

Ранка Ерић¹, Весна Ђукић¹, Невена Анђелић²

Поређење метода Clark-овог и Snyder-овог јединичног хидрограма за моделирање површинског отицаја

Comparison of Clark and Snyder Unit Hydrograph methods for surface runoff modeling

¹ Универзитет у Београду, Шумарски факултет

² Енергопројект, Ентел, Београд

Извод

У раду је анализирана примена две методе за моделирање површинског отицаја на сливу реке Обнице. Хидролошки модел формиран је помоћу софтверског пакета HEC-HMS (Hydrologic Engineering Centre-Hydrologic Modelling System) и укључује моделирање процеса инфилтрације (губитака) и модел трансформације ефективне кише у површински (директни) отицај. За модел губитака коришћена је SCS (Soil Conservation Service) метода, а директни отицај симулиран је помоћу две методе, Clark-овог и Snyder-овог јединичног хидрограма. На основу девет поплавних таласа урађена је калибрација и валидација оба модела. Ефикасност модела представљена је помоћу Nash-Sutcliffe коефицијента (NS), грешке у пика хидрограма (ε_p), грешке у запремини отицаја (ε_v), грешке у времену појаве пика хидрограма (ε_t), коефицијента детерминације (R^2) и коефицијента корелације (r) између осматраних и симулираних протока. Оцене модела се налазе у прихватљивом опсегу и према резултатима Snyder-ов јединични хидрограм се показао ефективнији у симулацији таласа током калибрације, а Clark-ов јединични хидрограм током валидације.

Кључне речи: површински отицај, јединични хидрограм, велике воде, HEC-HMS

Abstract

This paper analyzes the application of two methods for surface runoff modeling in the Obnica River basin. The hydrological model is developed using the HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) software package. It includes the infiltration model and the model of the transformation of excess rainfall into the surface (direct) runoff. The SCS (Soil Conservation Service) method is used for the loss model, and the direct runoff is obtained by using two methods, Clark's and Snyder's Unit Hydrograph. The model calibrations and validations are performed on the basis of nine observed flood events. The model efficiency is evaluated by the Nash-Sutcliffe coefficient (NS), the error in the peak hydrograph (ε_p), the error in the volume of runoff (ε_v), the error in time of the peak hydrograph occurrence (ε_t), the coefficient of determination (R^2) and the correlation coefficient (r) between observed and simulated flows. The model estimates are in the acceptable range and, according to the results, the Snyder Unit Hydrograph is more effective during the calibration, and the Clark Unit Hydrograph during the validation.

Keywords: surface runoff, unit hydrograph, flood events, HEC-HMS

Увод

У последње време поплаве и велике воде су веома честа појава. Услед великих киша или топљења снега, као и комбинованим дејством обе наведене појаве, може доћи до екстремних водостаја и протока. Најозбиљније поплаве у нашој земљи настају првенствено као последица киша и топљења снега, мада ни друге узроке не треба потцењивати. Познавање и прогнозирање великих вода веома је важно за димензионисање хидротехничких објеката и од пресудне је важности са гледишта економичности изградње истих. Још важније, изградњом ових објеката се директно утиче на сигурност и заштиту становништва и животне средине од поплава.

Моделирање великих вода, тј. развијање хидролошких модела сливова, све чешће представља део студија за унапређење заштите од вода и самог управљања водама (2016, 2017). Хидролошки модели представљају поједностављене представе хидролошких процеса у природи. Са гледишта хидролошких појава модели се деле на моделе за симулирање изолованих поплавних таласа (моделе епизоде) и моделе за континуално симулирање хидрограма отицаја у дужем временском периоду (Jovanović, Radić, 1990). Према просторној хетерогености хидролошки модели се деле на дистрибуиране (расподељени параметри), семи-дистрибуиране (делимично расподељени параметри) и хомогене (интегрисани параметри) моделе (Jovanović, Radić, 1990).

Површински (директни) отицај је једна од главних компоненти хидролошког циклуса и представља већински део укупног хидрограма отицаја који настаје од ефективних падавина (Jovanović, Radić, 1990). Површински отицај се још назива и брзи отицај, који иде директно у водоток при чему је и најодговорнији за настанак великих вода (Jovanović, Radić, 1990). Мередавна вредност протока, важна за димензионисање објеката, се добија на основу максималних вредности отицаја (Plavšić *et al.*, 2019). Према томе, треба бити пажљив у одабиру методе за моделирање директног отицаја како би се ова компонента хидролошког циклуса што верније симулирала.

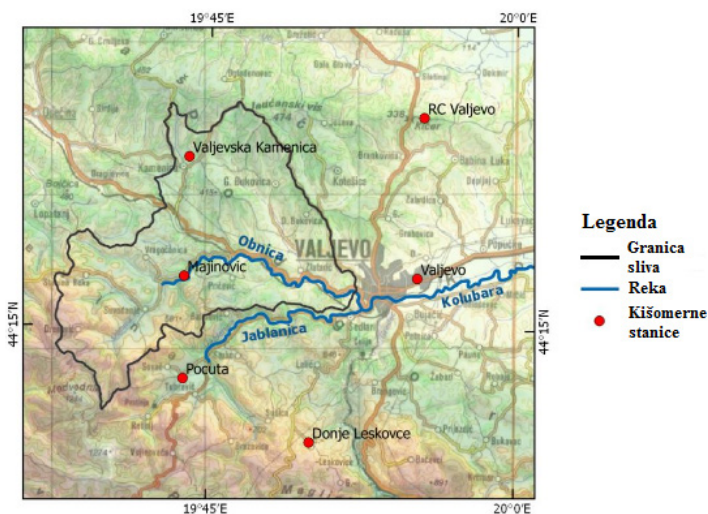
У саставу софтверског пакета HEC-HMS постоје различите методе за моделирање директног отицаја и великој мери су примењиване током досадашњих истраживања. Користе се како за изучене тако и за неизучене сливове (Ilić *et al.*, 2018, Petroselli *et al.*, 2013, King *et al.*, 1999, Adib *et al.*, 2011). Walega, 2011 је поредио Clark-ов и Snyder-ов j.x. (јединични хидрограм) и показао да су оба модела подједнако ефикасни у симулацији површинског отицаја, са препоруком да се Snyder-ов j. x. користи у практичној примени.

Циљ овог рада јесте да се оцени могућност Clark-овог и Snyder-овог јединичног хидрограма за симулацију директног отицаја на сливу реке Обнице. Помоћу софтверског пакета HEC-HMS (Hydrologic Engineering Centre-Hydrologic Modelling System) формирана су два хомогена хидролошка модела. Ови модели слива реке Обнице се разликују само по примењеним методама за моделирање директног отицаја, а губици су код оба модела симулирани методом SCS (Soil Conservation Service). На основу девет епизодних догађаја извршена је калибрација и валидација модела. Као параметри ефикасности за оба модела усвојени су: Nash-Sutcliffe коефицијент (NS), грешка у пик хидрограма (ϵ_p), грешка у запремини отицаја (ϵ_v), грешка у времену појаве пика хидрограма (ϵ_t), коефицијент детерминације (R^2) и коефицијент корелације (r). Поређењем добијених хидрограма и показатеља ефикасности, указано је која од метода, Clark-ов или Snyder-ов јединични хидрограм, је ефикаснија за трансформацију ефективне кише у директни отицај.

Методологија и материјал

Опис слива, хидролошке и метеоролошке подлоге

Река Обница припада сливу реке Колубаре, где честе поплаве и велике штете од поплава у сливу реке захтевају унапређење система за заштиту од вода. Из тих разлога слив реке Обнице, до водомерне станице Бело поље, је одабран као подручје истраживања у оквиру овог рада (слика 1). Површина слива износи 185 km^2 , надморске висине на сливу се крећу од 200-300 mm у алувијалним долинама реке, а до 1100-1300 mm у вишим деловима слива (Đukić, 2006). Дужина реке Обнице износи око 25 km, а просечан нагиб главног тока је 2.61 % (Ilić *et al.*, 2018). Већи део површине слива прекривен је пропусним површинама (ливаде, шуме, воћњаци, и сл.), а мањи део разматраног слива заузимају голети и урбанизоване површине (Đukić, 2006).



Слика 1. Слив реке Обнице (Plavšić *et al.*, 2019)
Figure 1. The Obnica River basin (Plavšić *et al.*, 2019)

Од хидролошких података доступно је девет осматраних таласа великих вода реке Обнице који су преузети из литературе (Petrović, 1996). На осматраним таласима претходно је издвојен директни од базног отицаја. Од метеоролошких података, кишне епизоде су одређене као просечне падавине на сливу на основу плувиографских записа са станица Ваљево и Лозница, такође преузете из литературе (Petrović, 1996). Временски корак улазних података износи 30 минута. Графички приказ осматраних таласа и одговарајућих киша приказан је кроз резултате калибрације и валидације модела. У табели 1 су приказане основне карактеристике епизода (P - висина падавина, P_{ef} – ефективна киша, Q_{max} – максимални проток, V_{oteklo} – запремина ефективне кише, $PP5$ – висина падавина претходних пет дана).

Табела 1. Основне карактеристике осматраних таласа и кишних епизода
Table 1. The basic characteristics of the observed flood events and the rain episodes

Датум	Шифра таласа	Шифра кише	P (mm)	P_{ef} (mm)	T_k (h)	Q_{max} (m ³ /s)	V_{oteklo} (m ³)	PP5 (mm)	Коеф. отицаја (%)
21.06.1978.	Q059	K06	22.5	4.2	10.5	21.8	772.8	15.2	18.6
20.05.1980.	Q0692	K152	20.3	4.1	10.0	14.9	766.0	29.5	20.4
05.06.1980.	Q070	K16	21.4	4.9	6.5	27.1	903.6	16.4	22.8
17.06.1981.	Q075	K18	32.7	5.8	31.0	17.1	1078.0	7.7	17.8
15.04.1985.	Q086	K27	74.8	56.8	59.5	105.2	10504.0	15.3	75.9
27.08.1985.	Q087	K28	94.6	24.4	34.0	112.0	4519.1	54.0	25.8
11.06.1986.	Q090	K29	29.4	10.9	6.0	77.3	2022.0	24.3	37.1
05.05.1987.	Q093	K32	72.3	32.9	31.5	80.2	6093.7	30.7	45.6
20.05.1987.	Q094	K33	46.0	29.0	29.5	59.9	5373.4	36.5	63.2

HEC-HMS хидролошки модел

Софтверски пакет HEC-HMS намењен је моделирању отицаја са слива и веома је заступљен у хидролошком моделирању великих вода. У зависности од сложености модела и количине параметара добијају се поуздане и мање поуздане анализе великих вода. HEC-HMS омогућава израду модела епизода и континуалне хидролошке симулације. Ово својство HEC-HMS-а пружа велику флексибилност и омогућава да се структура модела прилагоди расположивим подацима и потребама (Todorović, Plavšić, 2013). Поред тога, омогућен је и развој хомогених, семи-дистрибутивних и дистрибутивних хидролошких модела. HEC-HMS модел генерално представља моделирање компоненти као што су: интерцепција, површинско задржавање воде, модел губитака (тј. раздвајање на отицај и инфилтрацију), трансформација ефективних падавина у површински отицај, базни отицај и пропација таласа у водотоцима (Feldman, 2000).

С обзиром на то да слив реке Обнице према величини припада мањим сливовима, са мањим варијацијама у намени и типовима земљишта (Ђukić, 2006), у овом раду усвојен је хомоген тип модела. Модел је развијен за моделирање отицаја од изолованих поплавних догађаја (модел епизода) и укључује моделирање процеса инфилтрације (губитака) и модел трансформације ефективне кише у директни отицај. У питању је модел епизода, па су интерцепција, површинско задржавање воде, топљење снега и евапотранспирација занемарени. Због великих надморских висина постоји могућност да пролећни поплавни таласи буду узроковани комбинацијом падавина и топљењем снега. Међутим, компонента снега је обично део континуалних модела и занемарује се код модела епизода. Претпоставља се да ће се присуство снега у сливу одразити на параметре модела губитака (почетни губитак I_a и број CN криве), тако да се у овом моделу епизода индиректно обрачунава и топљење снега.

Запремина отицаја (модел губитака) јес имулирана SCS методом. Ова метода је прилично једноставна и често се користи у пракси. Трансформација ефективне кише у директни отицај је симулирана Clark-овим и Snyder-овим јединичним хидрограмом. Обе методе пружају велику флексибилности једноставност примене (Feldman, 2000).

SCS методу за прорачун функције губитака је развила Америчка агенција Soil Conservation Service (SCS), која се ослања на претпоставку да је однос стварне висине ефективне кише P_e (тј. отицај) 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 CN криве зависи од намене земљишта, типа земљишта и претходне влажности земљишта (Chow *et al.*, 1988). Почетни губитак (I_a) обично укључује интерцепцију, површинско задржавање воде и инфилтрацију кише пре формирања отицаја. Процењује се као део максималног капацитета тла (3). 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 литература предлаже да се вредност параметра λ треба проценити из осматрених падавина и отицаја, ако су доступни (Walega, Rutkowska *et al.*, 2015, Petroselli *et al.*, 2013). SCS метода у HEC-HMS-у укључује следеће параметре: почетни губитак I_a (mm), број CN криве (-) и удео непропусних површина на сливу (*Impervious* (%)). Ако није специфицирано, почетни губитак (у милиметрима) се аутоматски рачуна из вредности CN броја, са вредношћу λ од 0.2 (Feldman, 2000).

Метода Clark-овог јединичног хидрограма симулира транслацију отицаја до излазног профила слива помоћу криве време-површина, а ублажење отицаја се симулира методом линеарног резервоара, која укључује једначину континуитета (6) и једначину линеарног резервоара (7) (Feldman, 2000).

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

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

где је: $U(t)$ доток у резервоар у тренутку t , $I(t)$ излаз из резервоара у тренутку t , $V(t)$ запремина у резервоару у тренутку t и R константа линеарног резервоара, која је и параметар модела. Clark-ова метода у HEC-HMS-у захтева два параметра: време концентрације, t_c (h), и константу линеарног резервоара, R (h) (Feldman, 2000). Почетне вредности t_c и R , које су коришћене као оријентационе вредности на почетку калибрације, одређене су помоћу емпиријских израза Kirpich-a (1940) и Clark-a:

$$t_c = 0.0663 \cdot \frac{L^{0.7}}{S^{0.385}} \quad (8)$$

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

где је L дужина тока у km, S нагиб слива и α коефицијент (вредности варирају од 0.4 до 1.4 (Kanak *et al.*, 2015).

Snyder је 1938. године први развио методу јединичног хидрограма и успоставио везу између параметара јединичног хидрограма и карактеристика слива. На основу његовог истраживања, основне карактеристике јединичног хидрограма су: време кашњења t_p , вршни проток (пик хидрограма) Q_p и база хидрограма (укупно време) T_b . На основу података на изученом сливу, Snyder је одредио параметре јединичног хидрограма и њихову релацију са карактеристикама слива које је могуће измерити (Feldman, 2000). Време кашњења представља растојање између тежишта хијетограма ефективне кише и максималне ординате јединичног хидрограма и према Snyder-у t_p се одређује:

$$t_p = 0.75 \cdot C_t \cdot (L \cdot L_c)^{0.3} \quad (10)$$

где је C_t коефицијент одређен регионалном анализом јединичног хидрограма и углавном узима вредности од 1.8 до 2.2, L је дужина главног тока водотока (у km), мери се од излазног профила слива по главном току до извора, L_c дужина главног тока до тежишта слива (у km), мери се од излазног профила слива до тачке на главном току која је најближа тежишту слива (Feldman, 2000).

Максимална вредност јединичног хидрограма (пик хидрограма) Q_p се рачуна на следећи начин:

$$Q_p = \frac{2.75 \cdot C_p \cdot A}{t_p} \quad (11)$$

где је C_p коефицијент пика отицаја (веће вредности C_p подразумевају ниже вредности C_t), A је површина слива у km² (Feldman, 2000). У НЕС-HMS-у метода Snyder-овог јединичног хидрограма захтева два параметра: време кашњења t_p (h) и коефицијент пика хидрограма C_p (-) (Feldman, 2000).

Калибрација и валидација модела

За димензионисање бројних објеката, односно за дефинисање њихове пропусне моћи, као меродавне вредности узимају се врх поплавног таласа (максимални протицај), трајање и време појаве максималног протока, као запремина таласа. У складу са тим формирана је група од четири таласа за калибрацију, а преостали таласи су коришћени за валидацију модела (табела 2).

Табела 2. Групе таласа за калибрацију и верификацију
Table 2. Calibration and validation groups of flood events

Калибрација Шифра таласа/киша	Валидација Шифра таласа/киша
Q086 / K27 Q087 / K28 Q093 / K32 Q094 / K33	Q059 / K06 Q0692 / K152 Q070 / K16 Q075 / K18 Q090 / K29

Поступак калибрације обухвата подешавање вредности параметара за сваку епизоду посебно, како би се постигла највећа могућа ефикасност у складу са одабраним мерама перформанси које су наведене у наставку. Параметри су подешавани ручно („trial-and-error“), а да су при томе приближно подједнако задовољени услови физичке оправданости вредности параметара и ефикасности модела у репродуковању осмотрених хидрограма. Оптимална група параметара је одређена осредњавањем вредности параметара модела за епизоде које припадају групи таласа за калибрацију.

Калибрацијом се добијају јединствени скупови параметара за оба типа модела. За модел са Clark-овим јединичним хидрограмом скуп параметара чине: хидролошки број CN (/), време концентрације t_c (h) и константа линеарног резервоара R (h). Скуп параметара за модел са Snyder-овим јединичним хидрограмом чине: хидролошки број CN (/), време кашњења t_c (h) и коефицијент пика хидрограма C_p (-). Почетни губитак I_a (mm) се мења од епизоде до епизоде због различитих претходних услова на сливу и не спада у коначан скуп параметара. Овај параметар се посебно одређује за сваку од епизода. Удео непропусних површина је занемарљив, јер је у питању руралан слив.

Ефикасност модела представљена је помоћу Nash-Sutcliffe коефицијента NS (12), грешке у пику хидрограма ε_p (13), грешке у запремини отицаја ε_v (14), грешке у времену појаве пика хидрограма ε_t (15), коефицијента детерминације R^2 (16) и коефицијента корелације r (17). Коефицијент детерминације показује колики је проценат варијабилитета моделираних протока објашњено варијабилитетом осмотрених протока. Коефицијентом корелације r одређује се јачина везе између осмотрених и моделираних вредности протока. Ови показатељи квалитета модела су одабрани да би се квантификовали различити аспекти квалитета модела, као што су динамика и запремина отицаја. На основу њих се процењује који од модела је прикладнији за симулације великих вода на сливу реке Обнице. Вредности NS , ε_p , ε_v , ε_t , R^2 и r се рачунају према следећим изразима:

$$NS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{osm,i})^2}{\sigma_{osm}^2} \quad (-) \quad (12)$$

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

$$\varepsilon_v = \frac{V_{sim} - V_{osm}}{V_{osm}} \cdot 100\% \quad (14)$$

$$\varepsilon_t = t_{sim} - t_{osm} (h) \quad (15)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{osm,i} - \bar{Q}_{osm}) (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{osm,i} - \bar{Q}_{osm})^2 \sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}} \right]^2 \quad (16)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{osm,i} - \bar{Q}_{osm}) (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{osm,i} - \bar{Q}_{osm})^2 \sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}} \quad (17)$$

где је: N – број података у низу, Q_{sim} (m^3/s) – симулирани протицај, Q_{osm} (m^3/s) – осмотрени проток, σ_{osm} – стандардна девијација осмотрених протока, t_{sim} – време јављања максималног симулираног протока, t_{osm} – време јављања максималног осмотреног протока, V_{sim} – запремина симулираног хидрограма и V_{osm} – запремина осмотреног хидрограма. Вредности које узима Nash-Sutcliffe су од 1 до $-\infty$: 1 подразумева идеално слагање, док вредности мање од 0 указују да је модел неприхватљиво лош. Вредности коефицијента корелације r се крећу од -1 до 1 и што је његова вредност ближа граничним вредностима (-1 или 1), јача је веза између симулираних и осмотрених протока.

Валидација модела обухвата симулације модела са оптималним скупом параметара на групи таласа за валидацију. С обзиром да се ради о великим водама, вредност почетног губитка је 0 mm, тј. Узимају се влажнији услови који обезбеђују већу количину отицаја. Квалитет модела, као и при калибрацији, одређује се на основу поменутих показатеља.

Резултати и дискусија

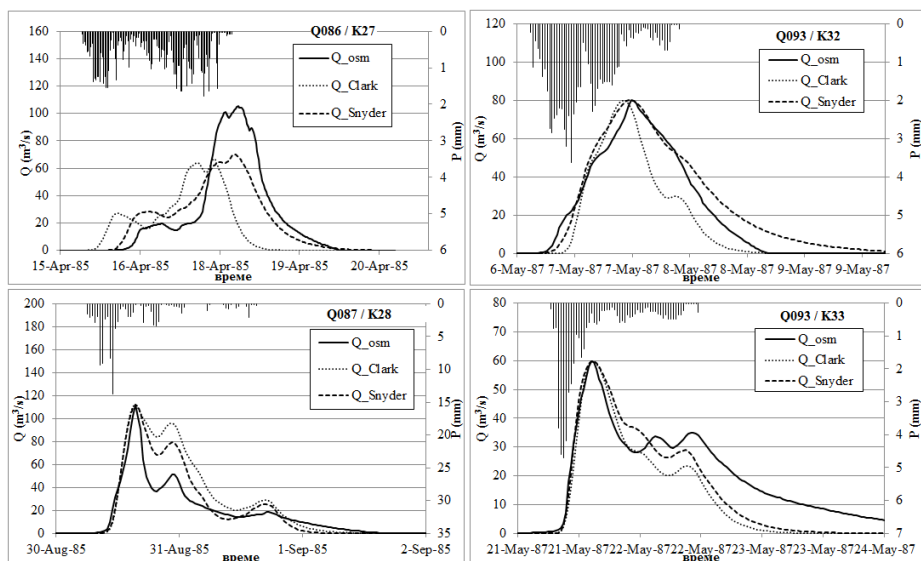
У наставку су представљени резултати рада. Прво су приказани резултати калибрације оба модела, а затим и резултати валидације истих модела с циљем да се увиди који модел за симулацију директног отицаја има боље перформансе.

Калибрација модела

У оквиру табеле 3. приказане су вредности параметара модела, за сваки од таласа посебно и њихове просечне (коначне) вредности. Резултати показују да су вредности оптимизованих параметара (табела 3) физички оправдане, тј. одговарају природним условима на сливу. CN вредности за оба модела су веће него што је уобичајено за руралне сливове, а то се оправдава већ наведеном претпоставком о утицају снега који је присутан на сливу током пролетњих таласа (таласи из групе за калибрацију су из пролећног периода). Разлика између усвојених параметара за модел губитака је мала, што је и очекивано с обзиром да се ради о истом сливном подручју. Према томе, намена и тип земљишта су исти, а вредности CN броја указују да су и услови влажности приближно једнаки. Вредности CN -а од 78.45 и 80.7 одговарају условима између просечне и велике влажности (Petrović, 1996). С обзиром на то да су вредности параметара за модел губитака приближно једнаке, лакше је идентификовати који од модела директног отицаја обезбеђује боље перформансе модела. То ће се најлакше увидети на основу показатеља

квалитета модела (табела 4) и визуелном инспекцијом на приказаним графицима (слике 2 и 3).

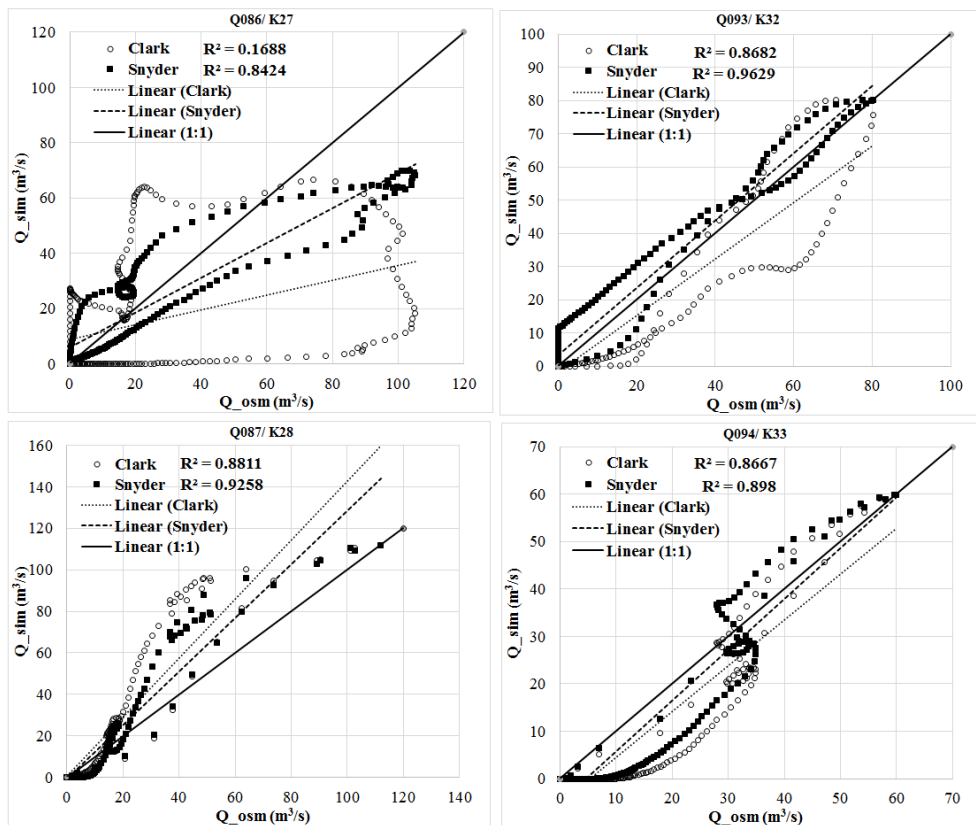
Као што се може и приметити (слика 2), модели реагују различито од епизоде до епизоде. Види се да оба модела имају најбоље оцене за талас Q093 / K32 (слика 2 и табела 4). Од свих параметара обе верзије модела најлошије симулирају запремину отицаја, а са друге стране може се приметити да су код три од четири таласа максималне вредности хидрограма тачно симулиране. Вредности коефицијента корелације већином су изнад 0.90, што показује да постоји јака веза између моделираних и осматраних протока.



Слика 2. Моделирани и осматрени хидрограми – калибрација
Figure 2. Modeled vs. observed hydrographs – calibration

Табела 3. Оптимизоване вредности параметара модела – калибрација
Table 3. Optimised model parameters – calibration

Поплавни талас	Модел губитака – SCS метода		Модел директног отицаја – Clark-ов j.x		Модел губитака – SCS метода		Модел директног отицаја – Snyder-ов j.x	
	I_a (mm)	CN (-)	t_c (h)	R (h)	I_a (mm)	CN (-)	t_p (h)	C_p (-)
Q086 / K27	0	78.45	4.8	4	0	87	5.1	0.4
Q087 / K28	22.9	78.45	4.8	4	20.55	70	4.5	0.8
Q093 / K32	16.7	78.45	4.8	4	0	81.05	6	0.4
Q094 / K33	0	78.45	4.8	4	1.7	84.7	3.2	0.4
PROSEK	9.9	78.45	4.8	4	5.56	80.70	4.7	0.5



Слика 3. Поређење осмотрених и моделираних протока – калибрација
Figure 3. Comparison of the modeled and observed hydrographs – calibration

На слици 3 приказани су осмотрени наспрам моделираних протока, као и њихови коефицијенти детерминације. Коефицијенти детерминације за оба модела већином износе од 0.84 – 0.96. То значи да је промена моделираних протока у просеку 90 % одређена променама осмотрених протока и представља позитивну оцену за оба модела. Вредности NS-а су позитивне и различите од нуле и према овом показатељу модели су прихватљиви. Међутим, свака вредност NS-а испод 0.5 за модел епизода је незадовољавајућа. Када упоредимо моделе према њиховим перформансама током калибрације, оба модела су пружила задовољавајуће резултате. Међутим, просечне вредности оцена ипак указују да модел са Snyder-овим j.x. има мало боље перформансе, него модел са Clark-овим j.x..

Табела 4. Показатељи квалитета модела током калибрације
Table 4. Model performance over the calibration

Поплавни талас	Модел директног отицаја	NS (-)	ε_p (%)	ε_V (%)	$\varepsilon_t(h)$	r (-)
Q086 / K27	Clark-ов j.x.	0.616	-36.7	-37.8	-2	0.41
	Snyder-ов j.x.	0.80	-33.46	-12.58	-1.5	0.92
Q087 / K28	Clark-ов j.x.	0.481	0	48.71	0	0.94
	Snyder-ов j.x.	0.767	0	22.68	0	0.96
Q093 / K32	Clark-ов j.x.	0.837	0	-25.2	-1.5	0.93
	Snyder-ов j.x.	0.941	0	20.07	0	0.98
Q094 / K33	Clark-ов j.x.	0.716	0	-36.6	0	0.93
	Snyder-ов j.x.	0.801	0	-25.16	+0.5	0.95
PROSEK	Clark-ов j.x.	0.663	-9.18	-12.72	-0.875	0.80
	Snyder-ов j.x.	0.827	-8.37	1.25	-0.25	0.95

Валидација модела

На сликама 4 и 5, као и у табели 5 приказани су резултати валидације формираног модела. Примећује се да су код већине таласа пик и запремина хидрограма прецењени у односу на осмотрене податке. С обзиром да је у питању модел великих вода, ово се може посматрати као позитивна оцена модела. Према NS-у талас Q075 / K18 се издваја и указује да је модел неприхватљив. Међутим, у овом случају види се да су узлазна грана, пик и део рецесионе гране хидрограма доста добро симулирани, а да је други део хидрограма нешто лошије симулиран (слика 4). Према томе, при доношењу коначне оцене квалитета модела треба узети у обзир и остале показатеље квалитета модела, као што је визуелна инспекција. Резултати симулација преостала четири таласа показују да је модел прихватљив. Што се тиче осталих показатеља ефикасности модела, вредности су нешто неповољније него у процесу калибрације, што је и очекивано. Међутим, коефицијент корелације (табела 5) и коефицијент детерминације (слика 5) и даље показују да постоји јака корелација између осмотрених и симулираних протока, као и да је велики део варијансе моделираних протока одређен помоћу осмотрених протока. Најзад, када упоредимо просечне вредности оцена за сваки од модела примећује се да у овом случају Clark-ов модел даје за нијансу боље перформансе модела.

Табела 5. Показатељи квалитета модела током валидације
Table 5. Model performance over the validation

Поплавни талас	Модел директног отицаја	NS (-)	ε_p (%)	ε_V (%)	$\varepsilon_t(h)$	r (-)
Q090 / K29	Clark-ов j.x.	0.882	-19.8	-20.1	+1	0.95
	Snyder-ов j.x.	0.758	-54	-12.17	+1.5	0.88
Q059 / K06	Clark-ов j.x.	0.672	50.1	23.9	+0.5	0.97
	Snyder-ов j.x.	0.805	27.52	45.7	+1	0.99
Q070 / K16	Clark-ов j.x.	0.761	18.1	2.65	+1	0.94
	Snyder-ов j.x.	0.78	1.85	13.88	+2	0.92
Q075 / K18	Clark-ов j.x.	-0.618	51.5	78.6	+16	0.84
	Snyder-ов j.x.	-0.892	46.78	95.71	+16.5	0.80
Q0692 / K152	Clark-ов j.x.	0.529	65.1	10.9	0	0.94
	Snyder-ов j.x.	0.745	45.64	22.95	0.5	0.98
PROSEK	Clark-ов j.x.	0.445	33.0	19.19	+3.7	0.93
	Snyder-ов j.x.	0.439	13.6	33.21	+4.3	0.92

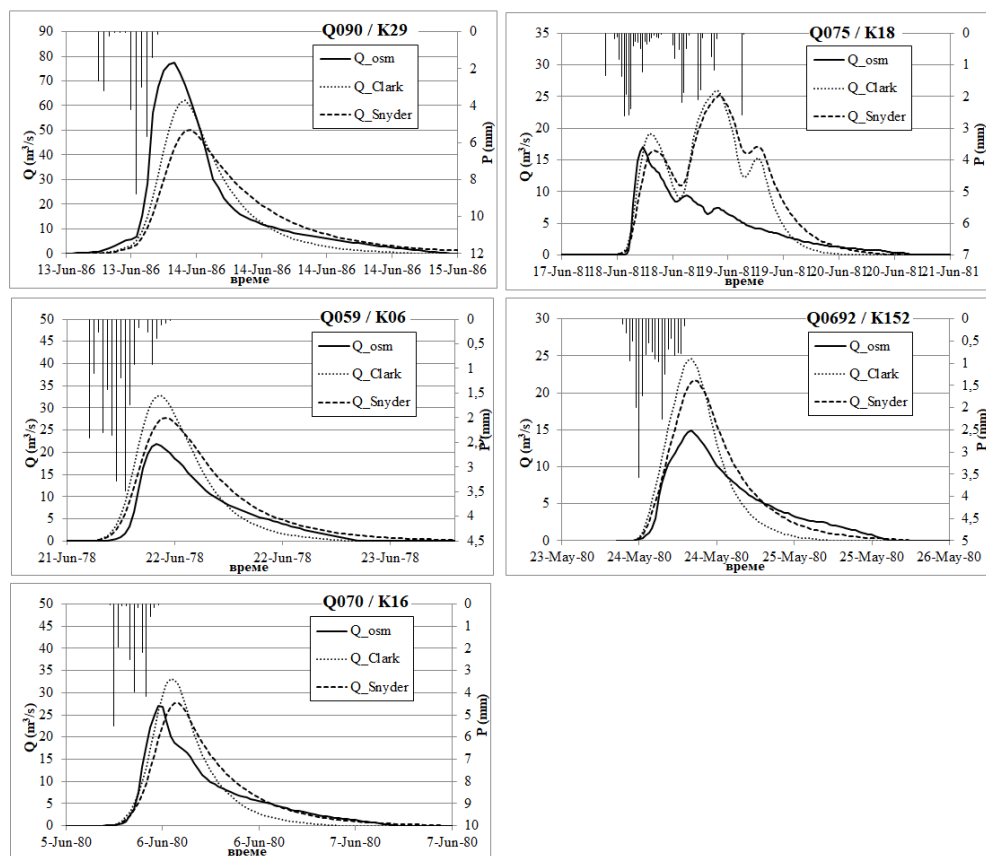
Закључак

У раду су формирана два модела за анализу великих вода на сливу реке Обнице, помоћу програмског пакета HEC-HMS. Анализирани модели се разликују по методама за трансформацију ефективне кише у површински отицај. На основу опажених података о великим водама на сливу, урађена је калибрација и валидација модела. Усвојени су хомогени модели са малим бројем параметара.

Лоше оцене модела при неким симулацијама се огледају у томе да су мерења падавина преузета са кишомерних станица које се не налазе на сливу (Petrović, 1996) и да се при формирању модела користе многе претпоставке. Неке од станица су чак и знатно удаљене од слива, па се на резултатима калибрације и валидације види утицај просторне распоређености падавина, која је овде занемарена. Претпоставља се да велики утицај на перформансе модела имају различити хидролошки одзиви током валидационих калибрационих симулација. То значи да један скуп параметара не може да обезбеди високу ефикасност модела током различитих услова на сливу. У анализи великих вода веома је важан начин бирања таласа за калибрацију и валидацију. Начин на који су овде формиране групе за калибрацију и валидацију модела се није показао као најповољнији.

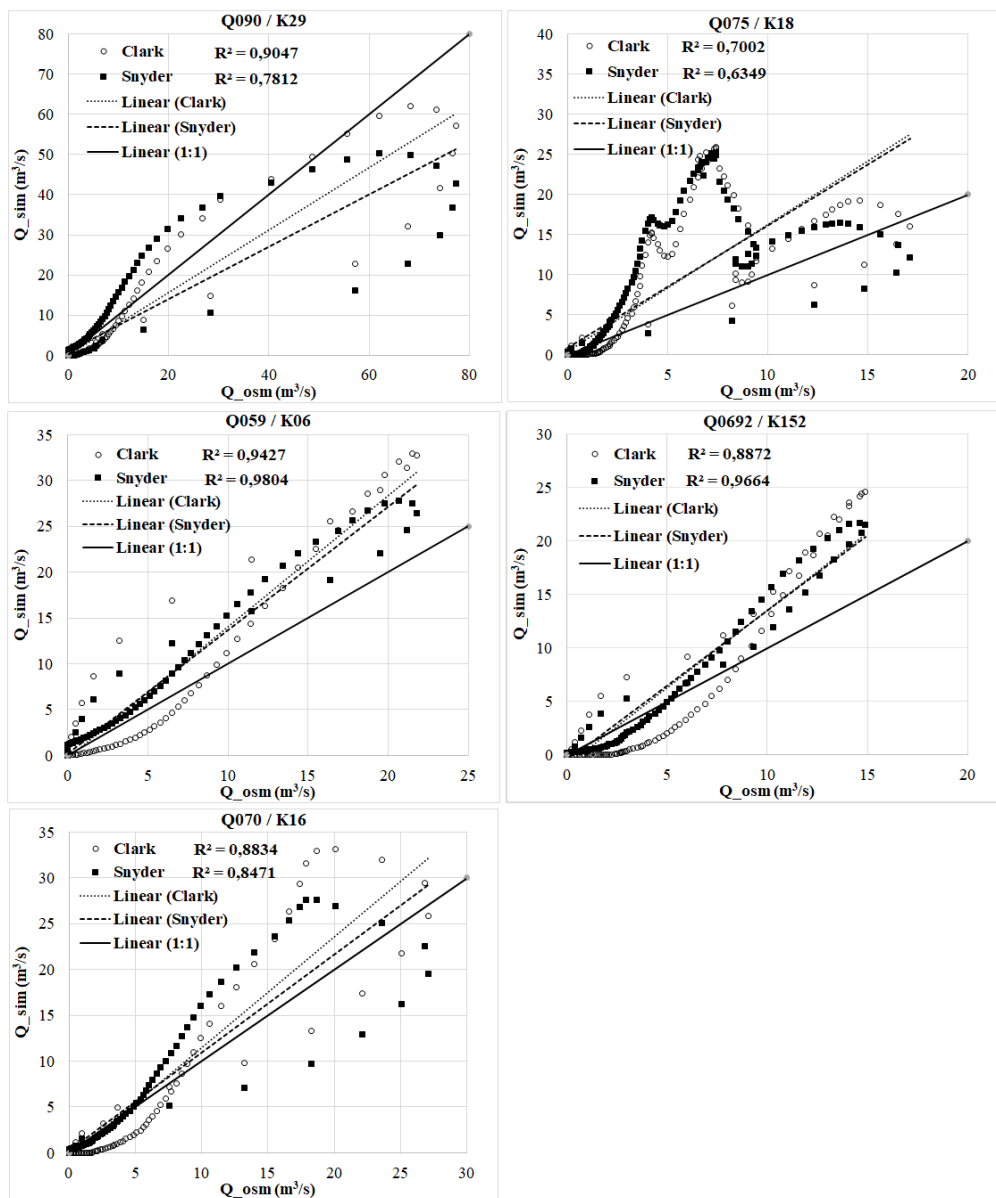
Неизвесност у хидролошким и метеоролошким подацима, као и недовољно дуг низ података за калибрацију хидролошког модела имају велики утицај првенствено на структуру модела, а онда и на резултате и примену модела. У поређењу са резултатима у литератури (Ilić *et al.*, 2018) примећује се да се за исти слив и исту методу јединичног хидрограма, али са другим таласима великих вода, добијају различите вредности параметара модела слива. Поред тога, ефикасност модела овде и у литератури (Ilić *et al.*, 2018) је приближно једнака. Ово указује на велики проблем модела епизода, где је за различите вредности параметара могуће добити једнаку ефикасност модела (Beven, 2003).

Током поставке модела тешко је одабрати и утврдити који показатељи квалитета модела су најпоузданији и најрелевантнији. Показало се више пута да су поред нумеричких показатеља квалитета модела, визуелна инспекција и претходно искуство веома корисни и неопходни при формирању коначне оцене модела. Према резултатима, показатељи ефикасности модела су мешовити, од добрих до неприхватљиво лоших. Snyder-ов j.x се показао ефективнији у току калибрације, а Clark-ов j.x. током валидације. У току калибрације су коришћени таласи са већим пиком и запремином хидрограма, а за валидацију су коришћени таласи са мањим пиком и запремином отицаја. На основу тога Snyder-ов j.x. показује боља слагања када су у питању већи протоци и запремине, док Clark-ов j.x. је прикладнији за таласе са мањом запремином и протоцима.



Слика 4. Моделирани и осмотрени хидрограми – валидација
Figure 4. Modeled vs. observed hydrographs – validation

За будућа истраживања важно је унапредити и развити мрежу мерних станица падавина и отицаја на сливу, као и других метеоролошких величина. На тај начин би се обезбедио већи број таласа, са сличним карактеристикама, а са тим поузданије и боље процене ефикасности модела јединичног хидрограма. Препоручује се испитивање других приступа при одабиру таласа за калибрацију и валидацију, а поред тога корисно би било испитати и како други начини калибрације, као што је на пример аутоматска калибрација, утичу на ефикасност модела.



Слика 5. Поређење осмотрених и моделираних протока – валидација
Figure 5. Comparison of the modeled and observed hydrographs – validation

Литература

(2016): Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ AD, Studija unapređenja zaštite od voda u slivu reke Kolubare, Beograd

(2017): Institut za šumarstvo, Studija ugroženosti puteva I i II reda od pojave poplava i bujičnih tokova u slivu Kolubare, Beograd

Adib A., Salarijazi M., Shooshtari M. M., Akhondali A. M. (2011): Comparison between characteristics of Geomorphoclimatic Instantaneous Unit Hydrograph be produced by GcIUH based Clark model and Clark UIH model, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 19, No. 2, pp. (201-209)

Beven, K. J. (2003): Rainfall - Runoff Modelling The Primer. Chichester, England: John Wiley & Sons.

Chow V. Te, Maidment D. R., Mays L. W. (1988): Applied Hydrology, McGraw-Hill Book Company

Đukić V. (2006): Matematičko modeliranje oticaja podzemnih voda sliva reke Kolubare, Vodoprivreda, 38 pp. (265-280)

Feldman, A. D. (2000): Hydrologic Modeling System HEC-HMS – Technical Reference Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center

Ilić A., Plavšić J., Radivojević D. (2018): Rainfall-Runoff simulations for design flood estimation in small river catchments, Facta Universitatis, pp. (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, pp. (437-447)

King K. W., Arnold J. G., Bingner R. L. (1999): Comparison of Green-Ampt and Curve Number methods on Goodwin Creek Watershed using SWAT, Vol. 42, pp. (919-925)

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)

Petrović, J. (1996): Upporedna analiza maksimalnih proticaja na malim rekama metodama parametarske i statističke hidrologije, magistrski rad, Beograd

Plavšić J., Zlatanović N. and Todorović A. (2019): Design storm duration for estimation of floods in ungauged basins, 7th Int. Conf. Contemporary achievements in civil engineering 23-24. April 2019. Subotica

Todorović, A., Plavšić, J. (2013): Analiza mogućnosti primene modela HEC-HMS za kontinualne hidrološke simulacije, seminarski rad iz predmeta Deterministički hidrološki modeli, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Walega A., Grzebinoga M., Paluszkiewicz B. (2011): On using the Snyder and Clark Unit

Hydrograph for calculations of flood waves in a highland catchment (The Grabinka River example), *Acta Scientiarum Polonorum, Formation Circumiectus* 10 (2), pp. (47-56)

Walega A., Rutkowska A. (2015): Usefulness of the Modified NRCS-CN method for the Assessment of Direct Runoff in a Mountain Catchment, *Acta Geophysica* 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)