in Table 2, many parameters considerably vary across the events. The largest variability is shown by initial loss (I_a), which is expected since antecedent conditions in the basin are event-specific. Variations in this parameter show no apparent pattern (e.g., between spring or summer events). The curve number CN

also exhibits a great variability: for example, CN value of individual events varies between 60 and 81.30. Higher CN values were obtained for the “spring” group, and its subset the “present” group. Rain events are frequent in spring, and together with snow melting cause high soil water content, which corresponds to larger CN values. Conversely, soil is generally drier and with greater infiltration capacity during summers, which corresponds to lower CN values in the “summer” group. The Lukovska basin is small with estimated time of concentration for the Clark UH between 1.5 h and 2 h. There was no significant urbanisation in the basin, which is consistent with the small differences in the estimates of the time of concentration for the Clark UH, particularly between the “present” and “past” parameter sets. There are considerable variations in the estimates of the reservoir coefficient R across the events, as well as large discrepancies from the estimated time of concentrations. Generally, these parameters of the Clark UH are expected to be approximately equal, although large discrepancies between them have been reported in literature (Straub et al., 2000; Che et al., 2014). Great differences between the estimates of R and t_c obtained in this study can be attributed to the runoff simulations from rainfall observations at only one meteorological station, whereby spatial rainfall distribution and temporal pattern might not be properly captured and represented in the model. Since runoff dynamics is greatly affected by rainfall pattern, any discrepancies between these patterns would inevitably reflect in the model parameters related to runoff dynamics (i.e., the Clark UH parameters). In other words, model calibration in such cases yields parameter estimates that can mitigate discrepancies between rainfall and runoff dynamics as much as possible. These results reveal a great sensitivity of runoff dynamics-related parameters to input data quality (primarily to the quality of precipitation and flow observations) in hydrologic models running with hourly time step. Baseflow-related parameters show relatively low variability across the events: all calibrations resulted in the ratio to peak value of 0.3, while the recession constant ranges from 0.90 to 0.999.

Table 2. Optimised parameters for the four groups of flood events

Group name	Flood event	Loss model		Transformation of eff. precip. in direct runoff		Baseflow	
		I_a (mm)	CN (-)	t_c (h)	R (h)	k (-)	Ratio (-)
past	1974	0	74	2	50	0.999	0.30
	1976	8	60	2	11.90	0.90	0.30
	1979	8	60	2	11.20	0.90	0.30
	AVERAGE	5.33	64.67	2	24.37	0.933	0.3
present	2014	10	81.30	1.5	20	0.999	0.30
	2016	0	70	2	20.20	0.95	0.30
	AVERAGE	5	75.65	1.75	20.10	0.975	0.3
spring	1974	0	74	2	50	0.999	0.30
	2014	10	81.30	1.5	20	0.999	0.30
	2016	0	70	2	20.20	0.95	0.30
	AVERAGE	3.33	75.10	1.83	20.20	0.983	0.3
summer	1976	8	60	2	11.90	0.90	0.30
	1979	8	60	2	11.20	0.90	0.30
	AVERAGE	8	60	2	11.425	0.90	0.30

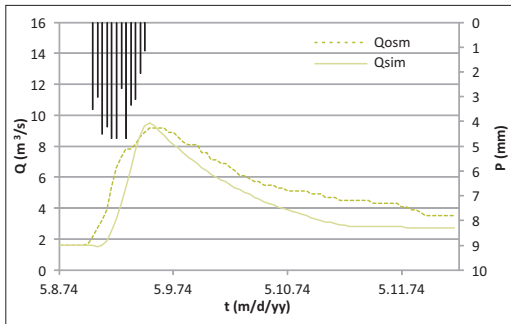


Figure 3. Observed vs. simulated hydrograph for the event 1974 (past)– model calibration

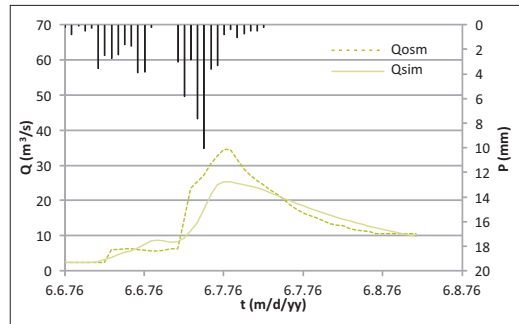


Figure 4. Observed vs. simulated hydrograph for the event 1976 (past) – model calibration

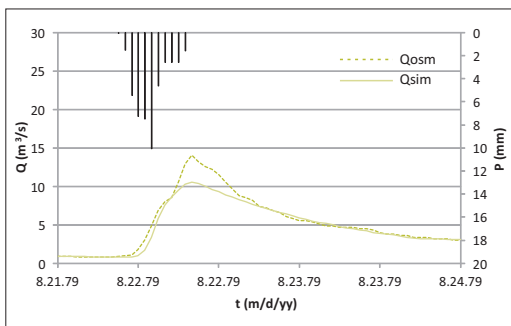


Figure 5. Observed vs. simulated hydrograph for the event 1979 (past) – model calibration

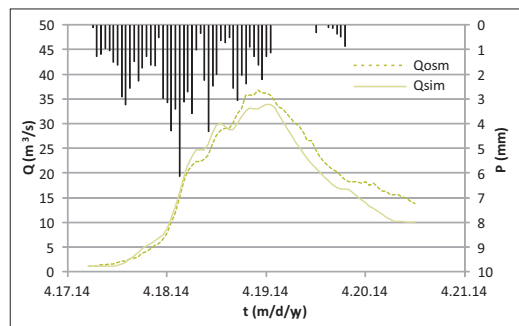


Figure 6. Observed vs. simulated hydrograph for the event 2014 (present) – model calibration

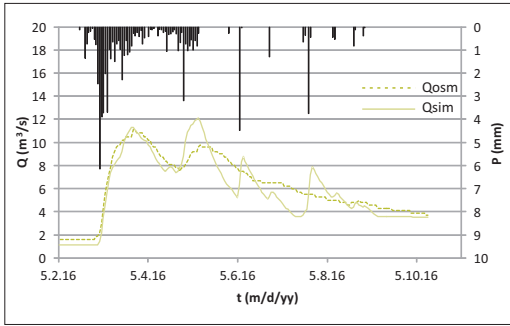


Figure 7. Observed vs. simulated hydrograph for the event 2016 (present) – model calibration

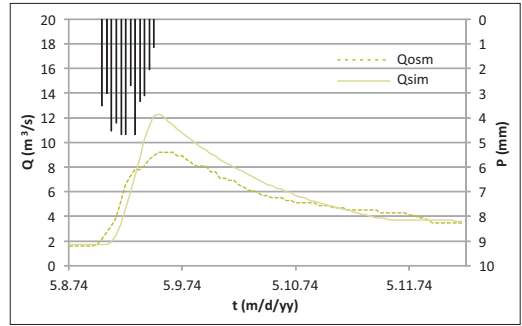


Figure 8. Observed vs. simulated hydrograph for the event 1974 (spring) – model calibration

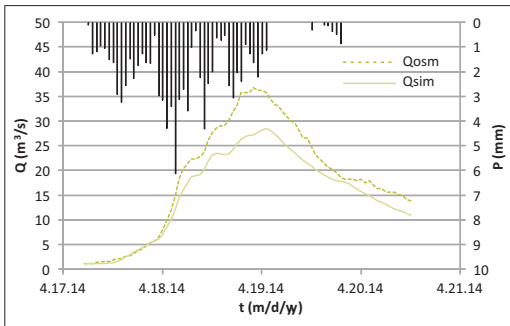


Figure 9. Observed vs. simulated hydrograph for the event 2014 (spring) – model calibration

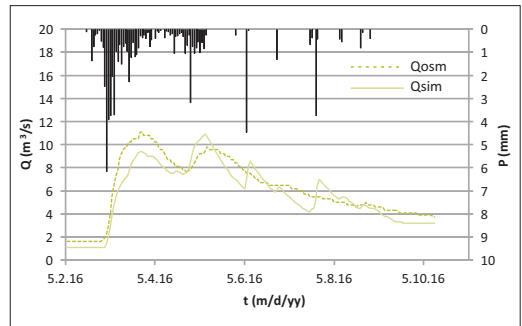


Figure 10. Observed vs. simulated hydrograph for the event 2016 (spring) – model calibration

Table 3. Model performance over the calibration

Group	Flood event	NS (-)	ϵ_{peak} (%)	ϵ_V (%)	ϵ_t (%)
past	1974	0.781	3.26	-18.85	0
	1976	0.877	-26.60	-6.83	0
	1979	0.932	-24.82	-8.46	0
	AVERAGE	0.863	-16.05	-11.38	0
present	2014	0.938	-7.90	-8.25	+3
	2016	0.864	9	-6.05	+11
	AVERAGE	0.901	0.55	-7.15	+7
spring	1974	0.821	33.70	1.24	0
	2014	0.856	-22.55	-17.82	+3
	2016	0.885	-1.80	-8.82	+11
	AVERAGE	0.854	3.12	-8.47	+4.67
summer	1976	0.956	2.53	-0.40	0
	1979	0.932	-1.42	-4.52	0
	AVERAGE	0.944	0.555	-2.46	0

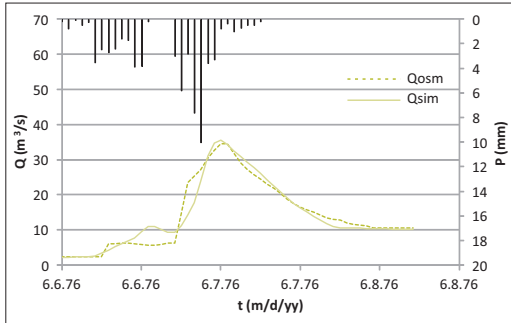


Figure 11. Observed vs. simulated hydrograph for the event 1976 (summer) – model calibration

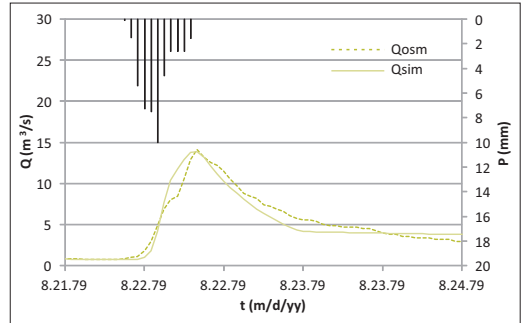


Figure 12. Observed vs. simulated hydrograph for the event 1979 (summer) – model calibration

Model performance measures during the calibrations, presented in Table 3, indicate that the model performs differently across the events, and with respect to different measures. Values of the NS greater than 0.8, which are obtained in calibration over almost all events, suggest quite good model performance. Peak flows and runoff volumes are overestimated or underestimated, with rather pronounced discrepancies in some events of the “past” and “spring” group despite high NS values. Interestingly, peak flows during 1976 and 1979 events are accurately reproduced with the “summer” parameter set, as opposed to the “past” set that resulted in unacceptably large peak flow underestimation, which is not good for a flood event model. Runoff volume is generally well reproduced in the calibrations, with few exceptions with volume bias above 10%. The model also accurately reproduced peak timings, except for the 2016 event. It should be noted, however, that errors in timing can be caused by the hyetograph and spatial distribution of the rainfall, not only by

the hydrologic model. The variation in model efficiency is more pronounced within the group “past” and “present”, than in the “spring” and “summer” group. This indicates that the runoff generation mechanisms and the antecedent conditions in the basin are similar over the spring and summer events, which resulted in better efficiency and lower parameter variability.

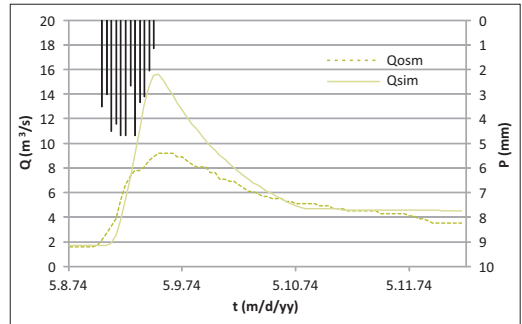


Figure 13. Model validation: simulation of the “past” flood event in 1974 with the Θ_{present} parameter set

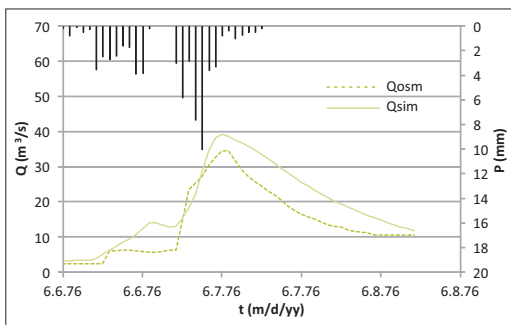


Figure 14. Model validation: simulation of the “past” flood event in 1976 with the Θ_{present} parameter set

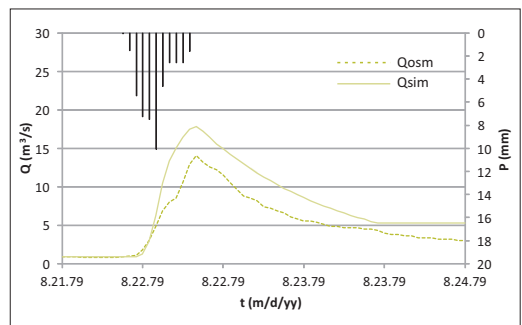


Figure 15. Model validation: simulation of the “past” flood event in 1979 with the Θ_{present} parameter set

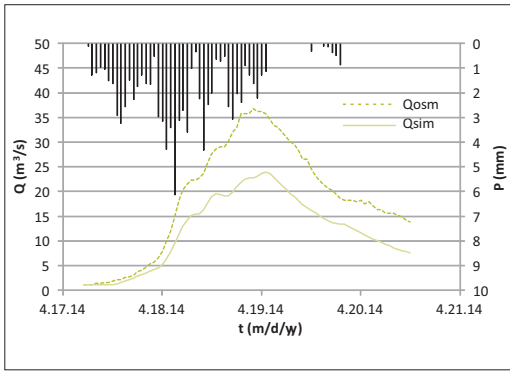


Figure 16. Model validation: simulation of the “present” flood event in 2014 with the Θ_{past} parameter set

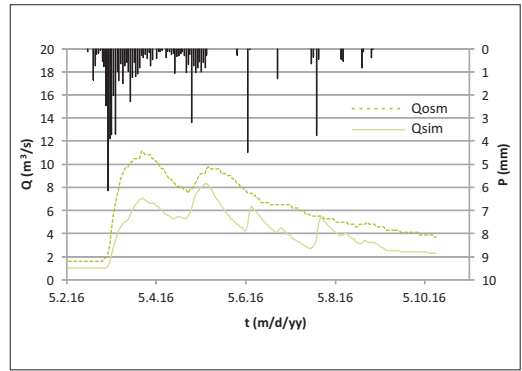


Figure 17. Model validation: simulation of the “present” flood event in 2016 with the Θ_{past} parameter set

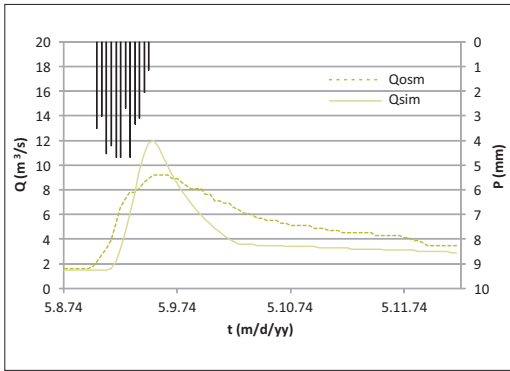


Figure 18. Model validation: simulation of the “spring” flood event in 1974 with the Θ_{summer} parameter set

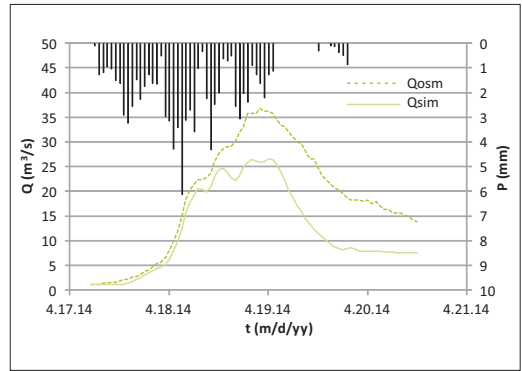


Figure 19. Model validation: simulation of the “spring” flood event in 2014 with the Θ_{summer} parameter set

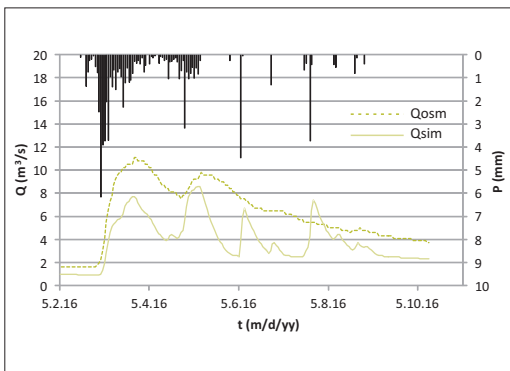


Figure 20. Model validation: simulation of the “spring” flood event in 2016 with the Θ_{summer} parameter set

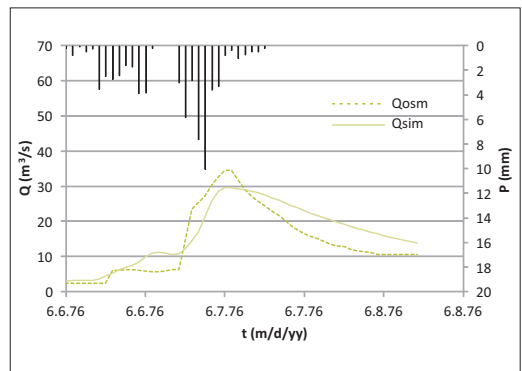
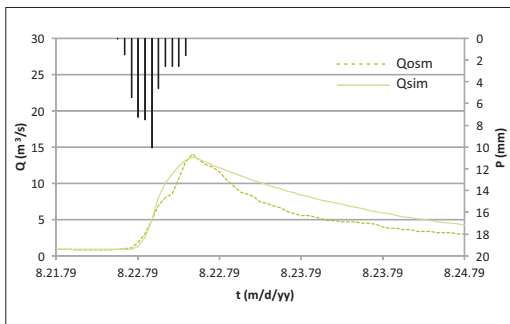


Figure 21. Model validation: simulation of the “summer” flood event in 1976 with the Θ_{spring} parameter set

Table 4. Model performance over the validation

Calibration / validation	Flood event	NS (-)	$\epsilon_{peak}(\%)$	$\epsilon_V(\%)$	$\epsilon_t(\%)$
present / past	1974	0.442	69.60	17.63	0
	1976	0.737	13.29	33.16	0
	1979	0.485	26.24	40.41	0
	AVERAGE	0.555	36.37	30.40	0
past / present	2014	0.533	-35.05	-34.60	+3
	2016	0.411	-25.23	-33.23	+11
	AVERAGE	0.472	-30.14	-33.92	+7
summer / spring	1974	0.639	30.44	-19.05	-1
	2014	0.490	-28.0	-34.62	+2
	2016	0.171	-22.52	-37.08	+10
	AVERAGE	0.433	-6.69	-30.25	+3.67
„spring“ / „summer“	1976	0.837	-14.16	16.15	0
	1979	0.793	-3.55	25.17	0
	AVERAGE	0.815	-8.86	20.66	0

**Figure 22.** Model validation: simulation of the “summer” flood event in 1979 with the Θ_{spring} parameter set

The validation results shown in Table 4 indicate a decrease in model efficiency compared to the calibration results. Most importantly, NS takes positive values in all validations, which indicates that the model is acceptable. Greater bias in peak flows than in calibration is observed, particularly in transfers between “present” and “past” events. None of the transfers resulted in acceptably accurate reproduction of runoff volumes (i.e., absolute values of bias greatly exceed 10%). As for peak timings, the results are comparable to those during calibrations, which suggest that this performance measure is primarily affected by hydrograph, i.e., proper representation of rainfall temporal and spatial distribution.

The model is shown sensitive to the change in parameters CN, t_c and R. These parameters significantly affect the key characteristics of flood hydrographs: volume, peak, and shape of the hydrograph. According to the performance measures (Table 4), the events in 1976 and 1979 are singled out with the best results. The “spring”/“summer” parameter transfer results in better model performance than the past/present. Hence, the model parameters transferability over different periods of the year is slightly better than over remote time periods. Such behaviour can be attributed to the high CN and R values of the “spring” set, which resulted in a similar model to the performance as the “summer” set with lower CN and R values. This can indicate that these two parameters compensate their effects on simulated hydrographs, i.e. that parameter equifinality (Beven, Binly, 1992) is present event in parsimonious models, such as the event-based model used in this study. These results also suggest that parameters generally should not be transferred across time-distant flood events, despite unchanged land cover in the basin.

It should be noted that these results are obtained from only five flood events in a single basin. Therefore, these conclusions should be tested in simulations of numerous flood events from various basins (e.g., from different climates).

CONCLUSIONS

The modelling of flood events is important for the estimation of design flows for hydraulic structures (e.g., dams) or for flood protection, considering that floods pose a threat to the population as well as to the environment.

This paper presents a development of a HEC-HMS event-based hydrologic model intended for simulations of flood events in the Lukovska basin. The model is used to analyse model transferability across time distant periods, and across flood events from different seasons (spring and summer), i.e., different prevailing runoff generation mechanisms. In this way, the transferability of the model over time (under similar conditions in the basin), the influence of urbanization or climate change can be determined.

Significant parameter variability across the flood events is shown, despite unchanged land cover in the basin. The highest variability is detected in the following parameters: Curve Number (CN), linear reservoir storage coefficient (R) and initial abstraction (I_a). A decrease in model performance in validation indicates that the model is sensitive to changes in parameters, i.e., to parameter transfer across events. However, in the case of the Lukovska basin, results indicate that categorising of flood events according to the dominant flow-forming mechanisms, i.e., seasons, results in slightly better transferability than according to the period of their occurrence.

Since the greatest floods in this basin occur in spring months, the "spring" parameter set is recommended for the estimation of design flows with design storms. The group of parameters from past and present events are recommended for thorough analyses of the impacts of climate and other changes in the basin. Considering that parameter transfer across time-distant periods results in underestimation of peak flows, the parameter set obtained from the most recent events recommended for flood forecast purposes.

The results presented in this paper reveal great uncertainties in hydrologic modelling of flood events, as well as a great model sensitivity to the quality of input data. Therefore, for the improvement of event-based models, reliable data are essential, which require well-equipped basins. Spe-

cifically, observation network should accompany basin topography, i.e., more gauging stations are needed in basins with a distinct topography (e.g., mountainous basins). Additionally, long series of observed precipitation and flows that would include numerous flood events are needed. This is the first step on the way to improve calibration and transferability of event-based models for the simulations of flood events. For these reasons, it is important to form more experimental basins and to improve the data acquisition systems. Further research is needed to improve the calibration of event-based models. Specifically, it should be examined whether the averaging of optimal parameters obtained for individual flood events within the group is a good way to determine the parameters of the event-based model. Additionally, the calibration of these models could benefit from the application of robust optimisation methods, and the inclusion of different flood events in the calibration.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Beven K. (2012): *Rainfall-Runoff Modelling The Primer* (second edition), Lancaster University, UK, John Wiley & Sons, Chichester, England
- Beven K. J. (2003): *Rainfall - Runoff Modelling The Primer*: John Wiley & Sons, Chichester, England
- Beven K. J., Westerberg I. (2011): On red herrings and real herrings, Disinformation and information in hydrological inference, *Hydrological Processes*, 25: 1676–1680
- Beven K., Binley A. (1992): The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction, *Hydrological Processes* 6, pp. 279–298
- Che, D., Nangare, M., Mays, L.W., 2014. Determination of Clark's Unit Hydrograph Parameters for Watersheds. *J. Hydrol. Eng.* 19, 384–387. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000796
- Chow V. Te, Maidment D. R., & Mays L. W. (1988): *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Book Company
- Đukić, V. (2010): Hidrauličko-hidrološki model genzeitransportanosa u slivu, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

- Feldman A. D. (2000): Hydrologic Modeling System HEC-HMS – Technical Reference Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Gayathri K Devi, Ganasri B P, Dwarakish G S (2015): A Review on Hydrological Models, International conference on water recourses, coastal and ocean engineering (ICWRCOE 2015)
- Gupta H. V., Sorooshian S. (1985): The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrologic models, *Journal of Hydrology*, 57-77
- Hornberger G. M., Beven K. J., Cosby B. J., Sappington D. E. (1985): Shenandoah watershed study: Calibration of the topography-based, variable contributing area hydrological model to a small forested catchment, *Water Resources Research* 21, 1841-1850
- Ilić A., Plavšić J., Radivojević D. (2018): Rainfall-Runoff simulations for design flood estimation in small river catchments, *FACTA UNIVERSITATIS*: 29-43
- Jovanović S., Radić Z. (1990): Parametarska hidrologija, Građevinski fakultet u Beogradu
- Kanak K. K., Sung-Kee Y., Jun-Ho Lee (2015): Assessing Unit Hydrograph Parameters and Peak Runoff Responses from Storm Rainfall Events: A Case Study in Hancheon Basin of Jeju Island, *Journal of Environmental Science International*, 437-447
- Kirkby M. J. (1975): Hydrograph modeling strategies. In Peel R., Chisholm M., Haggett P. (eds.) *Process in Physical and Human Geography*, Heinemann, 69-90
- McColl C., Aggett G. (2007): Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use decision support, *J Environ Manage* 84: 494-512.
- Moriasi D. N., Arnold J. G., Liew M. W., Van Binger R. L., Harmel R. D., & Veith T. L. (2007): Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), pp. 885–900.
- Pechlivanidis I., Jackson B., McIntyre N., Wheeler H. (2011): Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications, *Global NEST Journal*
- Petroselli A., Grimaldi S., Romano N. (2013): Curve-Number/Green-Ampt mixed procedure for net rainfall estimation: a case study of the Mignone watershed, IT, *Procedia Environmental Sciences* 19, pp. 113-121.
- Plavšić J. (2011): Modelipadavine-otica, Predavanja sakursalnženjerskahidrologija, Građevinski-fakultetUniverziteta u Beogradu
- Scharffenberg W. A., Fleming M. J. (2010): Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center
- Sorooshian S., Hsu K., Coppola E., Tomassetti B., Verdecchia M., Visconti G. (2008): Hydrological Modelling and The Water Cycle: Coupling the Atmospheric and Hydrological Models, *Water Science and Technology Library*
- Straub, T.D., Melching, C.S., Kocher, K.E., 2000. Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois. U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Urbana, Illinois.
- Todorović A., Plavšić J. (2013): Analiza mogućnosti primene modela HEC-HMS za kontinualne hidrološke simulacije, Seminarski rad iz predmeta Determinističkih hidroloških modeli, GrađevinskifakultetUniverziteta u Beogradu
- Wagener, T., McIntyre, N., Lees, M.J., Wheeler, H.S., Gupta, H. V., (2003): Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: dynamic identifiability analysis. *Hydrol. Process.* 17, 455–476. doi:10.1002/hyp.1135
- Walega A., Rutkowska A. (2015): Usefulness of the Modified NRCS-CN Method for the Assessment of Direct Runoff in a Mountain Catchment, *ActaGeophysica* vol. 63, pp. 1423-1446
- Woodward D. E., Hawkins R. H., Hjelmfelt A. T. J., Quan, Q. D. (2003): Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio, *World Water & Environmental Resources Congress 2003*, P. Bizier, and P. DeBarry, eds., ASCE, Philadelphia, Pennsylvania, pp.1-10.
- Yusop Z., Chan CH, Katimon A. (2007): Runoff characteristics and application of HEC-HMS for modelling stormflow hydrograph in an oil palm catchment, *Water SciTechnol* 56: 41-48.

