DOI:10.5937/eroz52-72597 ОРИГИНАЛНИ НАУЧНИ РАД

АНАЛИЗА ПОВРШИНСКОГ ОТИЦАЈА НА СЛИВУ РЕКЕ ЈАБЛАНИЦЕ ДО БРАНЕ СТУБО-РОВНИ ПРИМЕНОМ HEC-HMS МОДЕЛА

ANALYSIS OF SURFACE RUNOFF IN THE JABLANICA RIVER CATCHMENT UP TO THE STUBO-ROVNI DAM USING HEC-HMS MODEL

Љубица Симанић[1*], Синиша Половина[2], Владислав Кецовић[1], Ратко Ристић[2], Вукашин Милчановић[2]

[1]„Србијаводе“ д.о.о, Булевар уметности 2а, 11070 Београд
[2]Шумарски факултет Универзитет у Београду, Кнеза Вишеслава 1, 11030 Београд

Примљен: 24.04.2026. / ***Рецензиран:*** 24.05.2026. / ***Прихваћен:*** 01.07.2026

АПСТРАКТ

У раду је анализиран процес формирања површинског отицаја на сливу реке Јабланице до бране Стубо-Ровни применом хидролошког модела HEC-HMS. Истраживање је усмерено на испитивање могућности примене модела у симулацији појединачних падавинских догађаја. Формиран је полудистрибуирани модел заснован на SCS методи губитака, SCS јединичном хидрограму и рецесионом моделу базног протока. Калибрација је извршена за период мај 2024. године, док је валидација спроведена на независном периоду мај 2025. године, уз задржавање истих параметара модела. Добијени резултати показују да модел омогућава задовољавајућу репродукцију временске динамике и укупне количине отицаја. Модел добро осликава динамику отицаја, али се вршне вредности не поклапају. Резултати указују да HEC-HMS модел представља применљив алат за анализу процеса отицаја у условима симулације појединачних падавинских догађаја.

Кључне речи: Површински отицај, HEC-HMS, хидролошко моделирање, слив реке Јабланице, симулација падавинских догађаја

ABSTRACT

This study analyzes the process of surface runoff formation in the Jablanica River catchment upstream of the Stubno–Rovni dam using the HEC-HMS hydrological model. The research is focused on assessing the applicability of the model for simulating individual rainfall events. A semi-distributed model was developed based on the SCS loss method, the SCS Unit Hydrograph, and a recession-based baseflow model. Calibration was performed for the period of May 2024, while validation was conducted using an independent dataset from May 2025, with the same model parameters retained. The obtained results indicate that the model provides a satisfactory reproduction of the temporal dynamics and total runoff volume. The model adequately represents runoff dynamics, although peak discharge values show certain

[1] *Љубица Симанић, email: ljubica.simanic@srbijavode.rs, ORCID ID: 0009-0005-7025-0093; Синиша Половина ORCID ID: 0000-0001-5134-0548; Ратко Ристић ORCID ID: 0000-0001-6817-2800; Вукашин Милчановић ORCID ID: 0000-0001-6595-3863

discrepancies. Overall, the findings suggest that the HEC-HMS model represents a suitable tool for analyzing runoff processes under conditions of individual rainfall event simulations.

Keywords: Surface runoff, HEC-HMS, hydrological modeling, Jablanica River catchment, rainfall event simulation

УВОД

Хидролошко моделирање представља симулацију процеса хидролошког циклуса, од падавина до формирања отицаја на сливовима. Његова примена је веома широка и обухвата прогнозу протока и великих вода, пројектовање система за заштиту од поплава, анализу урбаних система одвођења атмосферских вода, процену водних ресурса и разумевање процеса трансформације падавине у отицај (Chow et al., 1988; Beven, 2012). Посебан значај хидролошко моделирање има у анализи екстремних догађаја, односно појаве великих вода, које представљају један од најважнијих фактора ризика у управљању водама (Singh, 1995; Плавшић, 2014).

Основна подела хидролошких модела је на стохастичке и параметарске. Стохастички модели („црне кутије“) заснивају се на статистичким везама између улазних података (падавине, температура и др.) и излазних величина (проток), без директног описивања физичких процеса. Насупрот томе, параметарски модели („сиве кутије“) представљају отицај помоћу концептуалних резервоара који симулирају различите компоненте хидролошког циклуса, као што су површински и подземни отицај, инфилтрација и ток у речном кориту (Chow et al., 1988). Ови модели дају детерминистичке резултате за исте улазне услове, док стохастички приступи производе расподеле вероватноће исхода.

Савремени хидролошки модели садрже скуп улазних података, граничних и почетних услова, као и параметара који описују понашање слива. Док се поједини параметри могу одредити директним мерењем, већина се утврђује кроз процес калибрације, чији је циљ постизање задовољавајућег слагања између симулираних и осмотрених протока (Beven, 2012). У зависности од начина просторне репрезентације, модели могу бити дистрибуирани, са параметрима дефинисаним за сваку просторну јединицу, или агрегирани, где се цео слив посматра као јединствен систем. Полудистрибуирани приступ представља компромис између ова два, јер слив дели на подсливове са сопственим параметрима (Refsgaard, 1997; Singh & Woolhiser, 2002; Плавшић, 2014).

Развој хидролошког модела обухвата више фаза: дефинисање перцептуалног оквира, формулисање математичког описа процеса, имплементацију у софтверском окружењу, као и поступке калибрације и валидације. Валидација подразумева тестирање модела на независном периоду, при чему је уобичајено да резултати буду нешто слабији у односу на калибрациони период (Beven, 2012).

У зависности од временског обухвата, модели могу бити континуални или епизодни. Епизодни модели се примењују за симулацију појединачних падавинских догађаја и формирања поплавних таласа, што је од посебног значаја у анализи великих вода (Singh, 1995). Један од најчешће коришћених софтверских пакета за ову намену је HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), који омогућава симулацију процеса трансформације падавине у отицај применом различитих метода губитака, трансформације и базног тока (Feldman, 2000; USACE, 2016). Његова примена је широко заступљена како у научним истраживањима тако и у инжењерској пракси (Beven, 2012; Плавшић, 2014; Zlatanović, 2006).

Успешност примене модела најчешће се оцењује упоређивањем симулираних и осмотрених хидрограма уз примену статистичких показатеља, као што су коефицијент корелације и Nash–Sutcliffe коефицијент ефикасности (Nash,Sutcliffe, 1970; Moriasi et al.,

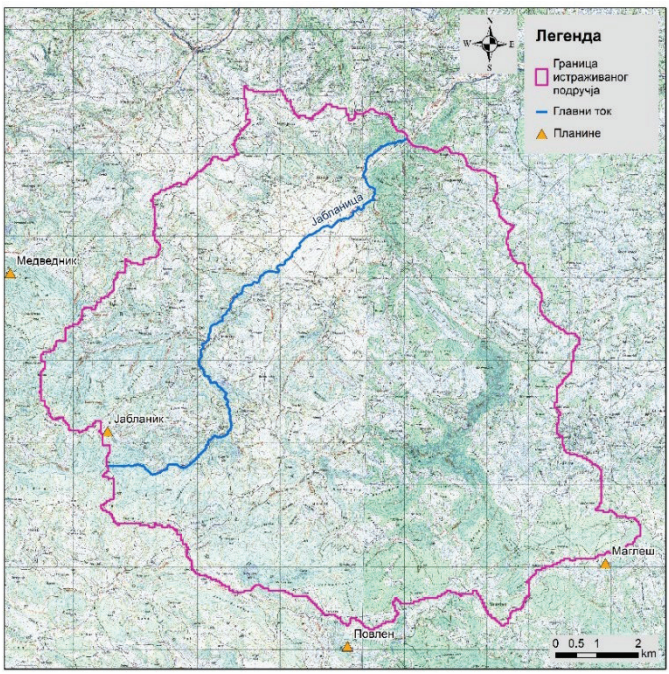
2007). Ови показатељи омогућавају процену систематских и динамичких одступања у симулацији отицаја.

Хидролошко моделирање се може примењивати на изучених и на неизучених сливовима. На изученим сливовима, као што је слив реке Јабланице, могуће је спровести калибрацију модела на основу расположивих података о падавинама, протицајима и климатским условима (Todorović, 2016; Плавшић, 2014; Ерић, 2019; Beven, 2012; Wagener et al., 2004). У оквиру овог рада коришћени су подаци часовних вредности протока са хидролошке станице „Седлари ХС“ и подаци часовних вредности падавина забележених са метеоролошке станице „Доње Лесковице ДКС“, на основу којих је формиран модел за анализу процеса отицаја применом HEC-HMS софтвера.

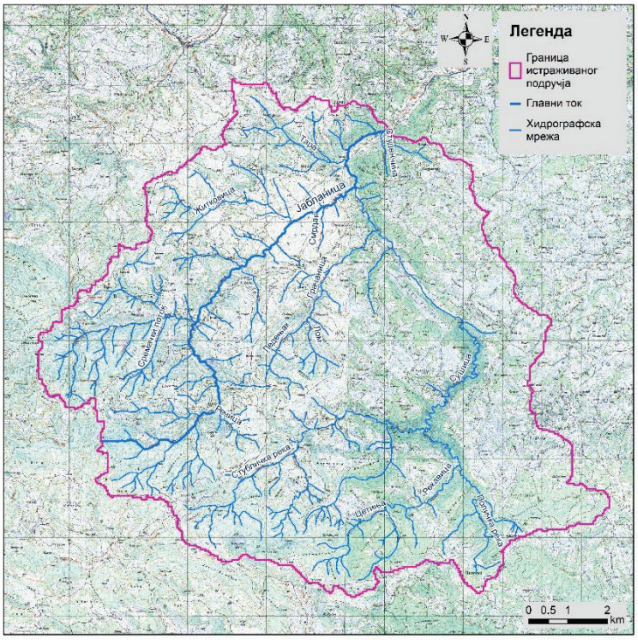
МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Опште карактеристике истраживаног подручја

Подручје на ком је спроведена анализа у овом раду је слив реке Јабланице до бране Стубо-Ровни, који се налази у северозападном делу Републике Србије, југозападно од града Ваљева (слика 1). Слив је позициониран у општини Ваљево, која припада Колубарском округу. Слив Јабланице припада сливу Колубаре, коју формира заједно са Обницом, и њене веће притоке су Сушица, Тара и Велика Река (слика 2). Укупна површина сливног подручја износи 117,06 km^2, а остале физичко-геогрфаске карактеритике су дате у табели 1.



Слика 1. Географски положај слива реке Јабланице, Извор: Аутор
Figure1. Geographical location of the Jablanica River catchment, Source: Author


Легенда
Граница истраживаног подручја
Главни ток
Хидрографска мрежа
Јабланица
Сувајска река
Сувајска река
Сувајска река

Истраживано подручје окружују, са западне стране планине Медведник и Јабланик, са јужне стране Повлен, а са западне Маглеш (слика 1). Ове планине су сврстане у категорију средњих планина јер су висине преко 1000 m надморске висине. Управо због оваквог рељефа, тј. великих нагиба у горњим деловима слива, слив реке Јабланице је подложан стварњу ерозионих процеса, нарочито код водне ерозије.
На графику 1 су приказане вредности средњих годишњих температура и суме падавина за период од 1991. до 2023. године измерене на хидрометеоролошкој станици Ваљево. Суме падавина су доста променљиве и најчешће су биле преко 700 mm. Највећа годишња сума падавина је забалежена 2014. године и износила је 1332,40 mm (РХМЗ, 1991-2023).

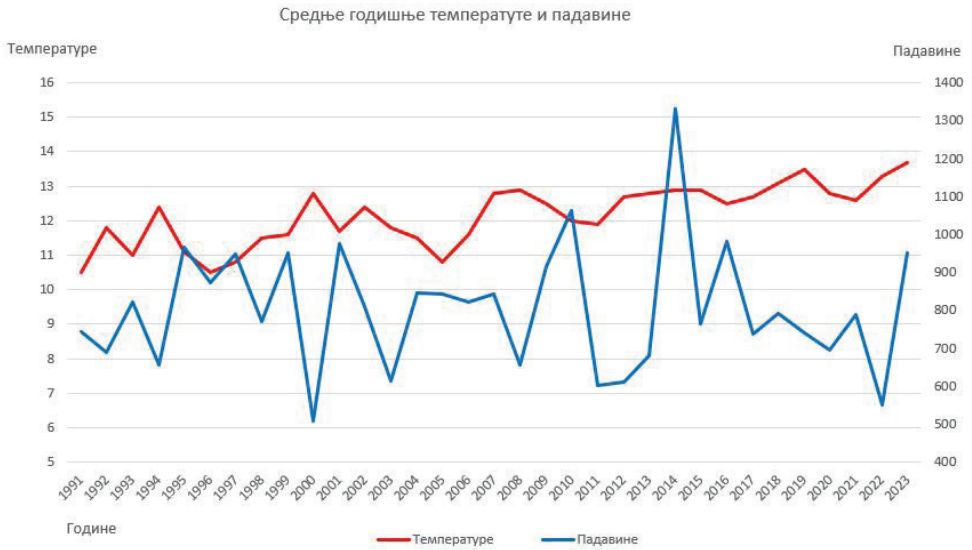
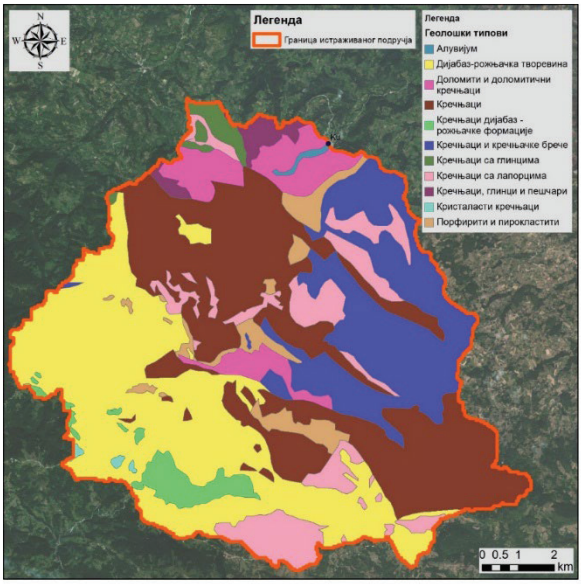


График 1. Средње годишње температуре ваздуха и суме падавна за мерну станицу Ваљево, Извор: Аутор
Graph 1. Mean annual air temperatures and total precipitation at the Valjevo meteorological station, Source: Author

На истраживаном подручју се јавља 11 геолошких типова (слика 3), од којих доминирају различите варијације кречњака. Најзаступљенији су дијабаз-рожњачка творевина, кречњаци који се простиру од северозападног до југоисточног дела слива, као и кречњаци и кречњачке брече на источном делу слива. Остали типови – кречњаци са лапорцима, доломити и доломитски кречњаци, порфирити и пирокласти, дијабази и спилити, глинци и пешчари, као и кречњаци са глинцима – заступљени су са мање од 10%, док су кристаласти кречњаци и алувијум присутни у веома малом уделу. Процентуална заступљеност геолошких типова приказана је на графику 2.
Кречњачке формације које доминирају на сливу карактеришу се израженом карстификацијом и испуцалошћу, што условљава повећану пропустљивост и омогућава интензивну инфилтрацију падавина у дубље делове подземља (Ford,Williams, 2007; White, 2002). У таквим условима подземне воде се акумулирају у карстним шупљинама или циркулишу кроз пукотинске системе и проширене канале настале процесима

карстификације, што значајно утиче на хидролошко понашање слива и динамику формирања отицаја (Bonacci, 1993; Петровић, 1991).



Слика 3. Просторни распоред геолошких типова на простору слива реке Јабланице, Извор: Аутор

Figure 3. Spatial distribution of geological types within the Jablanica River catchment, Source: Author

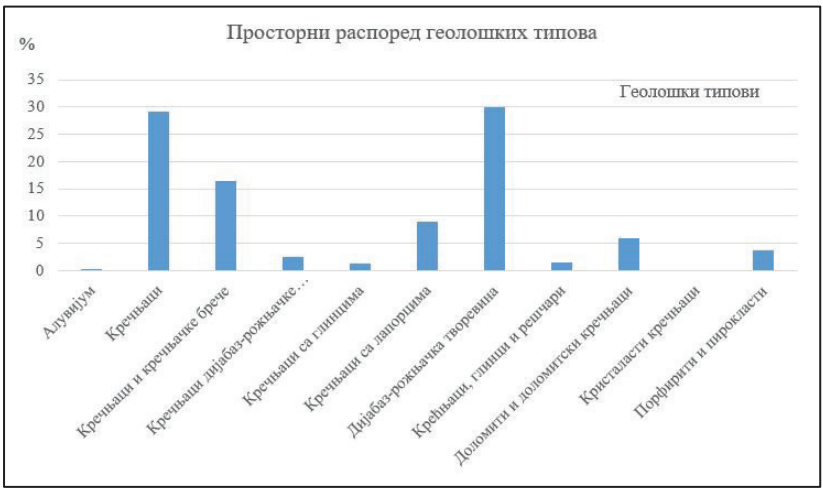
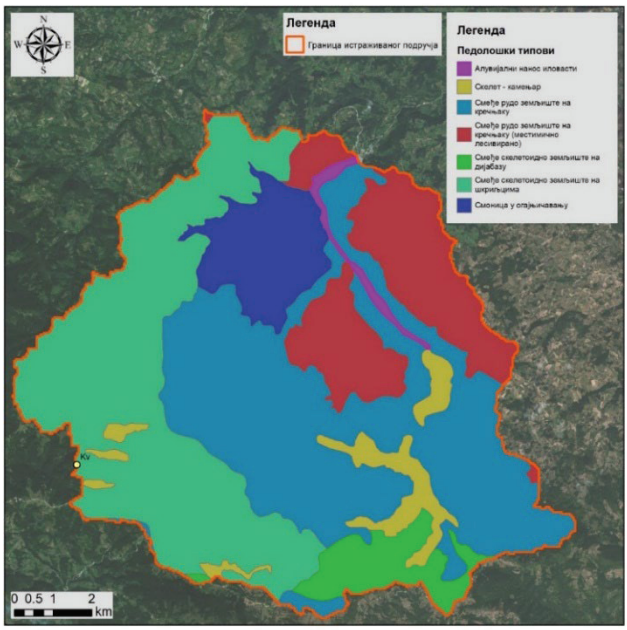


График 2. Процентуална заступљених геолошких типова на сливном подручју реке Јабланице, Извор: Аутор

Graph 2. Percentage distribution of geological types in the Jablanica River catchment, Source: Author

Педологија на сливу реке Јабланице одређена је на основу Педолошке карте Србије у размери 1:50.000, израђеној на Институту за проучавање земљишта, Београд – Топчидер (Tanasijević et al., 1963). Педолошки типови су приказани на изведеној педолошкој карти (слика 4). На сливу реке Јабланице најзаступљенија су смеђа земљишта, као што су типична смеђа земљишта на кречњаку, на централном и југозападном делу слива, затим ранкер дуж правца северозапад-запад и јуозапад и лувисол на североистоку слива. Поред наведених педолошких типова, на сливу реке Јабланице присутни су још и смоница у огајњичавању, смеђе скелетоидно земљиште на дијабазу, скелет – камењар и иловасти алувијални нанос. На графику 3 приказана је процентуална заступљених типова земљишта на сливном подручју.



Слика 4. Просторни распоред типова земљишта на простору слива реке Јабланице, Извор: Аутор

Figure 4. Spatial distribution of soil types within the Jablanica River catchment, Source: Author

Истраживања спроведена на експерименталним сливовима су показала повољан утицај вегетације на хидролошки режим сливова кроз повећање удела малих и средњих вода у односу на велике воде, у укупној структури годишњег отицаја (Ристић, 2011.). Овај утицај се највише огледа кроз интерцепцију и инфилтрационо – ретенционе карактеристике земљишта. Подаци о начину кришћења земљишта су преузети са платформе Corine land cover (EEA, 2018) за 2018. годину (слика 5). На подручју слива реке Јабланице најзаступљеније су површине под лишћарским шумама, пољопривреда са значајним површинама под природном вегетацијом и сложени обрасци обраде се. Поред наведених начина коришћења заступљени су још и прелазни шумовито/жбунасти

предели, пашњаци, мешовити шумски комплекси, четинарске шуме и водна тела. На графику 4 приказана је процентуална заступљених класа начина коришћења земљишта на сливном подручју.

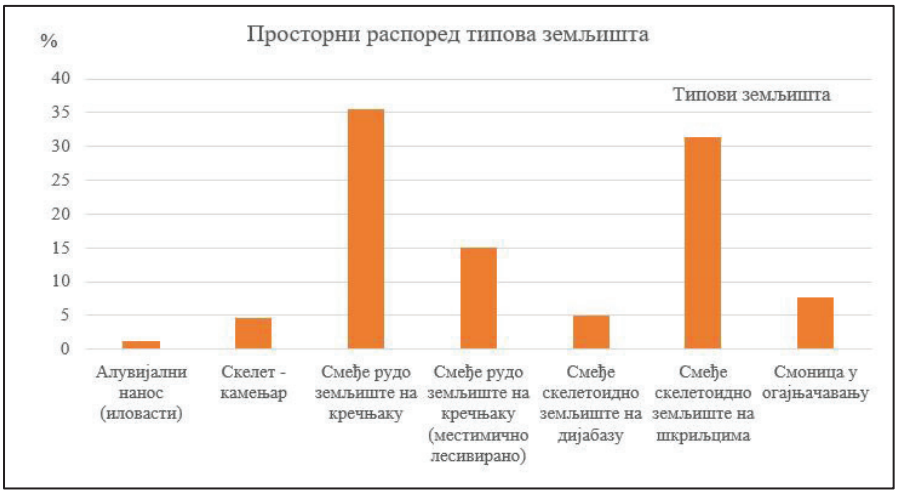
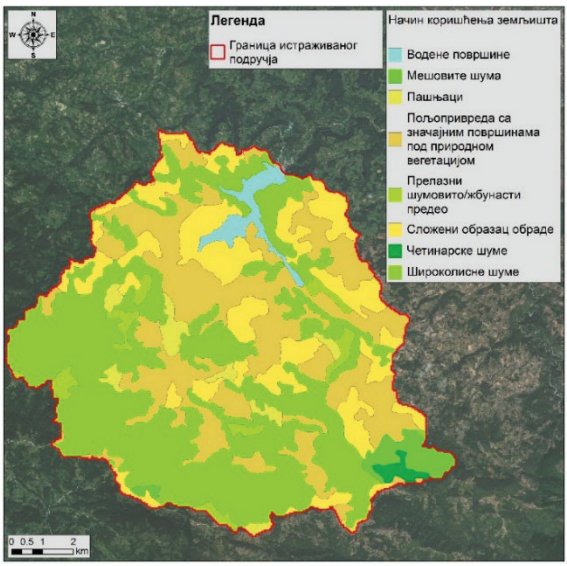


График 3. Процентуална заступљених типова земљишта на сливном подручју реке Јабланице, Извор: Аутор

Graph 3. Percentage distribution of soil types in the Jablanica River catchment, Source: Author



Слика 5. Просторни распоред начина коришћења земљишта на простору слива реке Јабланице, Извор: Аутор

Figure 5. Spatial distribution of land use within the Jablanica River catchment, Source: Author

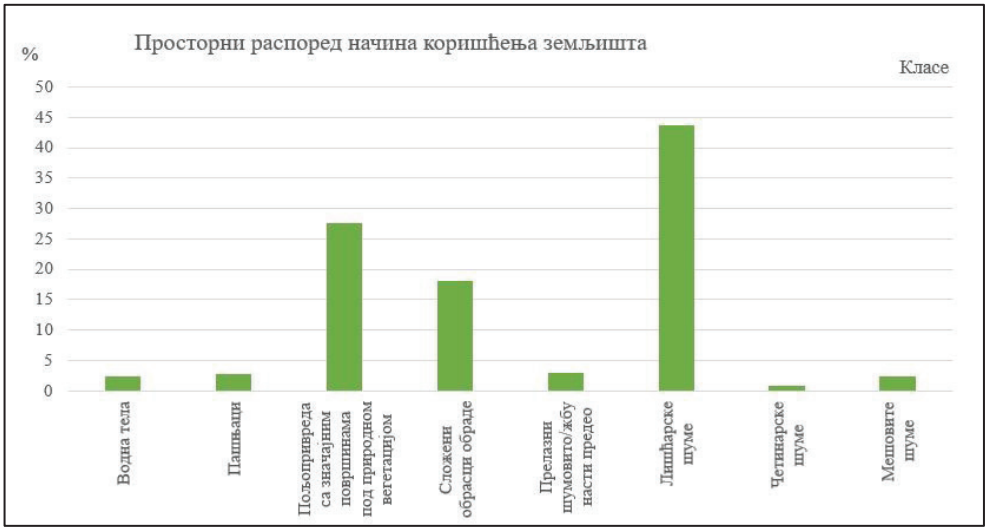


График 4. Процентуална заступљених класа начина коришћења земљишта на сливном подручју реке Јабланице, Извор: Аутор

Graph 4. Percentage distribution of land use classes in the Jablanica River catchment Source: Author

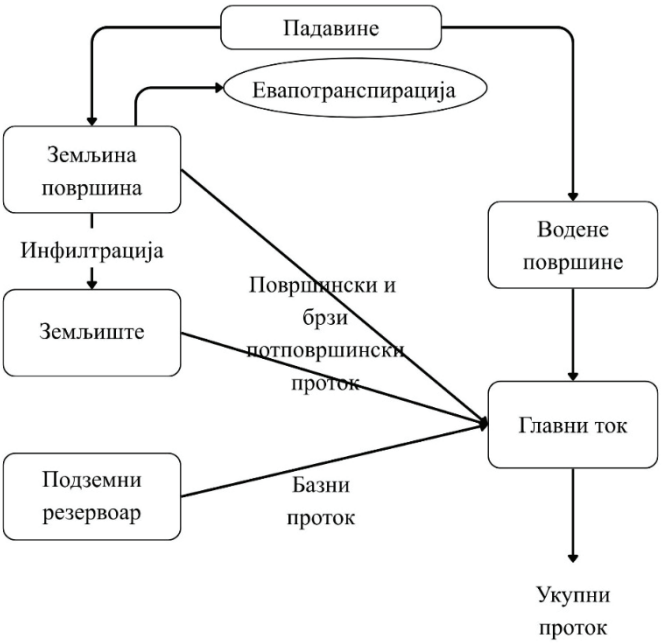
У раду су коришћени хидрограми часовних вредности протока са хидролошке станице „Седлари ХС“ и подаци часовних вредности падавина забележених на метеоролошкој станици „Доње Лесковице ДКС“, за период осматрања мај 2024. године и мај 2025. године. Наведене станице се налазе у систему станица за праћење хидролошког стања на сливу реке Колубаре у оквиру пројекта РНУ Колубара (Систем ране најаве и упозорења на сливу реке Колубаре, 2025).

Опис модела за прорачун површинског отицаја

За потребе овог рада извршена је анализа површинског отицаја на сливу реке Јабланице применом хидролошког моделирања у програмском пакету HEC-HMS (USACE, 2015). Овај пакет омогућава једноставно управљање улазним подацима, као и преглед резултата у графичком и табеларном облику, што га чини погодним за примену у анализи падавинско-отичних процеса (Feldman, 2000; Živanović, 2006). Због своје флексибилности и модуларне структуре, HEC-HMS се широко примењује у истраживањима процеса отицаја и формирања поплавних таласа (Beven, 2012; Плавшић, 2014).

Модели засновани на физичким законима најбоље описују процес отицаја (слика 6), јер у обзир узимају природне карактеристике слива и параметре који утичу на кретање и расподелу воде (Chow et al., 1988; Singh, 1995). Међутим, како је готово немогуће обухватити целокупан хидролошки циклус у једном моделу, у пракси се он дели на више компоненти које се посебно анализирају и моделирају (Beven, 2012; Todorović, 2016). У оквиру HEC-HMS-а овај принцип реализован је кроз четири основне компоненте (USACE, 2015):

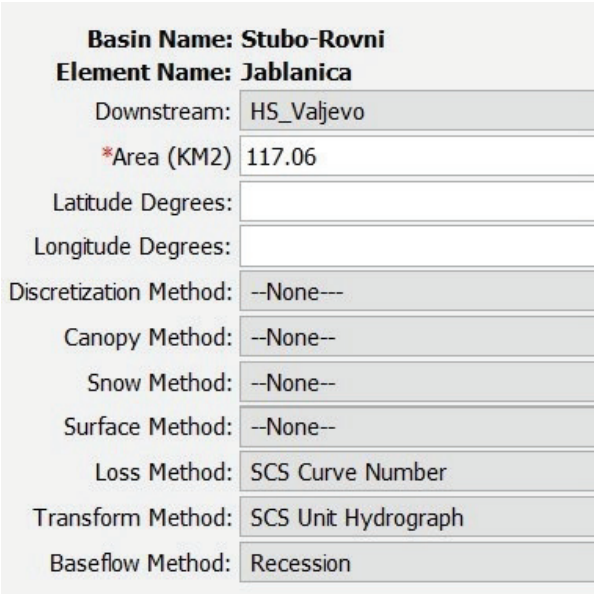
1. модел слива,
2. метеоролошки модел,
3. временске серије и улазни подаци и
4. контролне спецификације.



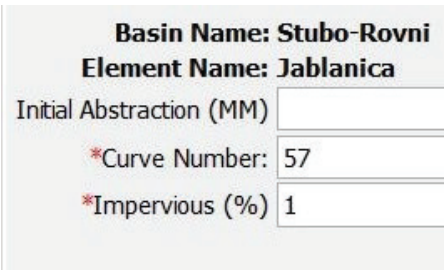
Слика 6. Дијаграм тока рада у моделу HEC-HMS, Извор: Аутор
Figure 6. Workflow diagram in the HEC-HMS model, Source: Author

У оквиру HEC-HMS-а могуће је моделирати не само отицај услед падавина већ и отицај настао топљењем снега (USACE, 2015; Scharffenberg, Fleming, 2010). Подаци о падавинама могу бити унети као тачкаста мерења, просечно израчунати применом метода Тијесенових полигона или инверзног растојања, као и у облику растерских података добијених радарским осматрањем (Feldman, 2000; Beven, 2012). Модел омогућава и додатну корекцију тежина које се приписују појединачним станицама, што доприноси реалистичнијој просторној репрезентацији падавина (Singh, 1995). Топљење снега симулира се методом степен-дана, уз коришћење индекса претходне температуре и посебних параметара за услове падавина у течном облику (Anderson, 1973; USACE, 2015). У дистрибуираним верзијама модела примењује се Gridded Temperature Index метода (USACE, 2015), док се у случају епизодних симулација снег може и изоставити. Потенцијална евапотранспирација (ПЕТ) у HEC-HMS-у може се моделирати методом Priestley–Taylor, било као просторна расподела по ћелијама мреже, било у виду месечних просечних вредности (Priestley, Taylor, 1972; Scharffenberg, Fleming, 2010). Док се код епизодних симулација она најчешће занемарује, код континуалних анализа представља важну компоненту, јер утиче на влажност земљишта и величину ефективних падавина (Beven, 2012; Плавшић, 2014).

Поред ових основних функција, HEC-HMS садржи модуле за симулацију хидротехничких објеката као што су акумулације, ретензије и обилазни канали, као и алате за аутоматску калибрацију параметара на основу осмотрених хидролошких и метеоролошких података (Scharffenberg, Fleming, 2010).
Модел слива реке Јабланице (слика 7) у оквиру HEC-HMS софтвера представља модел епизоде и обухвата дефинисање метода за одређивање запремине директног отицаја (SCS Curve Number), трансформацију директног отицаја (SCS Unit Hydrograph) и моделирање базног отицаја применом рецесионог приступа (USACE, 2015; Chow et al., 1988) (слика 8).



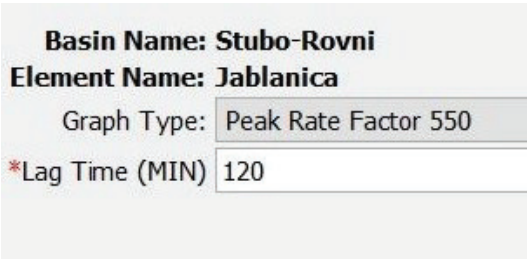
Слика 7. Поставка HEC-HMS модела слива реке Јабланице, Извор: Аутор
Figure 7. HEC-HMS model setup for the Jablanica River catchment, Source: Author



Слика 8. Подешавање параметара у моделу слива реке Јабланице, Извор: Аутор
Figure 8. Parameter configuration in the Jablanica River catchment model, Source: Author

За прорачун запремине директног отицаја у овом раду примењена је SCS метода губитака, која представља један од најчешће коришћених емпиријских приступа у хидролошком моделирању падавина–отицај процеса (USDA SCS, 1972; Ponce, Hawkins,

1996). Ова метода заснива се на параметру криве броја – CN (Curve Number), који интегрално обухвата утицај хидролошких својстава земљишта, начина коришћења земљишта и претходног стања влажности на процес инфилтрације и формирање површинског отицаја (Mockus, 1964; Chow et al., 1988). Значај CN параметра у анализи трансформације падавина у отицај се огледа у његовој практичној применљивости у условима недостатка хидролошких података (Плавшић, 2012; Todorović, 2016; Zlatanović, 2015). Метода подразумева и увођење почетне апстракције (Initial Abstraction), која представља део падавина изгубљен услед интерцепције, депресионог задржавања и иницијалне инфилтрације пре почетка формирања директног отицаја (USDA SCS, 1972; Mishra, Singh, 2003). Ова компонента има значајну улогу у дефинисању почетне фазе хидролошког понашања слива и често се повезује са физичким карактеристикама површинског покривача и структуре земљишта (Morgan, 2005). Параметар Impervious одређује удео непропусних површина у оквиру слива и представља важан фактор у моделирању површинског отицаја, посебно у условима изражених антропогених утицаја и промена у начину коришћења земљишта (Wischmeier, Smith, 1978; Beven, 2012). Његова вредност се добија анализом просторних података о коришћењу земљишт и представља значајан улазни параметар у хидролошким моделима (Плавшић, 2012). На слици 9 су приказане усвојене вредности параметара модела формираног за потребе овог рада.



Слика 9. Параметри модела за одређивање запремине директног отицаја, Извор: Аутор

Figure 9. Model parameters for estimating direct runoff volume, Source: Author

Модели директног отицаја имају за циљ да опишу процес трансформације ефективних падавина у отицај на излазном профилу слива, односно део падавина који након одузимања губитака услед инфилтрације, интерцепције и површинског задржавања учествује у формирању отицаја и доспева до хидрографске мреже (Chow et al., 1988; Beven, 2012). У ову групу спадају и јединични хидрограми, који се сврставају у концептуалне моделе, будући да успостављају функционалну зависност између ефективних падавина и одговора слива без експлицитног моделовања свих унутрашњих хидролошких процеса (Sherman, 1932; Todorović, 2016).

У овом раду је примењен синтетички SCS јединични хидрограм (SCS Unit Hydrograph) који полазећи од основних претпоставки теорије јединичног хидрограма: да је ефективна киша равномерно распоређена по сливу и константног интензитета током трајања, да за падавине истог трајања база хидрограма остаје непромењена, а ординате пропорционалне количини ефективне падавине, као и да је јединични хидрограм карактеристика датог слива (USDA SCS, 1972; Mockus, 1964). Ове претпоставке су широко прихваћене у инжењерској хидрологији и потврђене у бројним применама синтетичких хидрограма (Chow et al., 1988; Плавшић, 2012).

Овај приступ заснива се на стандардизованом приказу одговора слива на јединичну ефективну падавину, при чему се укупни ефекат кретања и привременог задржавања воде унутар слива описује кроз карактеристичан облик хидрограма директног отицаја (Singh, 1992). Облик SCS јединичног хидрограма дефинисан је временом достизања вршног протицаја и максималном ординатом хидрограма (USDA SCS, 1972).
Кључни параметар модела представља време кашњења слива (енг. lag time), које означава временски интервал између тежишта ефективне падавине и појаве вршног протицаја директног отицаја (McCuen, 2005). Ова величина интегрално одражава динамику кретања воде од најудаљенијих делова слива до излазног профила.

Време достизања врха хидрограма одређује се према релацији (US SCS, 1972):

$$t_{\mathrm{p}} = \frac{t_{\mathrm{r}}}{2} + t_{\mathrm{la}}g$$

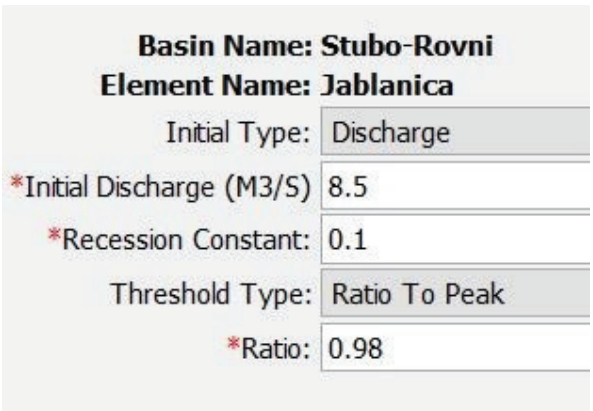
где су:

t_p — време до врха хидрограма,

t_r — трајање ефективне падавине,

$t_{la}g$ — време кашњења слива.

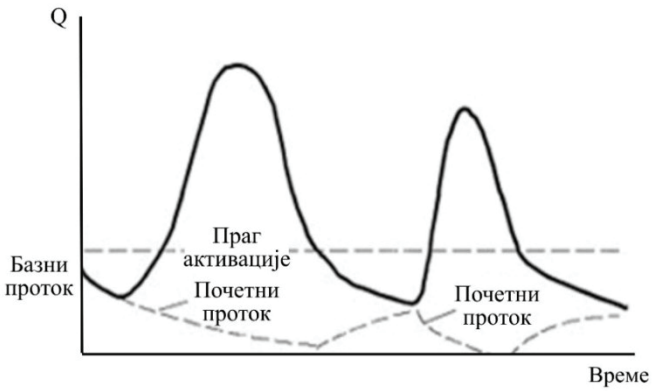
Максимална ордината јединичног хидрограма дефинише се у функцији запремине директног отицаја и времена достизања врха, чиме се обезбеђује очување укупне количине воде која учествује у отицању (Chow et al., 1988).
За примену SCS јединичног хидрограма у оквиру HEC-HMS модела неопходно је дефинисати време кашњења слива, као параметар који у највећој мери одређује облик и динамику хидрограма директног отицаја (USACE, 2000). Његова вредност може се проценити на основу времена концентрације, морфометријских карактеристика терена и хидролошких услова на сливу (McCuen, 2005; Плавшић, 2012).
Усвојене вредности параметара примењене у моделу формираном за потребе овог рада приказане су на слици 10.



Слика 10. Параметри модела директног отицаја, Извор: Аутор
Figure 10. Direct runoff model parameters, Source: Author

За моделирање базног протока у HEC-HMS-у постоји пет метода, при чему је његово укључивање опционо, па се код епизодних водотока може и занемарити (USACE, 2000). У овом раду за прорачун базног отицаја примењена је метода рецесије. Основна претпоставка овог модела је да се опадање протока након врха хидрограма може представити експоненцијално опадајућом кривом (Tallaksen, 1995; USACE, 2000).
Примена модела рецесије захтева дефинисање почетног услова, односно вредности базног протока на почетку симулације, као и два параметра: константе рецесије (k) и вредности прага (Tallaksen, 1995). Константа рецесије одређује брзину опадања базног протока и може попримати вредности између 0 и 1. Веће вредности (k) указују на спорије опадање, док вредност k = 1 значи да је базни проток константан (USACE, 2000).

Промене укупног и базног протока након кишне епизоде описују се експоненцијалном кривом, што представља поједностављен, али широко прихваћен приказ пражњења подземних резервоара (Tallaksen, 1995; Beven, 2012). Пораст базног протока, односно његово „ресетовање“, настаје када силазна грана хидрограма достигне праг. Тај праг може бити дефинисан као део пика поплавног таласа или као конкретна вредност протока (USACE, 2000). У овом моделу усвојено је да праг представља део пика поплавног таласа. Након достизања прага, укупни хидрограм се даље описује рецесионом кривом, све док се у одређеном моменту укупни проток не сведе на вредност базног протока (слика 11).



Слика 11. „Ресетовање“ базног протока, Извор: USACE, 2016
Figure 11. "Resetting" of baseflow, Source: Author

Калибрација модела

Калибрација модела представља процес подешавања параметара са циљем да симулирани хидрограм што верније репродукује осмотрени, односно реални хидролошки одговор слива (Beven, 2012; Gupta et al., 1998; Todorović, A., 2013). У овом раду параметри су подешавани ручно, водећи рачуна да буду истовремено физички оправдани и ефикасни у репродуковању стварних података (Madsen, 2000; Плавшић, 2012; Todorović, A., 2016).

Део параметара има калибрациони карактер, што значи да се њихове вредности мењају до постизања задовољавајућих показатеља квалитета модела (Gupta et al., 1998; Moriasi et al., 2007; Todorović, A., 2016). Параметри коришћени у овом раду приказани су у Табели 2.

Остали параметри су фиксни и одређени на основу анализе доступних подлога и изведених прорачуна, након чега се уносе у модел (USACE, 2000; Плавшић, 2012; Todorović, A., 2013). Ова подела омогућава да се калибрација усмери на најосетљивије параметре, уз очување физичке реалности модела (Beven, 2012; Refsgaard & Storm, 1996; Todorović, A., 2016).

Табела 2. Приказ метода прорачуна у моделу слива и усвојених параметара, Извор: Аутор
Table 2. Overview of calculation methods used in the catchment model and adopted parameters, Source: Author

Прорачунска компонента везе падавине-отицај	**Одабрана метода за модел слива реке Колубаре**	**Параметри потребни за прорачун**
Запремина директног отицаја	SCS – број криве (CN број)	Почетни губици падавина (mm) Број криве отицаја (CN) (-) Удео непропусних површина (%)
Транформација ефективних падавина у површински отицај	SCS јединични хидрограм	Време кашњења отицаја (min)
Базни отицај	Метода рецесије	Почетни протицај (m^3/s) Константа рецесије (-) Однос (-)

Валидација модела

Након завршене калибрације спроводи се валидација модела, која подразумева симулације са усвојеним параметрима на основу података који нису коришћени током калибрације, ради процене способности модела да поуздано репродукује хидролошки одговор слива у независним условима (Refsgaard & Storm, 1996; Moriasi et al., 2007; Todorović, A., 2016). У Табели 3 приказани су периоди који су коришћени за калибрацију и валидацију.

У поступку формирања и тестирања модела, период маја 2024. године коришћен је за калибрацију, док је за потребе валидације примењен исти календарски период у наредној години, односно мај 2025. године. Избор наведеног периода условљен је присуством израженијих падавинских епизода и одговарајућих протицаја, што омогућава поузданију идентификацију параметара модела (Плавшић, 2013; Gupta et al., 1998).

Примена узастопних година омогућила је проверу стабилности калибрисаних параметара у условима различитих хидролошких реализација, односно оцену њихове преносивости из периода калибрације у независан период валидације, што представља важан корак у верификацији хидролошких модела (Todorović, A., 2016; Beven, 2012). На тај начин омогућено је сагледавање утицаја усвојених параметарских вредности на репрезентацију процеса отицаја у временски блиским, али хидролошки независним условима (Плавшић, 2013).

Табела 3. Анализирани периоди коришћени у моделу, Извор: Аутор
Table 3. Analyzed periods used in the model, Source: Author

Период симулације	
01Maj2024 (00:00h) – 31Maj2024 (23:00h)	калибрација
01Maj2025 (00:00h) – 31Maj2025 (23:00h)	валидација

Показатељи квалитета модела

Ефикасност хидролошког модела оцењује се применом више статистичких показатеља који омогућавају квантитативну анализу слагања симулираних и осмотрених протицаја (Moriasi et al., 2007; Gupta et al., 2009; Плавшић, 2014; Todorović, 2016).

- Коефицијент Nash-Sutcliffe:

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

У коме су:

N – број података у низу;
Qsim,i (m^3/s) – симулирани протицај;
Q_(sim,i) (m^3/s) – опажени протицај;
Q_(osm,i) – варијанса осмотрених протока.

Коефицијент Nash–Sutcliffe (NSE) представља један од најчешће коришћених критеријума за оцену ефикасности хидролошких модела (Nash, Sutcliffe, 1970; Gupta et al., 2009). Заснива се на поређењу квадрата одступања између симулираних и осмотрених протока са варијансом осмотрених вредности. Његове вредности крећу се од -∞ до 1, при чему вредност 1 означава савршено поклапање резултата модела са мерењима. Показатељ је осетљив на системске и динамичке грешке, при чему већу тежину придаје слагању у домену високих вода, док је утицај малих вода мање изражен (Moriasi et al., 2007; Плавшић, 2014).

- Грешка у максималном протоку:

$$\varepsilon_0 = \frac{Q_{sim,max} - Q_{osm,max}}{Q_{osm,max}} \cdot 100\%$$

где су:

$Q_{sim,max}$ – максимални симулирани протицај;
$Q_{osm,max}$ – максимални осмотрени протицај.

Овај показатељ описује способност модела да репродукује вршне вредности протицаја, што је од посебног значаја у анализама екстремних хидролошких догађаја (Singh, 1995; Плавшић, 2014).

- Грешка у осмотреној и симулираној запремини:

$$\varepsilon_V = \frac{V_{sim} - V_{osm}}{V_{osm}} \cdot 100\%$$

где су:

V_{sim} – запремина симулираног хидрограма;

V_{osm} – запремина осмотреног хидрограма.

Овај показатељ омогућава оцену укупног водног биланса (Beven, 2012; Todorović, 2016).

- Релативна пристрасност (PBIAS)

$$B = \frac{\Sigma Q_{sim,i} - \Sigma Q_{osm,i}}{\Sigma Q_{osm,i}} \cdot 100\%$$

Вредности:

B=0 - нема систематског одступања;

B>0 - модел потцењује протицаје;

B<0 - модел прецењује протицаје.

- Релативна средња квадратна грешка RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{sim,i} - Q_{osm,i})^2}{n}}$$

Показатељ RMSE (Root Mean Square Error) изражава просечно одступање између симулираних и осмотрених протока и често се користи у анализама поузданости симулација (Legates, McCabe, 1999; Gupta et al., 2009). Мање вредности указују на боље поклапање резултата.

При оцени ефикасности модела неопходно је користити комбинацију више показатеља, јер појединачни статистички параметри не могу у потпуности описати квалитет симулације (Gupta et al., 2009; Beven, 2012). Посебно код континуираних симулација са поједностављеним моделима губитка падавина, потпуно поклапање симулираних и осмотрених протицаја није реално очекивано, те се успешност модела оцењује и на основу физичке реалности хидрограма (Плавшић, 2014; Todorović, 2016).

РЕЗУЛТАТИ

Калибрација HEC-HMS модела извршена је за период мај 2024. године на сливу Јабланице, у циљу прилагођавања параметара модела стварним хидролошким условима. Усвојене вредности параметара приказане су у табели 4, док су резултати симулације представљени графички и табеларно (график 5; табеле 5 и 6).

Табела 4. Усвојене вредности параметара за калибрацију и валидацију хидролошког модела, Извор: Аутор

Table 4. Adopted parameter values for calibration and validation of the hydrological model, Source: Author

Група параметара	Параметри	Вредности
Губици	Број криве отицаја (CN)	57
	Удео непропусних површина	1
Трансформација отицаја	Тип хидрограма (PRF)	350
	Време кашњења отицаја	360
Базни отицај	Тип почетног услова	Discharge
	Почетни протицај	0,181
	Константа опадања протицаја	0,93
	Тип граничног услова	Однос у односу на вршни протицај
	Однос	0,08

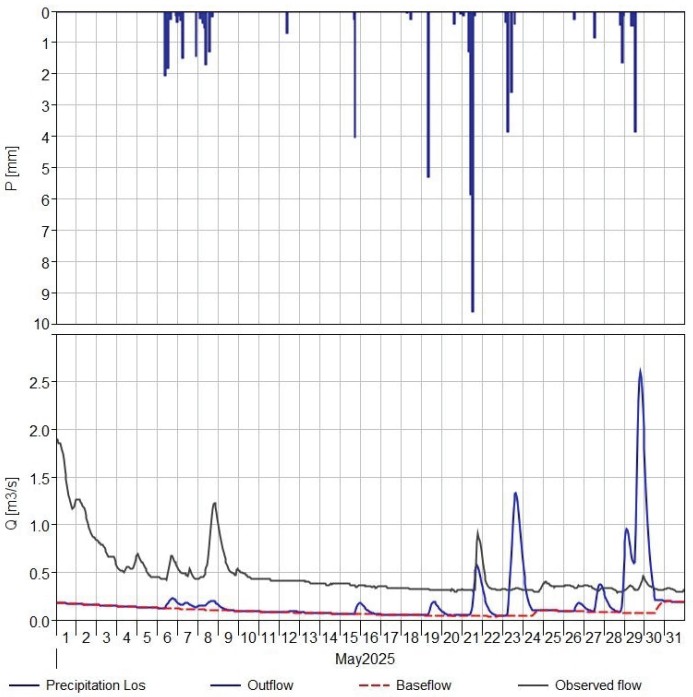


График 5. Осмотрени и моделирани протоци калибрације – мај 2024. године, Извор: Аутор

Graph 5. Observed and simulated discharges – calibration – May 2025. Source: Author

Табела 5. Показатељи квалитета модела – калибрација, Извор: Аутор
Table 5. Model performance indicators – calibration, Source: Author

Показатељи квалитета	
Релативна средња квадратна грешка RMSE	2,4
Коефицијент Nash-Sutcliffe	-4,890
Релативна пристрасност (PBIAS)	7,94
R^2	0,00

Табела 6. Карактеристике симулираног хидрограма - калибрација, Извор: Аутор
Table 6. Characteristics of the simulated hydrograph – calibration, Source: Author

Каратеристике хидрограма	
Хидролошки елемент	Јабланица
Површина слива (KM2)	117,06
Максимални протицај (M3/S)	3,8
Време појаве вршног протицаја	29 Мај 2024, 04:00
Запремина отицаја (MM)	6,62

Анализа добијених резултата показује да модел у задовољавајућој мери репродукује временску динамику протицаја, нарочито у погледу појаве и трајања значајнијих догађаја. Симулирани хидрограм прати општи тренд осмотрених протока и одражава основне карактеристике отицаја у посматраном периоду. Уочена одступања у појединим деловима хидрограма указују да модел не може у потпуности да прикаже све промене протока, што је очекивано при примени једноставних концептуалних модела губитака падавина током симулације појединачне падавинске епизоде. Упркос томе, добијени резултати показују да модел задржава динамику отицаја и омогућава адекватну репрезентацију основних хидролошких процеса на сливу.
На основу извршене анализе може се закључити да калибрисани модел представља поуздану основу за спровођење поступка валидације.
Валидација модела је извршена је за период мај 2025. године и вредности параметара модела коришћених у поступку валидације су исте као и у поступку калибрације. Резултати симулације приказани су графички и табеларно (график 6; табеле 7 и 8). Циљ валидације био је да се испита у којој мери модел, без даљег прилагођавања параметара, може да репродукује хидролошко понашање слива слива у условима другачије падавинске епизоде.

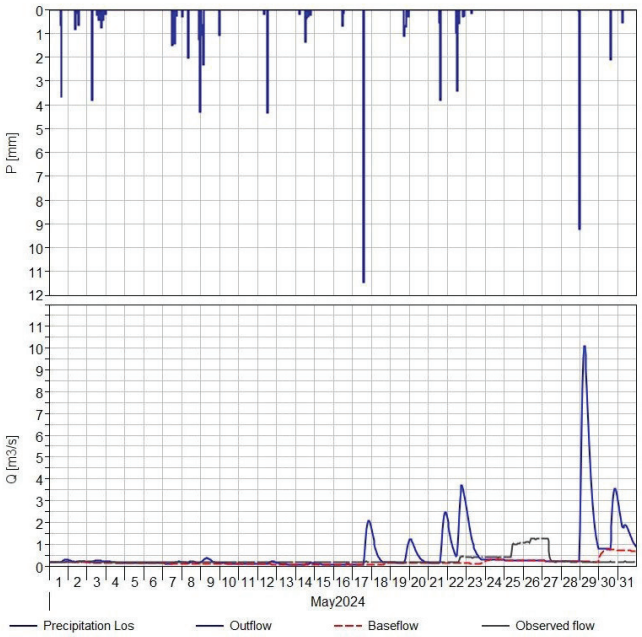


График 6. Осмотрени и моделирани протоци валидације – мај 2025. године, Извор: Аутор

Graph 6. Observed and simulated discharges – validation, May 2025, Source: Author

Табела 7. Показатељи квалитета модела – валидацијаџ, Извор: Аутор

Table 7. Model performance indicators – validation, Source: Author

Показатељи квалитета	
Релативна средња квадратна грешка RMSE	1,8
Коефицијент Nash-Sutcliffe	-2,413
Релативна пристрасност (PBIAS)	-23,75
R^2	0,00

Табела 8. Карактеристике симулираног хидрограма – валидација, Извор: Аутор

Table 8. Characteristics of the simulated hydrograph – validation, Source: Author

Каратеристике хидрограма	
Хидролошки елемент	Јабланица
Површина слива (KM2)	117,06
Максимални протицај (M3/S)	2,60
Време појаве вршног протицаја	29 Мај 2025, 19:00
Запремина отицаја (MM)	4,48

Анализа добијених резултата показује да модел задржава стабилно понашање и у оквиру валидационог периода. Симулирани хидрограм прати општи ток промена протока, као и појаву значајнијих догађаја. Уочена су одступања у појединим деловима хидрограма, пре свега у погледу интензитета реакције, што указује на ограничену способност модела да у потпуности прикаже све промене протока током симулације појединачне падавинске епизоде. Ипак, модел задржава стабилну динамику отицаја и не показује нестабилности које би указивале на прекомерно прилагођавање параметара у фази калибрације. Задржавање истих параметара указује на њихову хидролошку оправданост.

Упоређивањем резултата калибрације и валидације може се закључити да модел показује доследно понашање у различитим условима симулације са поједностављеним моделима губитка падавина.

ДИСКУСИЈА

Резултати калибрације и валидације показују да HEC-HMS модел омогућава задовољавајућу репродукцију општег хидролошког понашања слива током симулације појединачних падавинских догађаја. Иако одступања између симулираних и осмотрених протицаја остају присутна, модел је успео да прикаже временску динамику отицаја и основне карактеристике реакције слива.

Слични резултати су уочени и у бројним студијама примене концептуалних модела губитака падавина, где се истиче да савршено поклапање симулираних и осмотрених хидрограма није реално очекивати, посебно при коришћењу поједностављених метода губитака падавине (Beven, 2012; Singh, 1995; Nash, Sutcliffe, 1970; Todini, 1988). Ови модели пре свега имају за циљ репродукцију општег тренда и временског распореда отицаја, а не потпуно поклапање појединачних вредности протока. Сличан приступ у тумачењу резултата моделовања заступљен је и у домаћој литератури која се бави применом концептуалних хидролошких модела (Плавшић, 2014; Todorović, 2016; Zlatanović, 2006).

У анализи добијених статистичких показатеља уочено је да модел задржава релативно низак ниво грешке у репродукцији водног биланса, што указује на добру способност описивања укупне количине отицаја. Овакав резултат је у складу са налазима других аурора (Moriasi et al., 2007; Gupta et al., 1998; Schaefli, Gupta, 2007), који наглашавају да показатељи засновани на запремини отицаја често дају стабилнију оцену успешности модела од показатеља који су осетљиви на краткотрајне варијације протока. Значај очувања водног биланса као једног од кључних критеријума успешности симулације истакнут је и у домаћим истраживањима (Плавшић, 2014).

С друге стране, вредности коефицијента NSE указују на ограничену способност модела да у потпуности репродукује варијабилност протока током појединачних догађаја. Ово је очекивано, имајући у виду да је овај показатељ осетљив на локална одступања у хидрограму, нарочито у домену ниских вода (Gupta et al., 2009; Legates & McCabe, 1999; Krause et al., 2005; McCuen et al., 2006). У домаћим студијама примене хидролошких модела такође је наглашено да NSE често показује строжију оцену успешности у односу на показатеље који описују укупну количину отицаја (Todorović, 2016).

Упоређивање резултата калибрације и валидације показује да модел задржава доследно понашање у условима симулације са поједностављеним моделима губитка падавина. Задржавање истих параметара уз прихватљиву репродукцију хидролоког понашања слива указује на њихову физичку оправданост, што је у складу са препорукама у литератури да се успешност модела не оцењује искључиво на основу статистичког

поклапања, већ и на основу стабилности параметара и реалистичности симулираних процеса (Beven, 2012; Плавшић, 2014; Wagener et al., 2001; Perrin et al., 2001).
Ограничења модела огледају се у делимичној неспособности да верно репродукује интензитет појединих вршних вредности протока. Ово је уобичајено за концептуалне моделе који не укључују експлицитно моделирање процеса складиштења воде у тлу и подземним зонама (Singh, 1995; Clark et al., 2008; Fenicia et al., 2008). Ипак, способност модела да задржи стабилно понашање у валидационом периоду указује да параметри нису резултат искључиво статистичког прилагођавања, већ одражавају стварне хидролошке карактеристике слива, што је наглашено и у домаћим истраживањима примене оваквих модела (Todorović, 2016).
У целини, добијени резултати потврђују да HEC-HMS модел може представљати користан алат за анализу хидролошког понашања слива током појединачних падавинских догађаја, уз уважавање ограничења у детаљној репродукцији варијабилности протока.

ЗАКЉУЧАК

У раду је анализиран процес формирања површинског отицаја на сливу реке Јабланице до бране Стубо-Ровни применом хидролошког модела HEC-HMS у оквиру симулације појединачних падавинских догађаја. Формирани модел, заснован на SCS методи губитака, SCS јединичном хидрограму и рецесионом моделу базног протока, омогућио је репрезентацију основних карактеристика хидролошког понашања слива.
Калибрацијом модела за период мај 2024. године постигнуто је задовољавајуће слагање симулираних и осмотрених протока у погледу временске динамике и укупне запремине отицаја. Валидација модела на независном периоду мај 2025. године показала је да усвојени параметри задржавају стабилност и омогућавају репродукцију општег облика хидрограма и појаве значајнијих протицајних догађаја.
Уочена одступања у репродукцији појединих вршних вредности протока указују на ограничења примене поједностављених концептуалних модела губитака падавина, што је у складу са налазима из литературе. Ипак, модел добро осликава динамику отицаја, и иако се вршне вредности не поклапају има способност да адекватно опише хидролошко понашање слива.
Добијени резултати потврђују да HEC-HMS модел представља применљив алат за анализу процеса површинског отицаја на сливу реке Јабланице у условима симулације појединачних падавинских догађаја. Истовремено, указује се на значај даљег унапређења модела кроз примену детаљнијих улазних података и сложенијих метода описивања процеса губитака, како би се побољшала репродукција екстремних протицаја.

Захвалница
Рад је реализован у оквиру пројекта институционалног финансирања од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије под уговором број 451-03-34/2026-03/200169 од 05.02.2026. године.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петровић П. (1991). Карст хидрологија, Грађевинска књига, Београд.
2. Плавшић Ј. (2012). Хидролошко моделирање, Универзитет у Београду-Грађевински факултет, Београд.
3. Плавшић Ј. (2013). Примена хидролошких модела у анализи водног режима, Универзитет у Београду-Грађевински факултет, Београд.
4. Плавшић Ј. (2014). Хидролошко моделирање у управљању водним ресурсима, Универзитет у Београду-Грађевински факултет, Београд.
5. Ристић Р. (2011). Утицај вегетације на водни режим сливова, Универзитет у Београду-Шумарски факултет, Београд.
6. РХМЗ,1991-2023. Republički hidrometeorološki zavod Srbije. Meteorološki godišnjaci – klimatološki podaci u periodu od 1991 do 2023): Digitalna baza klimatoloških podataka. Beograd: RHMZ. Preuzeto sa https://www.hidmet.gov.rs/
7. Anderson E. (1973). National Weather Service River Forecast System - Snow Accumulation and Ablation Model, NOAA Technical Memorandum, Silver Spring.
8. Beven K. (2012). Rainfall-Runoff Modelling: The Primer, John Wiley & Sons, Chichester.
9. Bonacci O. (1993). Karst hydrology, Springer-Verlag, Berlin.
10. Clark M.P., Slater A.G., Rupp D.E., Woods R.A., Vrugt J.A., Gupta H.V., Wagener T., & Hay L.E. (2008): Framework for understanding structural errors (FUSE): A modular framework to diagnose differences between hydrological models, Water Resources Research 44 (12).
11. Chow V.T., Maidment D.R., & Mays L.W. (1988). Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York.
12. Erić, R., Plavšić, J., Todorović, A., & Đukić, V. (2019). Mogućnosti za primenu kalibrisanog hidrološkog modela epizoda za proračun računskih velikih voda. Vodoprivreda, 51, 179-186.
13. EEA. (2018). Corine land cover datasets (2018). European Environmental Agency. https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover (accessed /приступљено 13.04.2026)
14. Feldman A.D. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Technical Reference Manual, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis.
15. Fenicia F., Savenije H.H.G., Matgen P., & Pfister L. (2008). Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement, Water Resources Research 44 (1).
16. Ford D., & Williams P. (2007). Karst Hydrogeology and Geomorphology, Wiley, Chichester.
17. Gupta H.V., Sorooshian S., & Yapo P.O. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information, Water Resources Research 34(4), (751-763).
18. Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., & Martinez G.F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria, Journal of Hydrology 377, (80-91).
19. Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi" (2025). Sistem rane najave i upozorenja na poplave na slivu reke Kolubare - RNU „Kolubara", Beograd.
20. Krause P., Boyle D.P., & Bäse F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, Advances in Geosciences 5, (89–97).

21. Legates D.R., & McCabe G.J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic modeling, Water Resources Research 35(1), (233-241).
22. Madsen H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model, Journal of Hydrology 235, (276-288).
23. McCuen R.H. (2005). Hydrologic Analysis and Design, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River.
24. McCuen R.H., Knight Z., &Cutter A. G. (2006). Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index, Journal of Hydrologic Engineering 11 (6), (597–602).
25. Mishra S.K., & Singh V.P. (2003. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
26. Mockus V. (1964). Estimation of direct runoff from storm rainfall, USDA Soil Conservation Service, Washington D.C.
27. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., & Veith T.L. (2007). Model evaluation guidelines, Transactions of the ASABE 50(3), (885-900).
28. Nash J.E., & Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, Journal of Hydrology 10(3), (282-290).
29. Perrin C., Michel C., & Andréassian V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments, Journal of Hydrology 242 (3–4), (275–301).
30. Ponce V.M., & Hawkins R.H. (1996). Runoff curve number: Has it reached maturity?, Journal of Hydrologic Engineering 1(1), (11-19).
31. Priestley C.H.B., & Taylor R.J. (1972). On the assessment of surface heat flux, Monthly Weather Review 100, (81-92).
32. Refsgaard J.C., & Storm B. (1996). Construction, calibration and validation of hydrological models, In: Abbott M.B., Refsgaard J.C. (Eds.), Distributed Hydrological Modelling, Kluwer, Dordrecht, (41-54).
33. Scharffenberg W., & Fleming M. (2010). Hydrologic Modeling System HEC-HMS - User's Manual, USACE Hydrologic Engineering Center, Davis.
34. Schaefli B., & Gupta H.V. (2007). Do Nash values have value?, Hydrological Processes 21 (15), (2075–2080).
35. Sherman L.K. (1932). Streamflow from rainfall by the unit-graph method, Engineering News Record 108, (501-505).
36. Singh V.P. (1992). Elementary Hydrology, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
37. Singh V.P. (1995): Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, Highlands Ranch.
38. Singh V.P., & Woolhiser D.A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology, Journal of Hydrologic Engineering 7(4), (270-292).
39. Tallaksen L.M. (1995). A review of baseflow recession analysis, Journal of Hydrology 165, (349-370).
40. Tanasijević, Đ. (1963). Pedološka karta Srbije, list Beograd 1, razmera 1:50.000. Institut za proučavanje zemljišta Beograd i 'Geokarta' Beograd.
41. Todini E. (1988). The ARNO rainfall–runoff model, Journal of Hydrology 102 (1–4), (339–382).
42. Todorović A. (2013). Hydrological response modeling under changing climate conditions, Journal of Hydrology and Hydromechanics 61(2), (123-132).
43. Todorović A. (2016). Application of hydrological models in flood risk assessment, Water Resources Management 30(9), Springer, (3105-3118).

44. USACE (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Technical Reference Manual, US Army Corps of Engineers, Davis.
45. USACE (2015). Hydrologic Modeling System HEC-HMS - User's Manual, US Army Corps of Engineers, Davis.
46. USACE (2016). Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Applications Guide, US Army Corps of Engineers, Davis.
47. USDA SCS (1972). National Engineering Handbook, Section 4 - Hydrology, Soil Conservation Service, Washington D.C.
48. White W.B. (2002). Karst hydrology: recent developments and open questions, Engineering Geology 65, (85-105).
49. Wagener T., Gupta H.V., Boyle D.P., Han D., & Vijai Gupta, Sorooshian S. (2004). A framework for development and application of hydrological models, Hydrology and Earth System Sciences 8 (3), (327–350).
50. Wagener T., McIntyre N., Lees M.J., Wheater H.S., & Gupta H.V. (2001). Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall–runoff modelling: Dynamic identifiability analysis, Hydrological Processes 15 (2), (455–476).
51. Zlatanović, N., & Prohaska, S. (2015). Preliminarna hidrološka rekonstrukcija poplavnog talasa iz maja 2014. godine u slivu reke Kolubare. Vodoprivreda, Beograd, (276-278), 161-175.
52. Živanović N. (2006). Primena HEC-HMS modela u analizi bujičnih tokova, Građevinski fakultet, Beograd.