

Đukić V., Mihailović V. 2012. *Modelling of base flows by analysing the streamflow hydrograph*. Bulletin of the Faculty of Forestry 106: 71-86.

Весна Ђукић
Владислава Михаиловић

UDK: 556.047(282.04 Kolubara)
Оригинални научни рад
DOI: 10.2298/GSF1206071D

МОДЕЛИРАЊЕ БАЗНИХ ОТИЦАЈА АНАЛИЗОМ ХИДРОГРАМА ОТИЦАЈА

Извод: У току сушних периода, протицај на средњим и малим водотоцима је значајно смањен и једнак је протицају подземних вода. С обзиром да базни отицаји пружају информације о особинама аквифера и ретензионим карактеристикама слива, могућности анализе и симулације базних протицаја постају значајни у условима интензивног коришћења вода и све већих захтева и потреба за адекватном заштитом квалитета вода. У раду је формиран модел помоћу кога су, на основу хидрограма отицаја регистрованих на излазном профилу слива, описане законитости у променама базних отицаја, на примеру слива Колубаре до профила „Ваљево”. С обзиром да величину базног отицаја са неког слива није могуће измерити, резултати базних протицаја добијени применом методе локалних минимума усвојени су као критеријум према коме су поређене моделиране вредности базних отицаја. Применом формираног модела урађене су симулације хидрограма базног отицаја током три карактеристичне године (кишне -1970., просечне – 1985. и сушне – 1990.). Одступања између вредности базних протицаја добијених применом формираног модела и применом методе локалних минимума су прихватљива са становишта опште хидролошке тачности.

Кључне речи: базни отицаји, моделирање, хидрограм отицаја, крива концентрације, рецесиона крива

MODELLING OF BASE FLOWS BY ANALYSING THE STREAMFLOW HYDROGRAPH

Abstract: During dry periods, the flow of medium and small streams is significantly reduced and equal to groundwater flow. Since the base flows provide information about aquifer characteristics and retention characteristics of a basin, the possibilities of analysis and simulation of base flows gain importance under the conditions of

др Весна Ђукић, доцент, Универзитет у Београду - Шумарски факултет, Београд (e-mail: vesna.djukic@sfb.bg.ac.rs)

др Владислава Михаиловић, стручни сарадник, Универзитет у Београду - Шумарски факултет, Београд

intensive water use and the increasing demand for adequate water quality protection. In this paper, a model was established and used for the description of the principles governing the changes of base runoff on the basis of a streamflow hydrograph registered at the outlet of the basin on the example of the Kolubara basin up to the „Valjevo” profile. Since the amount of base runoff from a basin cannot be measured, the results of base flows obtained using the local minimum method were adopted as the criterion for the comparison of the modelled values of base runoffs. The created model was applied for making simulations of the base runoff hydrograph during three characteristic years (rainy 1970, average 1985, and dry 1990). Deviations between the base flow values obtained using the established model and by applying the local minimum method are acceptable from the standpoint of general hydrological accuracy.

Keywords: base runoff, modelling, streamflow hydrograph, concentration curve, recession curve

1. УВОД

Полазећи од претпоставке да је хидрограм отицаја неког површинског водотока најчешће позната величина која се осматра и региструје на излазном профилу слива, као и да се може анализирати раздвајањем на две компоненте (директни и базни отицај), овај рад се бави могућношћу анализе и симулације компоненте базног отицаја, односно отицаја подземних вода. Базни отицај је карактеристичан за маловодни период, а у току периода суше укупни отицај је једнак базном отицају. Базни отицај има тенденцију постепеног опадања кроз време, а у изразитим условима суше може доћи и до потпуног исцрпљења залиха воде у сливу односно нултог протицаја.

Базни отицаји пружају значајне информације о особинама аквифера и ретензионим карактеристикама слива, што је важно при планирању и управљању водним ресурсима у циљу предвиђања малих вода. Појава малих вода обично се везује за проблеме у водоснабдевању становништва, пољопривреде и индустрије, а маловодни периоди представљају потенцијалну опасност од деградације животне средине. У досадашњој хидролошкој пракси много више пажње се посвећивало моделирању директног отицаја услед потребе за заштитом сливова од великих вода. Међутим, услед интензивног коришћења вода и све већих захтева и потреба за адекватном заштитом квалитета вода намеће се потреба за анализом и симулацијом базних протицаја и маловодних периода.

Многи научници, још од времена Daussa (1842) и Boussinesq-a (1877), бавили су се квантитативним анализама рецесионих кривих отицаја у циљу њиховог моделирања. Раздвајање хидрограма неког површинског водотока на базни и директни отицај дуго је тема интересовања многих хидролога (Meуboom, 1961,

Rorabaugh, 1964, Hall, 1968, Tallaksen, 1995, Toebes, Strang, 1964, Lindsley *et al.* 1982, Bevans, 1986, Nathan, McMahon, 1990, Moore, 1992, Rutledge, 1992), јер рецесиона крива садржи значајне информације о расположивим ресурсима подземних вода неког подручја. Проблематика базних протицаја анализирана је и у великом броју радова објављених последњих година (Wittenberg, 2003, Yin *et al.* 2004, Huang *et al.* 2005, Chen *et al.* 2006, Zhang *et al.* 2006, Aksoy *et al.* 2009, Aksoy and Wittenberg, 2011, Qian *et al.* 2012) што указује да је овај проблем и даље актуелан.

У раду је формиран модел базних отицаја слива реке Колубаре до водомерне станице (в.с.) „Ваљево” помоћу кога је могуће описати промене отицаја подземних вода у току времена, вршити предвиђања базних отицаја и дефинисати ретензиона својства анализаног слива или неког другог слива сличних карактеристика.

С обзиром да базни отицаји зависе првенствено од педолошких и геолошких карактеристика слива, које се у току времена много спорије мењају у односу на климатске чиниоце, може се закључити да базни отицаји представљају детерминистички део хидрограма отицаја. Због тога је базни отицај погоднији за анализу и успостављање законитости у његовим променама у току времена. Међутим, у пределима са честим падавинама, какав је и слив разматран у раду, базни отицаји зависе и од интензитета падавина па могу бити подложни флукуацијама.

Ради анализе утицаја геолошких карактеристика терена на величину базног отицаја, 1980. године Институт за хидрологију из Велике Британије (сада је то Центар за екологију и хидрологију) формулисао је кључан показатељ утицаја геолошких карактеристика терена на величину малих вода који је назван индекс базног протицаја (BFI) и који представља однос између запремине базног отицаја и укупне запремине отицаја током године. Вредности BFI варирају између 0 и 1, при чему мање вредности одговарају сливовима мање пропусне моћи, док веће вредности BFI одговарају сливовима веће пропусне моћи.

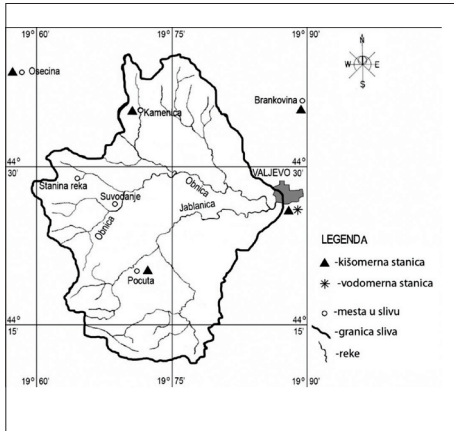
Промене метеоролошких услова у току године посебно утичу на облик опадајуће, односно рецесионе гране хидрограма отицаја. Губици на евапотранспирацију из речног басена и из речног корита зависе од доба године, као и од дубине нивоа подземне воде. Као последица тога, обично се главна крива рецесије одређује посебно за сваку сезону, што је урађено и у овом раду. Могло би се претпоставити да рецесиона крива добијена за зимски период много боље представља отицање подземних вода, јер су губици на евапотранспирацију минимални. Међутим, учестост ефективних падавина у току зиме и флукуације температуре доводе до честих варијација у величини површинског и базног отицаја, тако да је скоро немогуће издвојити довољан број одговарајућих рецесионих сегмената базног отицаја са хидрограма отицаја. За многе токове није могуће конструисање главне рецесионе криве за зимски период и већина рецесионих кривих се изводи за летњи период (Gustard, 1989), када је протицај у површинском току у знатној мери смањен у односу на просечни и када у њему доминира отицај од подземне воде.

2. ОПИС СЛИВА КОЛУБАРЕ ДО В.С. „ВАЉЕВО”

Слив реке Колубаре до в.с. „Ваљево” (слика 1) налази се у средишњем делу Србије и обухвата горњи део слива Колубаре површине 340 km². Он обухвата слив реке Обнице (187.21 km²), који се простире северозападно од Ваљева, и слив реке Јабланице (152.79 km²), који се простире југозападно од Ваљева.

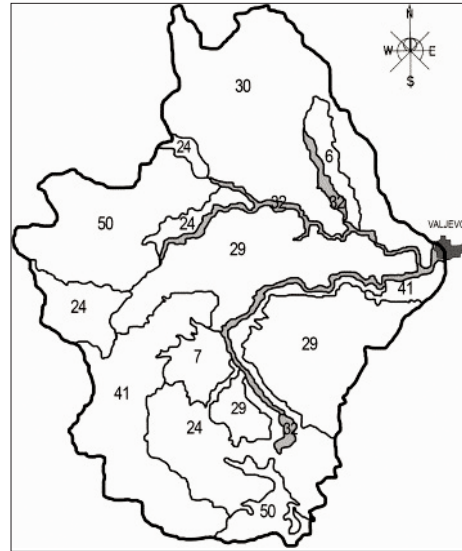
Овај део слива Колубаре је веома рељефно изразито подручје. Надморске висине се крећу од 1100 до 1300 m н.в. у вишим деловима слива, до 200-300 m н.в. у алувијалним долинама река. Вертикална израженост подручја чини га богатим изворима и водотоцима разних величина.

Клима у овом делу Србије је изузетно влажна и са великом количином падавина, при чему су просечне годишње падавине око 940 mm.



Слика 1. Слив реке Колубаре до в.с. „Ваљево”

Figure 1. The catchment of the Kolubara River up to the "Valjevo" water level monitoring station (w.l.m.s)



Слика 2. Педолошка карта слива реке Колубаре до в.с. „Ваљево”.

Легенда: 6, 7 - смоница; 27, 29 - смеђе рудо земљиште на кречњаку; 30 - параподзол; 32 - алувијално земљиште; 41 - смеђескелетноидно земљиште на шкриљцима; 50 - голо земљиште.

Figure 2. Soil map of the catchment of the Kolubara River up to the "Valjevo" water level monitoring station.

Legend: 6, 7 - smonical, 24, 29 - reddish brown soil on a limestone base; 30 - parapodzol; 32 - alluvial deposits; 41 - brown skeletal soil over schist; 50 - bare soil.

На предметном сливу издвојени су следећи педолошки типови земљишта (Institut za zemljište, 1989) : смеђе рудо земљиште на кречњаку (27%), смеђе скелетоидно земљиште на шкриљцима (23,9%), рендине (13,87%), црвеница (0,11%), параподзол (22,76%), алувијални наноси (2,22%), смоница (5,62%) и камењар (0,98%) (слика 2). У брдско-планинским деловима слива

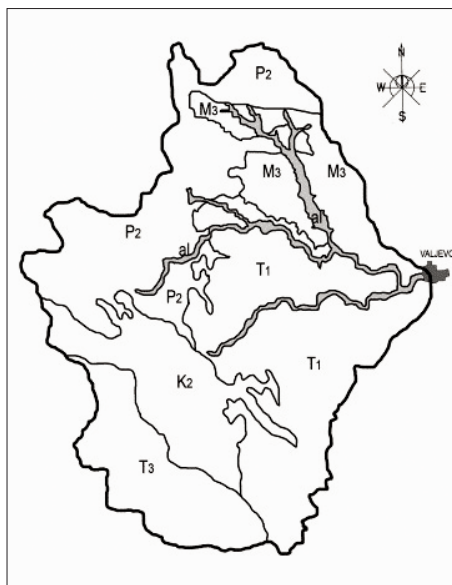
доминирају земљишта на кречњацима и смеђе скелетоидно земљиште на шкриљцима, док се у нижим деловима слива налазе смонице, параподзол и алувијални наноси. У вишим деловима слива преовлађују листопадне шуме (36,5%), у средишњим деловима су ливаде (39,06%), и воћњаци (7,18%) док се пољопривредне културе гаје на обрадивом пољопривредном земљишту у алувијалним долинама река (12,78%). Мањи део површине разматраног слива заузимају голети (1,05%), урбанизоване површине (1,89%) и водено огледало река (2,11%).

Различите врсте стена распрострањене у горњем делу слива Колубаре до в.с. „Ваљево” могу се уопштити у следеће 4 категорије (Institut za zemljište, 1989): кречњаци (41,97%), шкриљци (23,94%), глине (28,38%) и алувијум (2,21%) (Слика 3).

3. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ

Основни улазни подаци коришћени за моделирање базних отицаја су осмотрене дневне вредности отицаја регистроване на в.с. „Ваљево” у периоду од 1961. до 1996. године, јер обрада података раздвајањем хидрограма обезбеђује знатно боље резултате када су у питању вишегодишња осматрања. Период осматрања, усвојен у раду, у складу је са препоруком Светске Метеоролошке Организације (WMO) да референтни период осматрања за примену метода математичке статистике у хидролошкој пракси буде 30 година (World Meteorological Organisation, 2009).

У раду су најпре, на бази података регистрованих хидрограма укупног отицаја на водомерном профилу „Ваљево” за три карактеристичне године (изразито кишне - 1970. године, изразито сушне - 1990. године и просечне - 1985. године), анализирани три различите графичке методе (метода фиксних интервала, метода клизних интервала и метода локалних минимума) у циљу избора одговарајуће репрезентативне методе, која ће представљати критеријум на основу кога ће се поредити моделиране вредности базних протицаја.



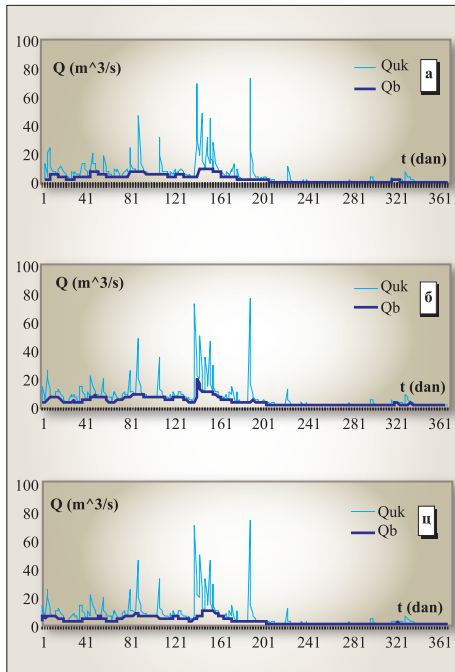
Слика 3. Геолошка карта слива реке Колубаре до в.с. „Ваљево”.

Легенда: ал-алувијум, K₂, T₁, T₃- кречњаци, M₃-глина, P₂ –глиновити шкриљци

Figure 3. Geological map of the catchment of the Kolubara River up to the "Valjevo" water level monitoring station.

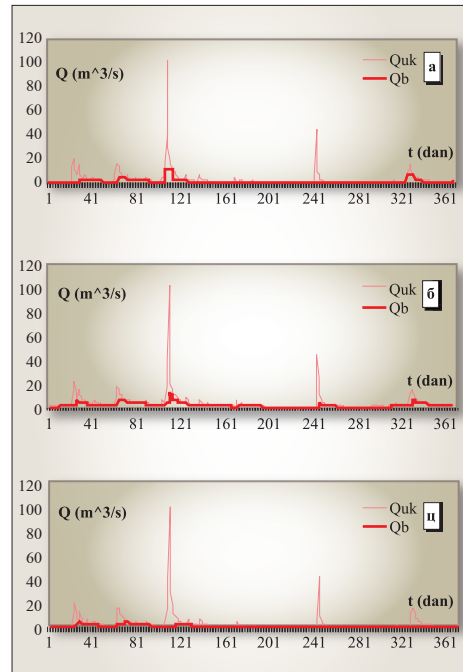
Legend: al – alluvium, K₂, T₁, T₃ – limestone; M₃ – clay; P₂ – clay schists.

Ове методе базиране су на концептуално три различита алгоритма који на одређени начин извлаче линије између најнижих тачака хидрограма отицаја (Henning, A., Pettyjohn, T., 1979). Издвајање хидрограма базних отицаја из хидрограма укупних отицаја применом приказаних графичких метода урађено је применом компјутерског програма HYSEP (Henning, A., Pettyjohn, T., 1979). Хидрограми базних отицаја добијени применом графичке методе фиксних интервала, клизних интервала и локалних минимума у карактеристичним годинама, на основу којих су поређене наведене графичке методе, приказани су на графиконима 1-3.



Графикон 1. Осмотрени средњи дневни отицаји и базни отицаји добијени методом фиксних интервала (а), методом клизних интервала (б) и методом локалних минимума (ц) (р. Колубара, в.с. Ваљево, 1970.год.)

Diagram 1. Observed mean daily discharge and base flow obtained by applying the fixed intervals method (a), the sliding interval method (b) and the local minimum method (c) (the Kolubara River, "Valjevo" water level monitoring station, 1970)



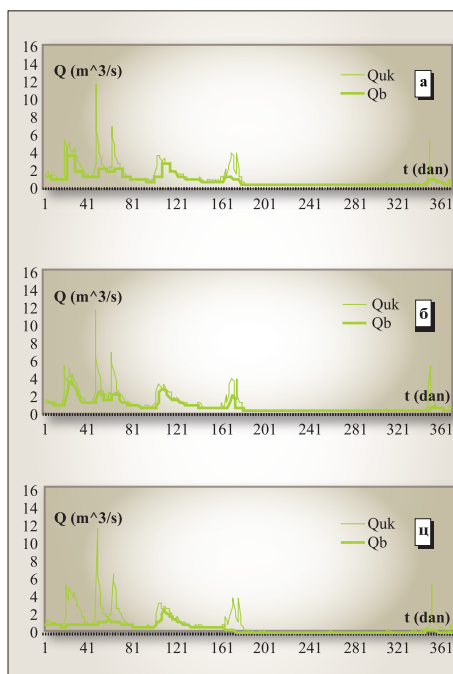
Графикон 2. Осмотрени средњи дневни отицаји и базни отицаји добијени методом фиксних интервала (а), методом клизних интервала (б) и методом локалних минимума (ц) (р. Колубара, в.с. Ваљево, 1985.год.)

Diagram 2. Observed mean daily discharge and base flow obtained by applying the fixed intervals method (a), the sliding interval method (b) and the local minimum method (c) (the Kolubara River, "Valjevo" water level monitoring station, 1985)

Визуелном анализом хидрограма базних отицаја добијених применом три различите графичке методе, закључено је да се применом методе локалних минимума добијају вредности базних отицаја које највише одговарају физичкој природи отицаја подземних вода и ранијим теоријским анализама и ове вредности базних отицаја усвојене су као критеријум према коме су поређене моделиране вредности базних отицаја. Ипак, одређеност за одређену графичку методу као одговарајућу има субјективни карактер с обзиром да избор одређене графичке методе као одговарајуће не може бити поткрепљен мереним подацима базних отицаја.

Како се карактеристике отицаја разликују у току трајања падавина и након престанка падавина, и модели базних отицаја помоћу којих се описују различити режими отицања подземних вода су такође различити. За описивање грана пораста хидрограма базних протицаја на разматраном сливу анализирани су различите законитости које повезују базне протицаје у неколико суседних временских тренутака (линеарне, експоненцијалне, полиномне и логаритамске). Описивање промена базних отицаја је посебно тешко у делу највиших ордината хидрограма и не може се са прецизношћу одредити. За описивање промена базних отицаја у току трајања падавина усвојено је да линеарна регресиона једначина добијена на основу анализе великог броја претходно издвојених и груписаних растућих грана хидрограма базних отицаја у току периода од 1961. до 1996. године најбоље одговара графички добијеним вредностима базних отицаја, а промене базних отицаја у току периода без падавина описане су експоненцијалном једначином добијеном анализом рецесионих грана хидрограма у истом временском периоду.

Анализа рецесионих кривих омогућава симулацију протицаја и залиха воде у сливу током маловодних



Графикон 3. Осмотрени средњи дневни отицаји и базни отицаји добијени методом фиксних интервала (а), методом клизних интервала (б) и методом локалних минимума (ц) (р. Колубара, в.с. Ваљево, 1990.год.)

Diagram 3. Observed mean daily discharge and base flow obtained by applying the fixed intervals method (a), the sliding interval method (b) and the local minimum method (c) (the Kolubara River, "Valjevo" water level monitoring station, 1990)

периода и суша. Велики број рецесионих кривих је анализиран у циљу формирања главне криве рецесије, на основу које би се моделирале промене базних отицаја по престанку падавина. Било који хидрограм услед пљуска представља краткотрајан догађај и његова крива рецесије се разликује од неке наредне криве рецесије, зависно од варијација у прихрањивању издани и количини падавина, различитих претходних услова и доба године. На основу одређеног броја хидрограма који приказују различите режиме отицаја и прекривајући период различитих начина акумулисања воде, хидрограми се комбинују дајући главну криву рецесије. Осредњена крива, која обухвата многе од ових рецесионих кривих базног отицаја назива се главна крива рецесије.

За описивање промена базних отицаја након престанка падавина примењен је модел линеарног резервоара, у коме се претпоставља да је процес отицања воде са слива, по престанку падавина, аналоган истицању воде из резервоара, при чему се претпоставља линеарна повезаност између запремине резервоара, S [m^3] и истицања из њега, Q [m^3s^{-1}] што се може представити релацијом (1):

$$S = k \cdot Q, \dots\dots\dots (1)$$

при чему је: k - ретензиона константа (време ретардације слива) [-]

Отицај воде из линеарног резервоара може се описати експоненцијалном једначином рецесије:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-(t-t_0)/k}, \dots\dots\dots (2)$$

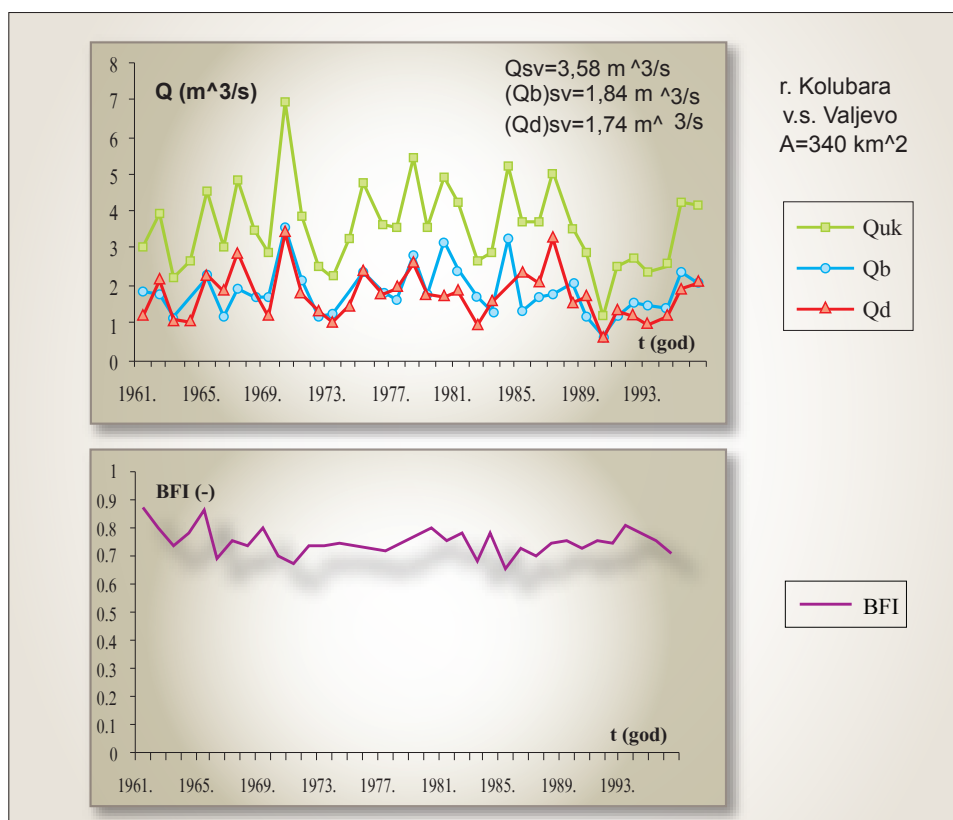
где је: Q_0 - отицај у тренутку t_0 [m^3s^{-1}]

Вредност ретензионе константе је мања у горњем делу рецесионе криве и повећава се континуално са смањењем отицаја. Разлог промене вредности ретензионе константе дуж рецесионе криве лежи у различитим врстама отицаја воде по престанку падавина, које учествују у формирању рецесионе гране хидрограма.

За све регистроване хидрограме дневних отицаја у периоду од 1960. до 1990. године анализирани су рецесионе криве отицаја и свака од њих је описана експоненцијалном једначином облика (2). Због различитих метеоролошких услова и различитих режима отицаја у току различитих сезона, рецесионе криве се разликују за поједина годишња доба, због чега су за свако годишње доба одређене осредњене криве рецесије. Анализирани су оне рецесионе криве отицаја код којих рецесија траје најмање седам дана. Вредности отицаја код сваке рецесионе криве подземних вода, добијене графичким путем методом локалних минимума, су најпре трансформисане у логаритамску размеру, а затим су вредности отицаја у почетном тренутку и вредности ретензионе константе одређене методом најмањих квадрата. Осредњене криве рецесије за свако годишње доба године, као и главна крива рецесије одређене су на основу просечних вредности отицаја у почетним тренуцима рецесије подземних вода и просечних вредности ретензионих константи.

4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

У раду су урађене симулационе анализе базних протицаја добијених применом графичке методе локалних минимума из хидрограма укупних протицаја на в.с. „Ваљево” на реци Колубари у периоду од 1961. до 1996. године и прорачунате су вредности Индекса Базног Протицаја (BFI). Анализе индекса базних протицаја показале су да на анализираном сливу базни протицаји имају изузетну важност, јер се у периоду 1961-1996. године BFI креће у границама од 0,65 до 0,87. На бази резултата ових симулација на графикону 4 приказане су годишње серије промена укупног протицаја и компоненти базног и директног протицаја, као и промене индекса базног протицаја током анализираног периода.



Графикон 4. Упоредни приказ годишњих серија укупног протицаја (Q_{uk}) и компоненти базног (Q_b) и директног (Q_d) и индекса базног протицаја (BFI) у периоду 1961-1996.год.

Diagram 3. Comparative survey of the annual series of total flow (Q_{uk}), component base flow (Q_b), direct (Q_d) and the base flow index (BFI) for the 1961-1996 period.

Током анализираниог периода 1961-1996. год. варијације просечних годишњих вредности BFI су мале и оне варирају између вредности 0,65 и 0,87, при чему је просечна вишегодишња вредност овог индекса 0,75. Анализирајући промене укупних и базних протицаја у току три карактеристичне године (1970., 1985. и 1990.) примећује се да је удео базних отицаја у укупном највећи у току 1990. год., при чему BFI има вредност 0,72, што значи да у току сушне 1990. године базни отицај доминира у укупном отицају, што је у складу са чињеницом да базни отицај доминира у укупном отицају у маловодним периодима. Високе вредности индекса базног протицаја у току три карактеристичне године, као и висока просечна вишегодишња вредност овог коефицијента, последица су значајне распрострањености карста на предметном сливу, у коме се могу акумулисати велике количине подземних вода.

Анализом издвојених кривих концентрације хидрограма базних отицаја, применом методе најмањих квадрата, за сваку грану пораста добијене су линеарне повезаности које повезују протицаје у суседним временским тренуцима, Q_t и Q_{t-1} . Осредњена крива концентрације може се представити линеарним регресионим моделом типа AP(1):

$$Q_t = 1,094 \cdot Q_{t-1} + 0,0075, \dots \dots \dots (3)$$

Након издвајања и анализе свих рецесионих грана хидрограма отицаја у току идентификационог периода добијене су осредњене криве рецесије. Ове осредњене криве рецесије за свако годишње доба имају приближно једнаке вредности ретензионе константе слива. У табели 1 су приказани параметри рецесионих кривих за свако годишње доба: реципрочна вредности ретензионих константи слива за свако годишње доба, α (-); вредности отицаја у почетном тренутку, Q_0 (m^3/s); број рецесионих кривих коришћених за анализу, N (-), и укупан број дана трајања рецесије, T_r .

Табела 1. Параметри рецесионих кривих за појединачна годишња доба (р. Колубара, в.с. Ваљево, 1961.-1996.год.)

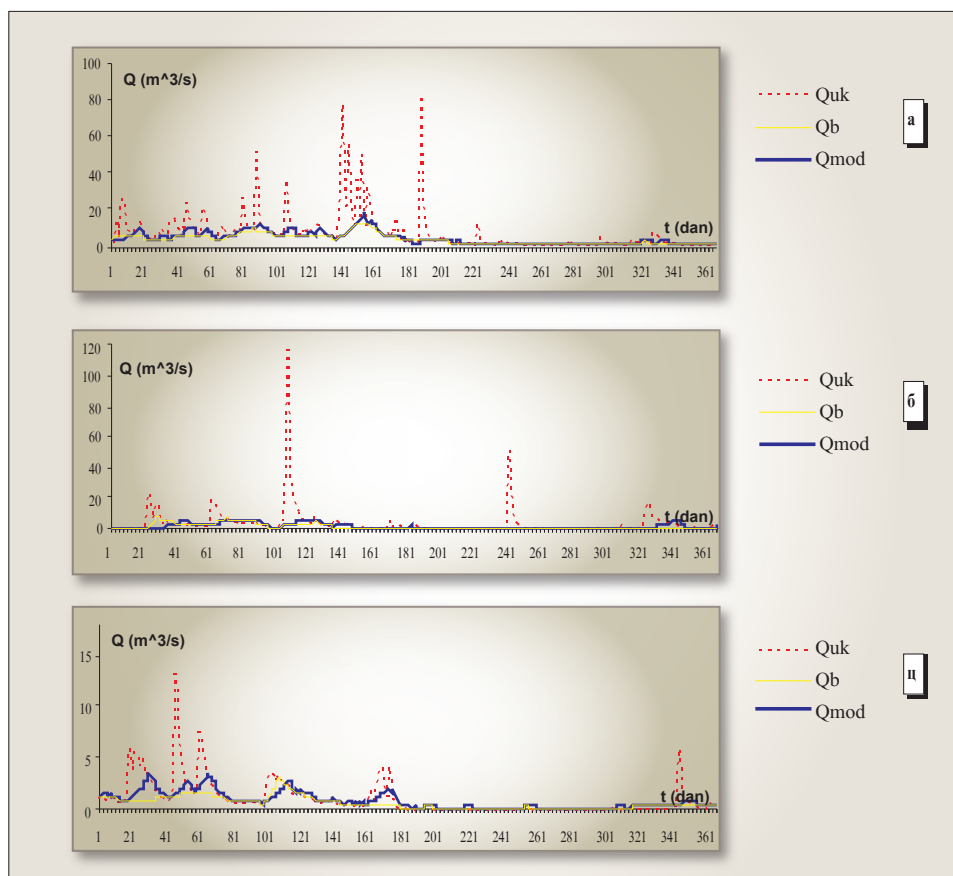
Table 1. Recession curve parameters for certain seasons (the Kolubara River, the Valjevo water level monitoring station, 1961-1996)

Годишње доба / Season	$\alpha=1/k$	Q_0	N	T_r
Пролеће / Spring	0,04082	2,717	78	1189
Лето / Summer	0,04231	1,0053	72	1086
Јесен / Autumn	0,0400	1,433	51	647
Зима / Winter	0,0415	2,985	50	732

Главна крива рецесије може се приказати следећом једначином:

$$Qt = 1,813 \cdot e^{(-0,0412 \cdot (t - t_0))}, \dots \dots \dots (4)$$

Симулациони модел базних протицаја добијен је комбинацијом једначине (3), помоћу које су описане гране пораста базних протицаја, и једначине (4) помоћу које је описана рецесија базних протицаја. Базни протицаји следе једначину гране пораста базних протицаја до тренутка престанка директног отицаја, након чега важи једначина главне криве рецесије. На графикону 5 је дат упоредни приказ промена укупних отицаја и базних отицаја добијених графичком методом локалних минимума и применом формираног модела, за три карактеристичне године: 1970., 1985. и 1990. год.



Графикон 5. Упоредни приказ серије укупних отицаја и серија базних отицаја добијених по методи локалних минимума и применом модела за три карактеристичне године: 1970 (а), 1985. (б) и 1990 (ц) (р. Колубара, в.с. „Ваљево”)

Diagram 5. A comparative figure of total flows and a series of base flows obtained by applying the graphic method of local minimums and the formed model during three characteristic years: 1970 (a), 1985 (b) i 1990 (c) (the Kolubara River, the Valjevo water level monitoring station, 1961-1996)

На основу графикана 5, закључује се да су одступања између вредности базних протицаја добијених применом графичке методе локалних минимума и применом развијеног модела мала. У табели 2 су приказане израчунате укупне годишње запремине базних отицаја добијене по методи локалних минимума и применом модела, као и одступања између ових вредности за три карактеристичне године.

Табела 2. Годишње запремине базних отицаја добијене применом графичке методе локалних минимума (V_{blm} , $10^6 m^3$) и применом модела (V_{bm} , $10^6 m^3$) и одступања између ових вредности (δ ,%)

Table 2. Annual volumes of the base flow obtained by applying the local minimums method and the developed model and discrepancies occurring between these values

	1970.	1985.	1990.
V_{blm} ($10^6 m^3$)	3603,24	1321,89	625,580
V_{bm} ($10^6 m^3$)	4194,29	1513,73	844,219
δ (%)	14,09	12,67	25,89

За све три карактеристичне године одступања између вредности базних отицаја добијених методом локалних минимума и применом развијеног модела су у границама дозвољених. У току просечне, 1985.год., релативна грешка у процени укупне годишње запремине базног отицаја износи око 15%, док је у у кишној око 20%. Највећа одступања у процени укупне запремине годишњег базног отицаја (око 35%) су у току 1990. год, при чему би та одступања била знатно мања у случају да је усвојена графичка метода фиксних интервала или графичка метода клизних интервала, као репрезентативна графичка метода са којом би се поредиле моделиране вредности базних отицаја.

На први поглед, добијене грешке су релативно велике, али симулација базних протицаја у маловодним периодима (летњи месеци и први јесењи месец) је сасвим задовољавајућа. Основни разлог због кога се повремено јављају изразитија одступања између вредности базних отицаја добијених применом симулационог модела формираног у раду и вредности базних отицаја добијених применом методе локалних минимума лежи у чињеници да разматрани слив карактеришу велике и честе падавине које у знатној мери утичу и на карактеристике базних отицаја и доводе до великих флукуација у променама базних отицаја. У оваквим случајевима теже је успоставити зависност која би описивала промене базних отицаја у току времена.

5. ЗАКЉУЧАК

У раду је формиран симулациони модел базних отицаја слива реке Колубаре до в.с. „Ваљево”, полазећи од чињенице да су при формирању симулационог модела једино осмотрене вредности отицаја на излазној станици слива (в.с. „Ваљево”) биле познате.

На основу приказаних анализа прерасподеле укупног протицаја на компоненте директног и базног отицаја и постојеће методе и моделе за симулацију рецесионе гране хидрограма отицаја може се закључити да су на анализираном сливу реке Колубаре на годишњем нивоу базни протицаји истог реда величине као и директни отицаји, па анализа базних протицаја заслужује велику пажњу, посебно у маловодним периодима и у условима када се тежиште хидролошких анализа усмерава за потребе разраде управљачких модела коришћења и заштите вода.

Да би се развили адекватни модели хидрограма базних протицаја неопходно је разматрати комплетну динамику процеса настанка базног отицаја која подразумева смену периодичних фаза допуњавања подземног резервоара и континуалног истицања које је функција тренутног стања нивоа воде у подземном резервоару.

Прелиминарне анализе базних протицаја на бази регистрованих укупних протицаја показале су да је могуће развити адекватан модел и за фазе пораста и за фазе опадања хидрограма базних протицаја. На тај начин могуће је пратити промене отицаја подземних вода. С обзиром да се ради о сливу са великом количином падавина и великим флукуацијама базних протицаја, модел је сложенији у односу на моделе који описују промене базних протицаја у пределима са умереном количином падавина.

ЛИТЕРАТУРА

- Aksoy H, Wittenberg H. (2011) *Nonlinear baseflow recession analysis in watersheds with intermittent streamflows*. Hydrology Science Journal, 56(2), (226-237)
- Aksoy H, Kurt I, Eris E. (2009) *Filtered smoothed minima baseflow separation method*. Journal of Hydrology, 372(1-4), (94-101)
- Bevans H.E. (1986): *Estimating stream-aquifer interactions in coal areas of eastern Kansas by using streamflow records*. Selected Papers in the Hydrologic Sciences. U.S. Geological Survey Water – Supply Paper 2290, (51-64)
- Boussinesq J. (1877): *Essai sur la theorie des eaux courantes*. Memoires presentes par divers savants a l'Academie des Sciences de l'Institut National de France, XXIII (1).
- Chen L Q, Liu C M, Li F D. (2006) *Reviews on base flow researches*. Progress in Geography, 25(1) (1-15)
- Dausse M. (1842): *De la pluie et de l'influence des forets sur la cours d'eau*. Ann. Ponts Chaussees, Mars-Avril, (184-209)
- Freeze R. A. (1969): *The Mechanism of Natural Ground-water Recharge and Discharge: 1. One-dimensional, Vertical, Unsteady, Unsaturated Flow above a Recharging or Discharging Ground Water Flow System*, Water Resources Research 5 (1), (153–171)
- Gustard A., Roald, L.A., Demuth, S., Lumadjeng, H.S. (1989): *Flow Regimes from Experimental and Network Data (FRIEND)*, Volume I Hydrological Studies, Agricultural University of Wageningen,
- Hall F.R. (1968): *Base flow recessions – a review*. Water Resour. Res., 4(5) (973-983)

- Henning A., Pettyjohn T. (1979): *Hysep-hydrograph separation program*, U.S. Geological Survey.
- Huang G.R., Chen Y.Q. (2005) *Review of some problems about low runoff*. Water Resources and Power, 23(4) (61-64)
- Lindsley R.K., Kohler M.A., Paulhus J.L.H. (1982): *Hydrology for engineers (3rd ed.)*. McGraw-Hill, New York, NY. (508)
- (1980): *Low Flows Studies Report, 3 volumes*. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Meyboom P. (1961): *Estimating ground water recharge from stream hydrographs*. J.Geophys. Res. 66, (1203-1214)
- Moore G.K. (1992): *Hydrograph analysis in a fractured rock terrane*. Ground Water 30 (3), (390-395)
- Nathan R.J., McMahon T.A. (1990): *Evaluation of automated techniques for base flow recession analyses*. Water Resour. Res., 7(26), (1465-1473)
- Qian, K., Wan, Li., Wang, X., JingJing LV, Liang, S.H. (2012) *Periodical characteristics of baseflow in the source region of the Yangtze River*, Journal of Arid Land 4(2), (113-122)
- (1989): *Pedološki pokrivač zemljišta zapadne i severozapadne Srbije*. Institut za zemljište, Beograd
- Rorabaugh M. I. (1964): *Estimating changes in bank storage and ground water contribution to streamflow*. Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Publ. 63, (432 – 441)
- Rutledge A. T. (1992): *Methods of using streamflow records for estimating total and effective recharge in the Appalachian Valley and Ridge, Piedmont, and Blue Ridge physiographic provinces*. In: Hotchkiss, W.R. and A.I. Johnson, eds., Regional Aquifer Systems of the United States, Aquifers of the Southern and Eastern States. American Water Resources Assoc. Monograph Series.no.17, (59-73)
- Tallaksen L.M. (1995): *A review of baseflow recession analysis*. J. Hydrol., 165, (311-348)
- Toebe C., Strang D.D. (1964): *On recession curves, I-Recession equations*. J. Hydrol. (New Zealand), 3(2), (2-15)
- Yin F C, Wang Z G, Liang H. (2004): *Advances in low flow research*. Advance in Water Science, 15(2), (249-254)
- Wittenberg H. (2003): *Effect of season and man-made changes on base-flow and flow recession: case studies*. Hydrology Processes, 17(11), (2113-2123)
- World Meteorological Organization (2009): *Weather Watch Technical Report*. Handbook on CLIMAT and CLIMAT TEMP Reporting
- Zhang Y K, Schilling K E. (2006): *Effects of land cover on water table, soil moisture, evapo transpiration and groundwater recharge: a field observation and analysis*. Journal of Hydrology, 319(1-4), (328-338)

Vesna Đukić
Vladislava Mihailović

MODELLING OF BASE FLOWS BY ANALYSING THE STREAMFLOW HYDROGRAPH

Summary

Assuming that the runoff hydrograph of a surface watercourse presents commonly known quantity that can be observed and registered at the outlet of the basin, and that it can be analyzed by separating the two components (direct runoff and base flow), this paper deals with the possibility of analysis and simulation components of the base flow, i.e. groundwater flow. Base flows are characteristic for low flow periods and during the periods of drought, total runoff is equal to the base flows. Conditions of intensive water use and an increasing demand for adequate protection of water quality impose the necessity for the analysis and simulation of base flows and low flow periods.

The quantity of base flow from a catchment cannot be measured, but there are different graphical methods and computational procedures, which help in the separation of base flows from the total runoff hydrograph.

The comparative analysis of the results of base flow separation through the application of three graphical procedures i.e. using (i) the fixed interval method, (ii) the sliding interval method, and (iii) the local minimum method has been performed on the basis of measured daily mean stream discharges at "Valjevo" w.l.m.s. for three different annual periods with distinct climatic characteristics (an extremely rainy year – 1970, an average year – 1985, and an extremely dry year – 1990). After the analysis of these methods had been performed, the base flow values obtained through the application of the local minimum method were adopted as representative values for further investigations on the basis of which base flow changes in the course of time were modelled. Through the application of this method, base flow and surface runoff components were isolated from the total streamflow hydrograph in the period between 1961 and 1996. The model of base flows for the basin of the Kolubara River up to the water level monitoring station „Valjevo” was established through the analysis of obtained baseflow hydrographs and the basic regularities of the changes in base flows during the rainy periods and periods without rain were defined. On the basis of the known principles governing the changes of groundwater flow, it is possible to predict the low flow values and to define water retention characteristics of the basin.

Applying the simulation model developed in this study, simulations of base flow hydrographs were performed and compared to the results obtained by applying the local minimum method for three characteristic years (1970, 1985, and 1990). Deviations between the values of base flows obtained with the model established in this paper and by the method of local minimum are small and acceptable from the standpoint of general hydrological accuracy.

Резиме

Полазећи од претпоставке да је хидрограм отицаја неког површинског водотока најчешће позната величина која се осматра и региструје на излазном профилу слива, као и да се може анализирати раздвајањем на две компоненте (директни и базни отицај), овај рад се бави могућношћу анализе и симулације компоненте базног отицаја, односно отицаја подземних вода. Базни отицаји су карактеристични за маловодне периоде а у току периода суше укупни отицај је једнак базном отицају. Услови интензивног коришћења вода

и све већи захтеви за адекватном заштитом квалитета вода намећу потребу за анализом и симулацијом базних протицаја и маловодних периода.

Величину базног отицаја са неког слива није могуће измерити, већ постоје само различите графичке методе и рачунски поступци помоћу којих је могуће из хидрограма укупног отицаја издвојити базни отицај. У раду су упоређене различите графичке методе издвајања хидрограма базних отицаја из хидрограма укупних отицаја, након чега су резултати базних протицаја добијени применом методе локалних минимума усвојени као полазна основа за моделирање базних протицаја. Анализом, на овај начин, добијених хидрограма базних отицаја у дужем временском периоду, успостављен је модел базних отицаја за слив р. Колубаре до водомерне станице (в.с.) „Ваљево” и дефинисане су законитости у променама базних отицаја у току кишних и у току периода без кише. На основу познатих законитости по којима се одвијају промене отицаја подземних вода могуће је предвидети величину малих вода и дефинисати ретензионе карактеристике слива.

Применом формираног модела урађене су симулације хидрограма базног отицаја током три карактеристичне године (изразито кишне -1970., просечне – 1985. и изразито сушне – 1990.) и упоређене су са резултатима који су добијени применом графичке методе локалних минимума. Одступања између вредности базних протицаја добијених применом формираног модела и применом методе локалних минимума су мала и прихватљива са становишта опште хидролошке тачности.