

## MATEMATIČKO MODELIRANJE OTICAJA PODZEMNIH VODA SLIVA REKE KOLUBARE

Mr Vesna ĐUKIĆ, dipl. građ. inž.  
Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu  
E-mail: vesna@grf.bg.ac.yu; tel: 3553-122

### REZIME

U radu je, na primeru sliva r. Kolubare do v.s. "Valjevo" (340 km<sup>2</sup>) i za tri karakteristične godine: kišnu-1970., prosečnu - 1985. i sušnu - 1990.god., prikazan hidrološko-hidraulički model za određivanje oticaja podzemnih voda, odnosno baznih oticaja sliva analizom vodnog bilansa sliva i vertikalne razmene vode između atmosfere, nezasićene sredine i podzemne vode, na osnovu poznatih fizičkih karakteristika sliva (klimatskih, pedoloških, geoloških i vegetacionih).

S obzirom da veličinu baznog oticaja nije moguće izmeriti, za kontrolu rada modela korišćen je hidrogram baznih oticaja dobijen primenom grafičke metode lokalnih minimuma na osnovu osmotrenih hidrograma oticaja na izlaznoj stanici sliva.

Na kraju je pokazano da je ukupni bazni oticaj na izlaznom profilu sliva, dobijen primenom grafičke metode lokalnih minimuma, približno jednak baznom oticaju dobijenom preko analize vodnog bilansa sliva, kao suma prihranjivanja podzemnih voda sa različitih vrsta zemljišta prekrivenih različitim biljnim vrstama, pod uticajem atmosferskih uslova na površini terena. Na taj način je pokazano da je promene oticaja podzemnih voda u toku vremena moguće pratiti na osnovu poznatih fizičkih karakteristika sliva.

**Ključne reči:** bazni oticaj, vodni bilans, infiltracija, evapotranspiracija, prihranjivanje podzemnih voda.

### UVOD

U radu je analizirana bazna komponenta hidrograma oticaja i prikazana je mogućnost simuliranja ove komponente oticaja, jer ona sadrži značajne informacije o osobinama akvifera i retenzionim karakteristikama

sliva, što je važno pri planiranju i upravljanju vodnim resursima u cilju predviđanja malih voda.

Malovodni periodi su periodi potencijalne opasnosti od degradacije životne sredine, što pri intenzivnom i neracionalnom korišćenju voda može imati dugotrajne posledice po ekosistem. Pojava malih voda obično je vezana za probleme u vodosnabdevanju stanovništva, industrije i poljoprivrede. U budućnosti i u uslovima intenzivnog korišćenja voda i sve većih zahteva i potreba za adekvatnom zaštitom kvaliteta voda, sve veća pažnja će se poklanjati analizi i simulaciji baznih proticaja u malovodnim periodima.

Kako veličinu oticaja podzemnih voda sa nekog sliva nije moguće izmeriti na izlaznoj stanici sliva, mnogi naučnici su pokušavali na različite načine da procene veličinu bazne komponente oticaja. Prvi radovi na tu temu bili su Dausse (1842) i Boussinesq (1877), posle kojih su mnoga istraživanja bila vezana za analizu recesivnih krivih hidrograma oticaja u cilju određivanja učešća podzemnih voda u obrazovanju površinskog toka. Ova tema je predmet naučnog interesovanja sve do danas. Hall (1968) je prikazao istorijski pregled radova na ovu temu, počevši od radova Boussinesq-a, do radova objavljenih tokom šezdesetih godina prošlog veka. Danas postoje različite grafičke metode (Rorabaugh, 1964; Lindsley et, al. 1982) i računski postupci (Pettyjohn and Henning, 1979) izdvajanja komponente baznog oticaja iz hidrograma ukupnog oticaja nekog površinskog toka. Neki od značajnijih radova na ovu temu objavili su: Toebe i Strang (1964), Bevans (1986), Nathan i McMahon (1990), Moore (1992), Rutledge (1992). Pri tome neki naučnici kao npr. Meyboom (1961), Rorabaugh (1964), Lindsley (1982) i Rutledge (1992) uglavnom su se bavili procenivanjem količina voda koje iz nezasićene sredine poniru u podzemnu vodu na osnovu merenih proticaja. Veliki broj postojećih tehnika i visok nivo subjektivnosti pri proceni

učesća podzemnih voda u ukupnom bilansu oticaja (Tallaksen, 1995) ukazuju da ovaj problem još nije u potpunosti rešen.

U ovom radu bazni oticaji sa sliva nisu određeni izdvajanjem iz hidrograma oticaja registrovanih na izlaznoj stanici sliva, već je pri analizi baznih oticaja primenjen drugačiji pristup. U cilju procene veličine baznih oticaja, formiran je hidrološko-hidraulički model koji uzima u obzir fizičke zakonitosti koje upravljaju transformacijom padavina u oticaj. Primenom ovog modela opisana je vertikalna razmena vode između atmosfere, nezasićene sredine i podzemne vode. Vrednosti baznih oticaja sa sliva određene su primenom formiranog hidrološko-hidrauličkog modela na osnovu poznatih fizičkih karakteristika sliva (klimatskih, pedoloških, geoloških i vegetacionih) na primeru sliva reke Kolubare do v.s. "Valjevo" za tri karakteristične godine: kišnu-1970., prosečnu - 1985. i sušnu - 1990.god. Bazni oticaji su analizirani kao rezultat odgovora sliva na određene klimatske, pedološke, geološke i vegetacione uslove koji vladaju u slivu. Za kontrolu rada modela korišćen je hidrogram baznih oticaja dobijen iz hidrograma osmotrenih oticaja na izlaznoj stanici sliva, primenom grafičke metode lokalnih minimuma.

U radu su primenom formiranog hidrološko-hidrauličkog modela simulirane komponente vertikalnog vodnog bilansa čime je dobijen uvid o veličini različitih komponenti na koje se deli ukupna količina pale kiše, odnosno o veličini evapotranspiracije, infiltracije, površinskom oticaju, količini vode koja se zadržava u zemljištu kao zemljišna vlaga, kao i prihranjivanju podzemnih voda, odnosno količini voda koje iz nezasićene sredine poniru u podzemnu izdan. Pri tome je pretpostavljeno da je prihranjivanje podzemnih voda približno jednako baznom oticaju. Dakle, bazni oticaj je jedna od izlaznih veličina koja se dobija primenom ovog modela.

Komponente vertikalnog vodnog bilansa, a time i prihranjivanje podzemnih voda, određeni su za sve delove sliva određenih pedoloških, geoloških i vegetacionih karakteristika. Prihranjivanje podzemnih voda sa celog sliva dobijeno je sumiranjem vrednosti prihranjivanja podzemnih voda sa pojedinih delova sliva. Drugim rečima, u radu je ispitivana mogućnost simulacije baznog oticaja na bazi zatvaranja vertikalnog vodnog bilansa.

Pokazano je da je ukupno prihranjivanje podzemnih voda, određeno kao zbir prihranjivanja podzemnih voda sa različitih vrsta zemljišta prekrivenih različitim biljnim vrstama približno jednako baznom oticaju na izlaznom profilu sliva, dobijenom izdvajanjem iz registrovanih hidrograma oticaja. Na taj način je pokazano da je promene oticaja podzemnih voda u toku vremena moguće pratiti na osnovu poznatih fizičkih karakteristika sliva.

## OPIS MATEMATIČKOG MODELA

Hidrološko-hidraulički model formiran u radu dobijen je kombinovanjem metode vodnog bilansa i modela koji opisuju procese na površini zemljišta (evapotranspiracija) i procese poniranja vode u zemljište (infiltracija). Kako se u radu analizira kretanje vode kroz zemljište pod uticajem atmosferskih uslova na površini terena za temu ovog rada najveći značaj ima vodni bilans u nezasićenoj sredini, odakle se vrši prihranjivanje podzemnih voda padavinama, kao i vodni bilans na površini terena, pomoću koga se definiše gornji granični uslov. Komponente vertikalnog vodnog bilansa, a time i veličina prihranjivanja podzemnih voda, određene su primenom matematičkog modela koji obuhvata jednačinu vertikalnog vodnog bilansa na površini terena (1), i u nezasićenoj sredini (2) i Ričardsovu jednačinu (Richards, 1981) pomoću koje je opisano kretanje vode u nezasićenoj sredini (NS) (3) i FAO Penman-Montejevu jednačinu za određivanje evapotraspiacije (Monteith, J.L. 1965) (4).

Jednačine vertikalnog vodnog bilansa na površini terena i u nezasićenoj sredini mogu se prikazati respektivno na sledeći način:

$$P - E - F_a = \pm \Delta W_1 \quad (1)$$

$$F_a - T \pm F_b = \pm \Delta W_2 \quad (2)$$

pri čemu je: P-ukupne padavine; E -isparavanje, T-transpiracija i ET=E+T evapotranspiracija;  $F_a$ - infiltracija vode sa površine terena u nezasićenu sredinu;  $F_b$ -prihranjivanje podzemnih voda;  $\Delta W_1$ ,  $\Delta W_2$ - promene visine sloja zadržane vode na površini terena i u nezasićenoj sredini.

Kako je u radu razmatrana globalna preraspodela voda na godišnjem nivou ne uzimajući u obzir dinamiku procesa nastanka oticaja, zanemareni su delovi direktnog i baznog doticaja sa drugih delova sliva odnosno drugih slivnih područja. Takođe, zanemarena je i intercepcija vode na biljnom pokrivaču, kao i zadržavanje vode u depresijama na površini terena.

Ričardsova jednačina pomoću koje je opisano vertikalno kretanje vode kroz nezasićenu sredinu je:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial w}{\partial z} \right] + \frac{\partial k_w}{\partial z}; \quad k_w = k_w(w) \quad (3)$$

gde je:  $w$ - vlažnost zemljišta ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $D(w)$ -koeficijent difuzije zemljišne vode ili difuzivnost.  $k_w$ -koeficijent vodoprovodljivosti za nezasićenu sredinu ( $\text{cm}/\text{dan}$ );  $t$  - vreme (dan),  $z$  –vertikalna koordinata usmerena naviše.

Da bi se u potpunosti opisalo kretanje vode kroz nezasićenu sredinu potrebno je definisati početne i granične uslove i kvantitativno opisati vodno-fizička svojstva zemljišta.

Početni uslov predstavlja poznati raspored vlažnosti ili kapilarnog potencijala po dubini u trenutku kada počinje simulacija, tj. u trenutku:  $t=t_0$  (van Genuchten, 1995). Gornji granični uslovi odnose se na atmosferske uslove i definisani su razlikom između izračunatih prosečnih padavina ( $P$ ) na površini sliva i vrednosti evapotranspiracije ( $ET$ ) sa određene vrste vegetacije.

FAO Penman-Montejeva jednačina je korišćena za proračun referentne evapotranspiracije i ona se može izraziti:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

gde je:  $ET_0$  -referentna evapotranspiracija biljke [ $\text{mmd}^{-1}$ ],  $\Delta$  -nagib krive saturacije [ $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ ],  $R_n$  -neto radijacija sa površine biljke [ $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ],  $G$ -toplotni fluks podloge [ $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ],  $\gamma$  -psihometrijska konstanta [ $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ ],  $U_2$  -brzina vetra izmerena na visini od 2 m [ $\text{ms}^{-1}$ ],  $(e_s - e_a)$  —deficit saturacije na 2m visine [ $\text{kPa}$ ],  $T$  -srednja dnevna temperatura vazduha na 2m visine [ $^\circ\text{C}$ ].

Kao donji granični uslov primenjen je uslov slobodnog dreniranja (van Genuchten, 1995), pri čemu se pretpostavlja da voda nesmetano otiče u dublje slojeve.

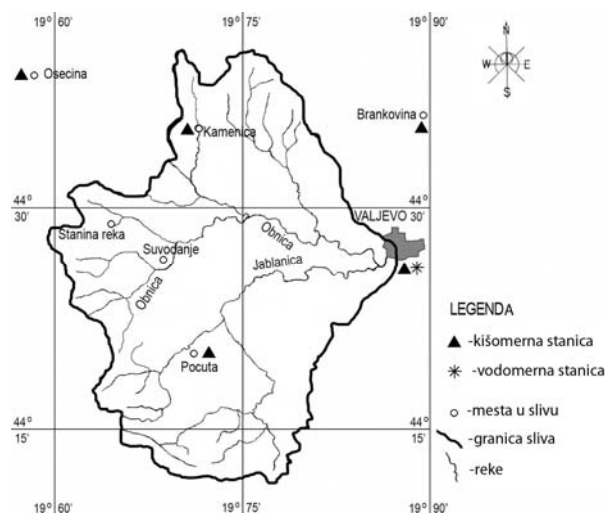
Vodno-fizička svojstva zemljišta kvantitativno se opisuju pomoću krivih koje povezuju vlažnost ( $w$ ), kapilarni potencijal ( $H_k$ ) i hidrauličku provodljivost zemljišta ( $k_w$ ), na osnovu određenih empirijskih koeficijenata i vrednosti sledećih parametara: rezidualne vlažnosti zemljišta ( $w_r$ ), vlažnosti zasićenog zemljišta ( $w_s$ ) i Darsijevog koeficijenta filtracije ( $k_s$ ). Vodno-fizička svojstva zemljišta kvantitativno su opisana

primenom jednačine van Genuchten-a (van Genuchten, M. Th, 1989).

Parcijalne diferencijalne jednačine pomoću kojih je opisano kretanje vode kroz nezasićenu sredinu rešene su primenom metode konačnih elemenata. Detaljniji prikaz primenjenog matematičkog modela može se videti u literaturi (Childs, 1969; Hillel, 1971; Rijtema, 1965; Monteith, 1965).

## PRIKAZ FIZIČKIH KARAKTERISTIKA SLIVA KOLUBARE DO V.S. "VALJEVO"

Sliv reke Kolubare do v.s. "Valjevo" (slika 1) obuhvata gornji deo sliva Kolubare površine  $340 \text{ km}^2$ . On obuhvata sliv reke Jablanice ( $152.79 \text{ km}^2$ ) i sliv reke Obnice ( $187.21 \text{ km}^2$ ). Sliv Obnice se prostire severozapadno od Valjeva, a sliv Jablanice jugozapadno od Valjeva. Ove dve reke predstavljaju dva izvorišna kraka reke Kolubare koju obrazuju kod Valjeva.



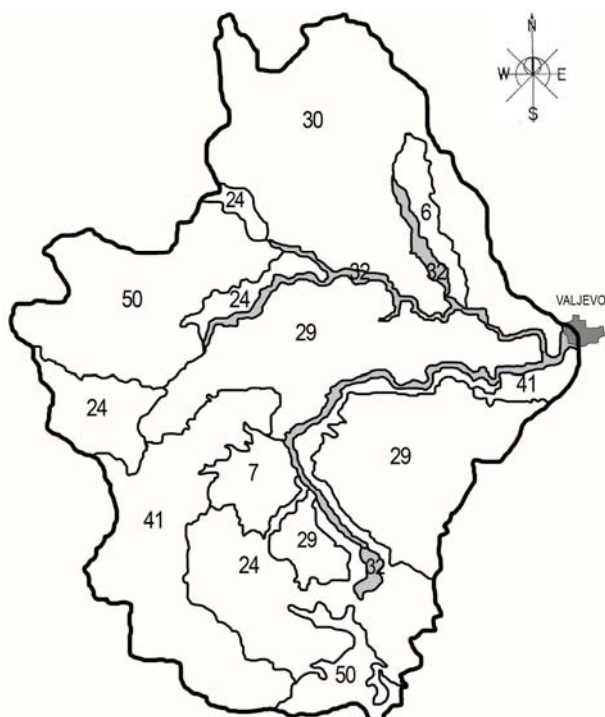
Slika 1. Područje sliva reke Kolubare do vodomerne stanice "Valjevo"

Ovaj deo sliva Kolubare je veoma reljefno izrazito područje. Nadmorske visine se kreću od 1100-1300 mm u višim delovima, do 200-300 mm u aluvijalnim dolinama reka. Vertikalna izraženost područja čini ga bogatim izvorima i vodotocima raznih veličina.

Klima u ovom delu Srbije je izuzetno vlažna i sa velikom količinom padavina, pri čemu su prosečne godišnje padavine oko 940mm. Temperature u toku

godine su relativno visoke, dok je relativna vlažnost vazduha niska, što uslovljava intenzivno isparavanje.

Na predmetnom slivu izdvojeni su sledeći pedološki tipovi zemljišta: smeđe rudo zemljište na krečnjaku (SRZ) (27%), smeđe skeletoidno zemljište na škriljcima (SSZ) (23,9%), rendzine (13,87%), crvenica (C) (0,11%), parapodzol (P) (22,76%), aluvijalni nanosi (AN) (2,22%), smonica (S) (5,62%) i kamenjar (K) (0,98%) (slika 2).



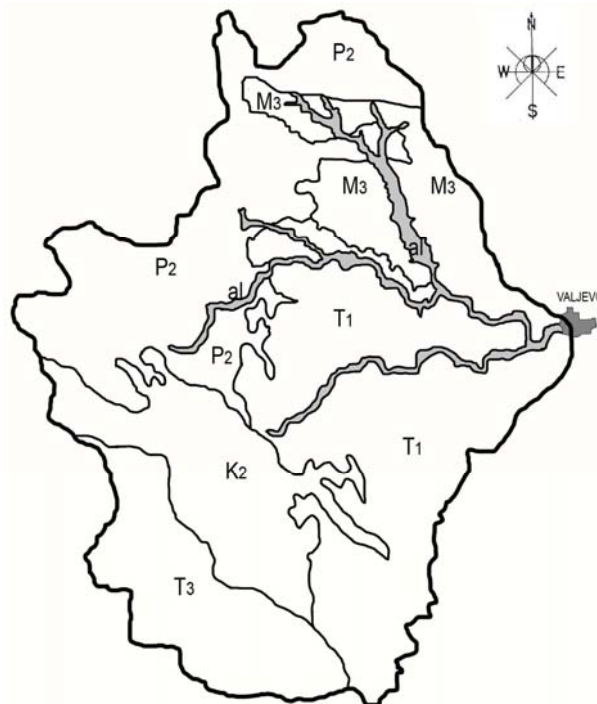
Slika 2. Pedološka karta sliva Kolubare do v.s. "Valjevo"

Legenda: 6,7 – smonica; 24, 29 – smeđe rudo zemljište na krečnjaku; 30 – parapodzol; 32 – aluvijalno zemljište; 41 – smeđe skeletoidno zemljište na škriljcima; 50 – golo zemljište.

U brdsko-planinskim delovima sliva dominiraju zemljišta na krečnjacima i smeđe skeletoidno zemljište na škriljcima, dok se u nižim delovima sliva nalaze smonice, parapodzol i aluvijalni nanosi. U višim delovima sliva preovlađuju listopadne šume (36.5%), u središnjim delovima su livade (39.06%), i voćnjaci (7.18%) dok se poljoprivredne kulture gaje na obradivom poljoprivrednom zemljištu u aluvijalnim dolinama reka (12.78%). Manji deo površine

razmatranog sliva zauzimaju goleti (GZ) (1.05%), urbanizovane površine (1.89%) i vodeno ogledalo reka (2.11%).

Različite vrste stena rasprostranjene u gornjem delu sliva Kolubare do v.s. "Valjevo" mogu se uopštiti u sledeće 4 kategorije: krečnjaci (41.97%), škriljci (23.94%), gline (28.38%) i aluvijum (2.21 %) (Slika 3). Zemljišta na krečnjacima zauzimaju najveću površinu sliva. Krečnjake u ovom delu Srbije karakteriše znatna karstifikovanost i ispucalost površinskih delova, što uslovljava da se najveći deo atmosferskih padavina infiltrira u dublje slojeve. U njima se podzemne vode koncentrišu u kavernama, ili otiču kroz karstifikacijom proširene pukotine i kaverne. Postojanje karsta i nedostatak podataka merenja izdašnosti vrela u velikoj meri je uticao na tačnost dobijenih rezultata.



Slika 3. Geološka karta sliva reke Kolubare do v.s. "Valjevo"

Legenda: al – aluvium; K<sub>2</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>3</sub> – krečnjaci; M<sub>3</sub> – glina; P<sub>2</sub> – glinoviti škriljci.

## MATERIJAL

Osnovni podaci koji su korišćeni za proračun vertikalnog vodnog bilansa sliva primenom opisanog modela su: meteorološki podaci za tri razmatrane godine

(prosečne dnevne visine padavina na slivu i meteorološki podaci potrebni za proračun evapotranspiracije koji obuhvataju: srednje dnevne temperature vazduha, srednje relativne vlažnosti vazduha, insolaciju i srednju dnevnu brzinu vetra); pedološke karakteristike zemljišta od kojih zavise vodno-fizička svojstva zemljišta; vegetacione karakteristike sliva koje utiču na veličinu evapotranspiracije; početna vlažnost zemljišta pomoću koje su uzeti u obzir procesi kretanja vode na slivu koji su se odvijali u prošlosti i donji granični uslov od koga zavisi količina vode koja će oteći u podzemnu vodu.

Ulazni podaci obuhvataju i registrovane hidrograme oticaja na izlaznoj stanici sliva (hidrološki podaci) u toku tri karakteristične godine na osnovu kojih su izdvojeni hidrogrami baznih oticaja korišćeni za kontrolu rada modela.

Potrebni meteorološki i hidrološki podaci odnose se na merenja u Valjevu, jer je to jedina meteorološka stanica na slivu. Visine prosečnih dnevnih padavina određene su koristeći podatke o dnevnim visinama padavina sa 6 kišomernih stanica: Kamenica, Brankovina, Počuta, Valjevo, Osečina i Razbojište.

Podaci o pedološkim karakteristikama zemljišta, odnosno podaci o morfološkim karakteristikama i mehaničkom sastavu svakog sloja zemljišta, kao i podaci o vodno-fizičkim svojstvima zemljišta (vlažnost zasićenog zemljišta i vrednosti Darsijevog koeficijenta filtracije) dobijeni su iz literature (Institut za zemljište, 1989a,b). Vrednosti empirijskih koeficijenata potrebnih za definisanje vodno-fizičkih svojstava zemljišta po jednačini van Genuchtena (van Genuchten, M. Th. 1980) takođe su dobijeni iz literature (Carsel, R.F., Parrish R. S. 1988).

## METODA LOKALNIH MINIMUMA

Hidrogram baznih oticaja, korišćen za kontrolu rada modela dobijen je izdvajanjem baznih proticaja iz hidrograma ukupnih oticaja registrovanih na v.s. "Valjevo" u toku 1970., 1985. i 1990. god. primenom grafičke metode lokalnih minimuma. Pri tome je korišćen kompjuterski program HYSEP (U.S. Geological Survey, 1979).

## OBRADA ULAZNIH PODATAKA

Na površini sliva Kolubare do Valjeva nalaze se različite vrste zemljišta u pogledu pedoloških, geoloških i

vegetacionih karakteristika. U cilju proračuna vertikalnog vodnog bilansa sliva, sliv je podeljen na određeni broj homogenih oblasti, pri čemu jedna homogena oblast obuhvata površinu na kojoj preovlađuje jedna vrsta zemljišta, ispod koje se nalazi jedna vrsta geološke podloge i na kojoj se gaji jedna biljna vrsta. Prema tome, u okviru jedne homogene oblasti, slične su i karakteristike kretanja vode kroz zemljište, zbog čega je za analizu parametara vertikalnog vodnog bilansa na jednoj homogenoj oblasti dovoljno analizirati samo elementarni deo te oblasti. Količina otekle vode koja se registruje na izlaznoj stanici sliva predstavlja ukupnu količinu vode dotekle sa homogenih površina određenih definisanih pedoloških, geoloških i vegetacionih karakteristika.

Dekompozicija sliva na homogene zone u velikoj meri olakšava i ubrzava proračun vodnog bilansa na slivu. Međutim, utvrđivanje homogenih oblasti zahteva visok kvalitet i dobru prostornu rezoluciju za veći broj fizičko-geografskih karakteristika sliva (pedoloških, geoloških, hidrogeoloških i karakteristika vegetacije i namene površina), što u našim uslovima nije uvek moguće obezbediti. Nedostatak kvalitetnih ulaznih podataka utiče i na kvalitet rezultata simulacionog modela.

Uoprednom analizom pedološke, geološke i vegetacione karte sliva reke Kolubare do v.s. "Valjevo" izvršena je dekompozicija sliva na 16 homogenih oblasti. U tabeli 1 su prikazane veličine površina i procentualna zastupljenost svake od ovih homogenih oblasti.

Napominje se da urbanizovane i vodene površine nisu izdvojene u posebne homogene oblasti, niti su izračunati elementi vodnog bilansa za ove oblasti čime je zanemareno 3.5% od ukupne površine sliva, što ne utiče mnogo na rezultate.

Pri simulaciji kretanja vode kroz nezasićenu sredinu pretpostavljeno je da su kiše padale ravnomerno i jednovremeno po celom slivu intenzitetom koji odgovara veličini prosečnih dnevnih padavina. Analizirano područje karakteriše velika količina padavina u toku cele godine, pri čemu je 1970. god. bila izrazito kišna godina, u toku koje je palo ukupno 1287 mm kiše; 1990. god. je bila sušna godina, jer je ukupna godišnja količina padavina u njoj bila 611 mm; 1985. god. predstavlja približno prosečnu godinu, sa ukupnom godišnjom količinom padavina od 890 mm.

Tabela 1. Veličine površina i procentualna zastupljenost homogenih oblasti u pogledu pedoloških, geoloških i vegetacionih karakteristika na slivu reke Kolubare do v.s. "Valjevo"

namena površina	Š	L	Nj	V	GZ	urbaniz. površine	vod. ogl. reka	Σ (%)	
<b>Vrsta zemljišta</b>	<b>km<sup>2</sup></b>	<b>124.1</b>	<b>132.8</b>	<b>43.46</b>	<b>24.42</b>	<b>3.32</b>	<b>4.9</b>	<b>7</b>	
SRZ	91.83	32.23 <sup>1</sup>	59.6 <sup>2</sup>					27.01	
R	47.17	47.17 <sup>3</sup>						13.87	
SSZ	81.4	32.19 <sup>4</sup>	39.45 <sup>5</sup>		9.76 <sup>6</sup>			23.94	
P	77.38	12.51 <sup>7</sup>	26.7 <sup>8</sup>	29.93 <sup>9</sup>	8.24 <sup>10</sup>			22.76	
S	19.1		6.68 <sup>11</sup>	6 <sup>12</sup>	6.42 <sup>13</sup>			5.62	
AN	7.53			7.53 <sup>14</sup>				2.21	
C	0.37		0.37 <sup>15</sup>					0.11	
K	3.32				3.32 <sup>16</sup>			0.98	
Nep.del.	4.9					4.9		1.44	
vod.og.	7						7	2.06	
Σ (%)		36.50	39.06	12.78	7.18	0.98	1.44	2.06	100.00

Izdvojene homogene oblasti (HO) označene su brojevima od 1 do 16:

- |  |  |
|--|--|
| 1 -smeđe rudo zemljište prekriveno šumama                          | 8 -parapodzol prekriven livadama         |
| 2 -smeđe rudo zemljište prekriveno livadama                        | 9 -parapodzol prekriven njivama          |
| 3 -rendzine prekrivene šumama                                      | 10-parapodzol prekriven voćnjacima       |
| 4 -smeđe skeletoidno zemljište na škriljcima prekriveno šumama     | 11 -smonica prekrivena livadama          |
| 5 -smeđe skeletoidno zemljište na škriljcima prekriveno livadama   | 12 -smonica prekrivena njivama           |
| 6 -smeđe skeletoidno zemljište na škriljcima prekriveno voćnjacima | 13 -smonica prekrivena voćnjacima        |
| 7 -parapodzol prekriven šumama                                     | 14 -aluvijalni nanosi prekriveni njivama |
|  | 15 -crvenica prekrivena livadama         |
|  | 16-golo zemljište                        |

U cilju proračuna stvarne evapotranspiracije sa određene vrste vegetacije u radu je najpre određena veličina referentne evapotranspiracije primenom FAO Penman-Montejeve jednačine. Novija istraživanja su pokazala da promene veličine albeda sa neke površine, a pri istim vrednostima klimatskih parametara od kojih zavisi veličina evapotranspiracije, najviše utiču na promene evapotranspiracije. Kako vrednosti površinskog i aerodinamičkog otpora za različite vrste

vegetacije na slivu nisu bile poznate, pretpostavljeno je da sve biljne vrste u slivu imaju aerodinamički i površinski otpor jednak onim vrednostima koje važe za referentnu biljku, a da se vrednosti evapotranspiracije sa različitih vrsta vegetacije u slivu razlikuju, prvenstveno zahvaljujući razlikama u veličini albeda sa različitih vegetacionih vrsta u slivu. U tabeli 2 su prikazane vrednosti albeda za različite vrste vegetacije koje se nalaze na analiziranom slivu:

Tabela 2. Vrednosti albeda za različite namene površina u slivu reke Kolubare do v.s.

Namena površina	Livade i pašnjaci	Šume	Njive i oranice	Voćnjaci i vinogradi	Golo zemljište	Urbaniz. površine	Vodeno ogl. reka
Albedo	0.15	0.18	0.12	0.10	0.30	0.35	0.12

Na osnovu rezultata promena albeda (tabela 2) lako se određuju dnevne vrednosti potencijalne

evapotranspiracije (PET) za svaku od površina određenog tipa namene i vegetacije.

U radu je pretpostavljeno da je ukupna godišnja veličina evapotranspiracije jednaka razlici između ukupnih godišnjih padavina i ukupnog godišnjeg oticaja sa sliva. Poređenjem ukupne godišnje evapotranspiracije sa sliva određene na ovaj način ( $ET_{stv.god.}$ ) i ukupne godišnje potencijalne vrednosti evapotranspiracije dobijene primenom FAO Penman-Montejeve jednačine (PET) određen je koeficijent:  $k = ET_{stv.god.}/PET$ , kojim su množene dnevne vrednosti potencijalne evapotranspiracije dobijene primenom FAO Penman-Montejeve metode. Na taj način su dobijene približne vrednosti evapotranspiracije koje odgovaraju stvarnim uslovima vlažnosti u zemljištu. U tabeli 3 prikazane su dobijene ukupne godišnje vrednosti evapotranspiracije  $ET_{stv}$  i PET, kao i vrednosti koeficijenta  $k$ , za tri analizirane godine:

Tabela 3. Ukupne godišnje vrednosti stvarne evapotranspiracije i potencijalne evapotranspiracije dobijene primenom FAO Penman-Montejeve metode (god: 1970., 1985. i 1990.)

	1970	1985	1990
$ET_{stv}$ (cm)	62.80	54.40	49.95
PET (cm)	62.95	71.55	67.43
$k$ (-)	0.998	0.7603	0.741

Pri ovom proračunu došlo se do interesantnog zaključka: u toku 1970. god., koja je bila izrazito kišna dobijene su približno jednake vrednosti evapotranspiracije  $ET_{stv}$  i PET, što znači da je u uslovima velikih količina padavina kada je u zemljištu uvek bilo dovoljno vode, stvarna veličina evapotranspiracije bila približno jednaka maksimalno mogućoj (potencijalnoj) evapotranspiraciji. Uvedena korekcija  $ET = k * PET$  primenjena je kasnije pri oceni stvarne evapotranspiracije preko PET određene za dnevne vrednosti. Ova gruba pretpostavka podložna je kritici, ali ona obezbeđuje da se na godišnjem nivou obezbedi eksterni bilans (P-ET) vodne razmene između atmosfere i površine zemljišta, čime se eliminiše bar jedna nepoznanica u sistemu A-NS-PV.

U tabeli 4 prikazane su izračunate vrednosti evapotranspiracije sa delova sliva različitih namena površina koje odgovaraju stvarnim uslovima vlažnosti zemljišta.

Poređenjem kumulativnih vrednosti padavina i kumulativnih evapotranspiracija za tri karakteristične godine vidi se da je u toku "kišne" 1970.god. ukupna količina pale kiše na površinu sliva bila znatno veća od količine vode koja je isparila sa sliva; u toku "prosečne"

1985.god. ukupna količina pale kiše takode je bila veća od količine vode koja je isparila, ali razlika između njih bila je manja nego u toku 1970.god, dok je u toku "sušne" 1990. god., u toku leta i jeseni isparilo više vode nego što je palo.

Tabela 4. Vrednosti ukupne godišnje evapotranspiracije (cm) sa površina različitih namena (god: 1970., 1985. i 1990.)

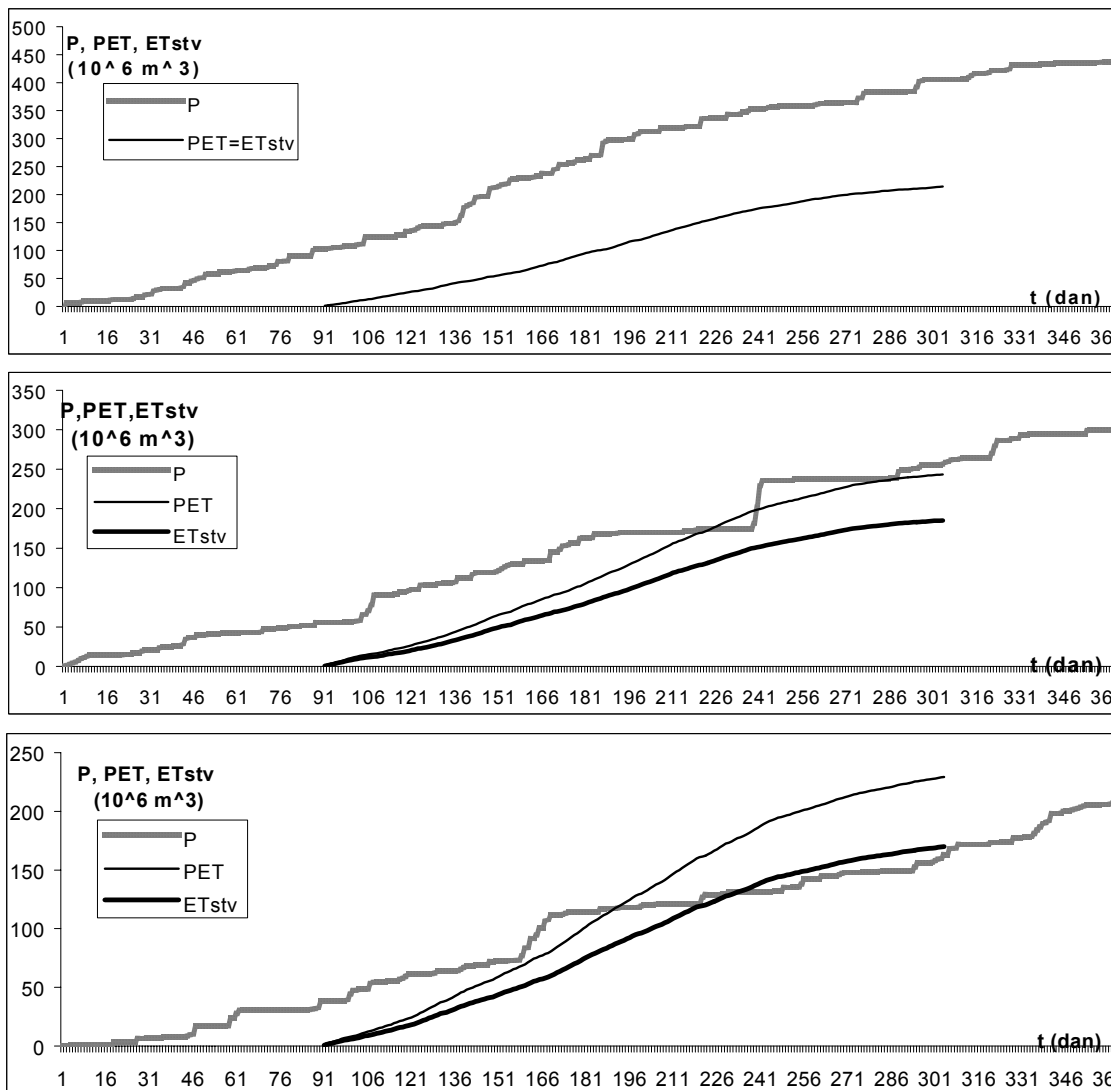
	1970	1985	1990.
Šume	62.524	54.082	49.941
Livade i pašnjaci	61.607	53.275	49.204
Njive i oranice	68.12	58.71	54.45
Voćnjaci i vinogradi	69.95	60.25	55.96
Goleti	49.68	41.99	39.68
Urbanizovane površine	19.32	16.71	15.43
Vod. ogledalo reka	87.23	74.66	70.32

Na slici 4.dat je uporedni prikaz kumulativnih padavina (P), potencijalne (PET) i procenjene "stvarne" evapotranspiracije (ET) u toku 1970., 1985. i 1990. god, respektivno.

Vrednosti svih parametara pomoću kojih se kvantitativno opisuju vodno-fizička svojstva zastupljenih pedoloških vrsta zemljišta prikazane su u tabeli 5.

U tabeli 5 korišćene su sledeće oznake: d-debljina sloja,  $\alpha$ -empirijski parametar (van Genuchten, 1995), n-parametar raspodele veličine pora (van Genuchten, 1995)

U toku mnogobrojnih simulacija kretanja vode kroz različite vrste zemljišta došlo se do zaključka da ukoliko je duži period u kome se simulira kretanje vode kroz zemljište, utoliko je manji uticaj početne vlažnosti na rezultate proračuna. Ukoliko se proračun sprovodi u vremenskom periodu od nekoliko godina, uticaj početnog stanja vlažnosti u zemljištu na rezultate proračuna bilansa postaje beznačajan. Imajući prethodno u vidu, pri simulaciji kretanja vode kroz nezasićene sredine različitih vrsta zemljišta i proračunu vertikalnog vodnog bilansa u slivu reke Kolubare do v.s. "Valjevo", stanje vlažnosti u zemljištu na početku svake analizirane godine (1970., 1985. i 1990.) i za svaku vrstu zemljišta na slivu, određeno je kao rezultat atmosferskih uticaja i stanja vlažnosti zemljišta u toku jedne prethodne godine (1969., 1984. i 1989.). Na početku 1969., 1984. i 1989.god. pretpostavljen je ravnotežni raspored pritiska po dubini. Na taj način, u model je uključena određena "istorija" procesa kretanja vode na slivu.



Slika 4. Uporedni prikaz kumulativnih padavina (P), potencijalne (PET) i procenjene "stvarne" evapotranspiracije (ET) u toku 1970.(a), 1985.(b) i 1990.(c) god.

Na ovaj način izvršena je priprema potrebnih ulaznih podataka: određene su prosečne vrednosti dnevnih padavina u slivu i potencijalne evapotranspiracije za različite namene površina, utvrđeni su parametri kojima se definišu vodno-fizička svojstva zastupljenih tipova zemljišta i definisani početni uslovi vlažnosti na početku analiziranih godina. Ovi elementi su dovoljni da se, uz usvojene pretpostavke modela, pristupi proračunu elemenata vodnog bilansa na tri nivoa: za elementarne zapremine, za homogene oblasti i za čitav sliv.

## REZULTATI

Proračun parametara vertikalnog vodnog bilansa urađen je najpre za elementarne delove svake od 16 homogenih oblasti, za tri razmatrane godine. Simulacije vertikalnog kretanja vode kroz elementarne zapremine homogenih oblasti urađene su primenom programskog paketa HYDRUS (van Genuchten, 1995). Način proračuna objasniće se na primeru analize kretanja vode kroz elementarni deo smeđe skeletoidnog zemljišta na škriljcima prekrivenog livadama u toku 1990. god.



Tabela 5 Vrednosti parametara pomoću kojih se opisuju vodno-fizička svojstva zemljišta u slivu reke Kolubare do v.s. "Valjevo"

tip zem.	tekstura	d (cm)	$w_r$ (-)	$w_s$ (-)	$\alpha$ (-)	n (-)	$k_s$ (cm/dan)	geološka podloga	NPV (cm od pov. zem.)	
									opaženi opseg	usv. u proračunima
SRZ	ilovača	0-14	0.078	0.499	0.036	1.56	61.34	krečnjaci	500-700	600
	ilovača	14-30	0.078	0.470	0.036	1.56	19.87			
	ilovača	30-60	0.078	0.450	0.036	1.56	3.89			
		60-600	0.010	0.100	0.001	2.68	45.00			
R	glinuša	0-20	0.200	0.499	0.019	1.31	293.76	krečnjaci	500-700	600
		20-600	0.010	0.100	0.001	2.68	45.00			
K	ilovača	0-20	0.078	0.499	0.036	1.56	61.34	krečnjaci	500-700	500
		20-500	0.010	0.100	0.001	2.68	45.00			
C	glinuša	0-12	0.200	0.499	0.019	1.31	61.34	krečnjaci	500-700	500
	glinuša	12-60	0.200	0.470	0.019	1.31	19.87			
		60-500	0.010	0.100	0.001	2.68	45.00			
AN	ilovača	0-20	0.078	0.370	0.036	1.56	1.52	pesak i šljunak	100-170	150
	ilovača	80-100	0.078	0.412	0.036	1.56	1.52			
		100-150	0.012	0.430	0.145	2.68	110.00			
SSZ	ilovača	0-15	0.078	0.499	0.036	1.56	61.34	škriljci (glinovitog s.)	500-1000	600
	glinuša	15-35	0.200	0.470	0.019	1.31	19.87			
	peskovita glinuša	35-55	0.100	0.440	0.059	1.48	3.37			
		55-600	0.200	0.430	0.019	1.31	0.02			
S	glinuša	0-20	0.200	0.480	0.019	1.31	10.00	glina	400-1000	500
		20-35	0.200	0.450	0.019	1.31	8.00			
		35-60	0.200	0.420	0.019	1.31	0.84			
		60-90	0.200	0.408	0.019	1.31	0.09			
		90-500	0.300	0.444	0.008	1.09	0.02			
P	ilovača	0-20	0.078	0.466	0.036	1.56	345.60	glina	25-70	50
	ilovača	20-35	0.078	0.440	0.036	1.56	10.37			
	glinuša	35-50	0.200	0.408	0.019	1.31	3.37			
		50-70	0.300	0.444	0.008	1.09	0.02			

Smeđe skeletoidno zemljište na škriljcima je interesantno sa gledišta uslova formiranja oticaja. Ovo zemljište spada u grupu slabo propusnih zemljišta, koje usled značajnog prisustva glinenih čestica i, usled toga što leži na skoro nepropusnim glinenim škriljcima, može da primi samo malu količinu pale kiše, dok veći deo otiče direktnim putem.

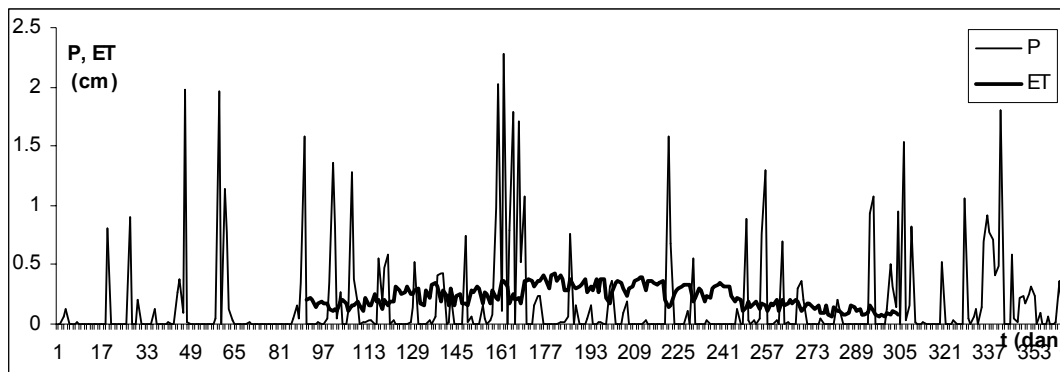
Primenom Ričardsove jednačine, uz poznavanje početnih i graničnih uslova, kao i veze između vlažnosti, kapilarnog potencijala i hidrauličke provodljivosti, moguće je u potpunosti opisati kretanje vode kroz nezasićenu sredinu, odnosno moguće je odrediti profile

vlažnosti zemljišta, količinu vode u zemljištu, brzinu kretanja vode kroz zemljište i poniranje vode iz nezasićene sredine u zasićenu sredinu. Na ovaj način je uspostavljena i veza između padavina, koje predstavljaju ulazne veličine u model, i poniranja vode u zasićenu zonu, što predstavlja jednu od izlaznih veličina modela, na elementarnom delu površine sliva.

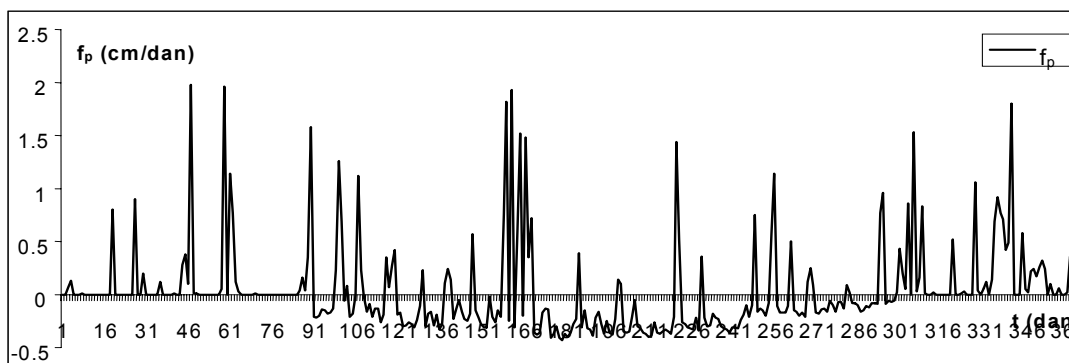
Bilansni elementi na međupovršini atmosfera - nezasićena sredina koji definišu gornji granični uslov (dnevne vrednosti padavina, P, i evapotranspiracije, ET, u toku godine, i potencijalni intenziteti infiltracije,  $f_p$ , definisani kao razlika između padavina i

evapotranspiracije), kao i rezultati proračuna elemenata vertikalnog vodnog bilansa (stvarni intenziteti infiltracije,  $f_a$ ), prikazani su na slikama 5 do 7. Količina vode koja kroz smeđe skeletoidno zemljište na

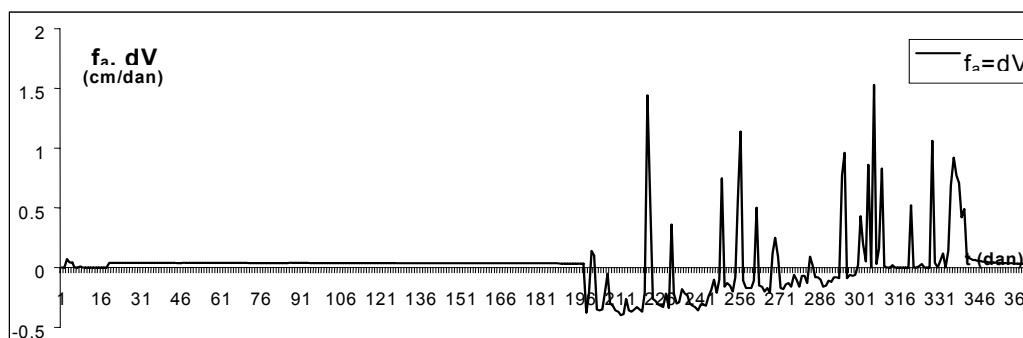
škriljcima ponire u podzemnu izdan  $i$ , na taj način je prihranjuje, što, takođe, predstavlja jednu od izlaznih veličina, je konstantna i iznosi 0.001cm/dan.



Slika 5. -Prosečne dnevne visine padavina (P) i procenjene "stvarne" evapotranspiracije (ET) sa livada na slivu Kolubare do v.s."Valjevo" u toku 1990.god.



Slika 6. Potencijalni intenziteti infiltracije ( $f_p$ ) na gornjoj granici elementarnog dela smeđe skeletoidnog zemljišta na škriljcima prekrivenog livadama u toku 1990.god.



Slika 7. Stvarni intenziteti infiltracije ( $f_a$ ) na gornjoj granici elementarnog dela smeđe skeletoidnog zemljišta na škriljcima prekrivenog livadama i promene količine vode ( $dV$ ) u elementarnom delu u toku 1990. god.

Na osnovu slika 6 i 7 može se zaključiti da se u slučaju smeđe skeletoidnog zemljišta na škriljcima potencijalni i stvarni intenzitet infiltracije veoma razlikuju. Na osnovu rezultata simulacije može se zaključiti da je u toku prve polovine 1990. godine ovo zemljište sadržalo skoro maksimalnu količinu vode, tako da je ono moglo da primi samo malu količinu padavina. U toku leta, usled smanjenja padavina i usled evapotranspiracije količina vode u ovom zemljištu je smanjena, tako da su tada potencijalni i stvarni intenziteti infiltracije jednaki. Ovde se mora napomenuti da rezultati simulacije ne reprezentuju apsolutno tačno procese kako se odvijaju u prirodi, usled mnogobrojnih uvedenih pretpostavki i ograničenja na osnovu kojih je i dobijen model za simulaciju kretanja vode kroz zemljište. Rezultati simulacije predstavljaju samo korisne uopštene pokazatelje, na osnovu kojih je moguće doneti odgovarajuće upravljačke odluke.

Na osnovu simulacije bilansa elementarnih zapremina uz poznavanje površina pojedinih homogenih zona lako se određuju bilansni elementi za čitave homogene zone u slivu.

Ukupne dnevne vrednosti prihranjivanja podzemnih voda sa površine celog sliva, dobijene kao suma prihranjivanja podzemnih voda sa 16 različitih homogenih oblasti definisanih pedoloških, geoloških i vegetacionih karakteristika, u toku 1970., 1985. i 1990. god. upoređene su sa dnevnim vrednostima baznih oticaja dobijenih primenom grafičke metode lokalnih minimuma. Na slici 8. pokazano je da su ukupne mesečne i godišnje zapremine baznih oticaja ( $W_b$ ) približno jednake ukupnom mesečnom i godišnjem prihranjivanju (UP) podzemnih voda. Hidrogram baznih oticaja približno se poklapa sa dijagramom dnevnih vrednosti prihranjivanja podzemnih voda, u slučaju svake od tri analizirane godine. Hidrogrami baznih oticaja i ukupnog prihranjivanja podzemnih voda prikazani su na slici 9. Ovi zaključci su veoma važni, jer omogućavaju da se veličina oticaja podzemnih voda odredi na osnovu fizičko-geografskih karakteristika sliva.

## DISKUSIJA

Na osnovu analiza sprovedenih u radu uočeno je da su na području sliva reke Kolubare do v.s. "Valjevo" vodne i fizičke osobine zemljišta, kao i dubine nivoa podzemnih voda, usled zastupljenosti različitih zemljišnih tipova, različite na različitim delovima sliva i

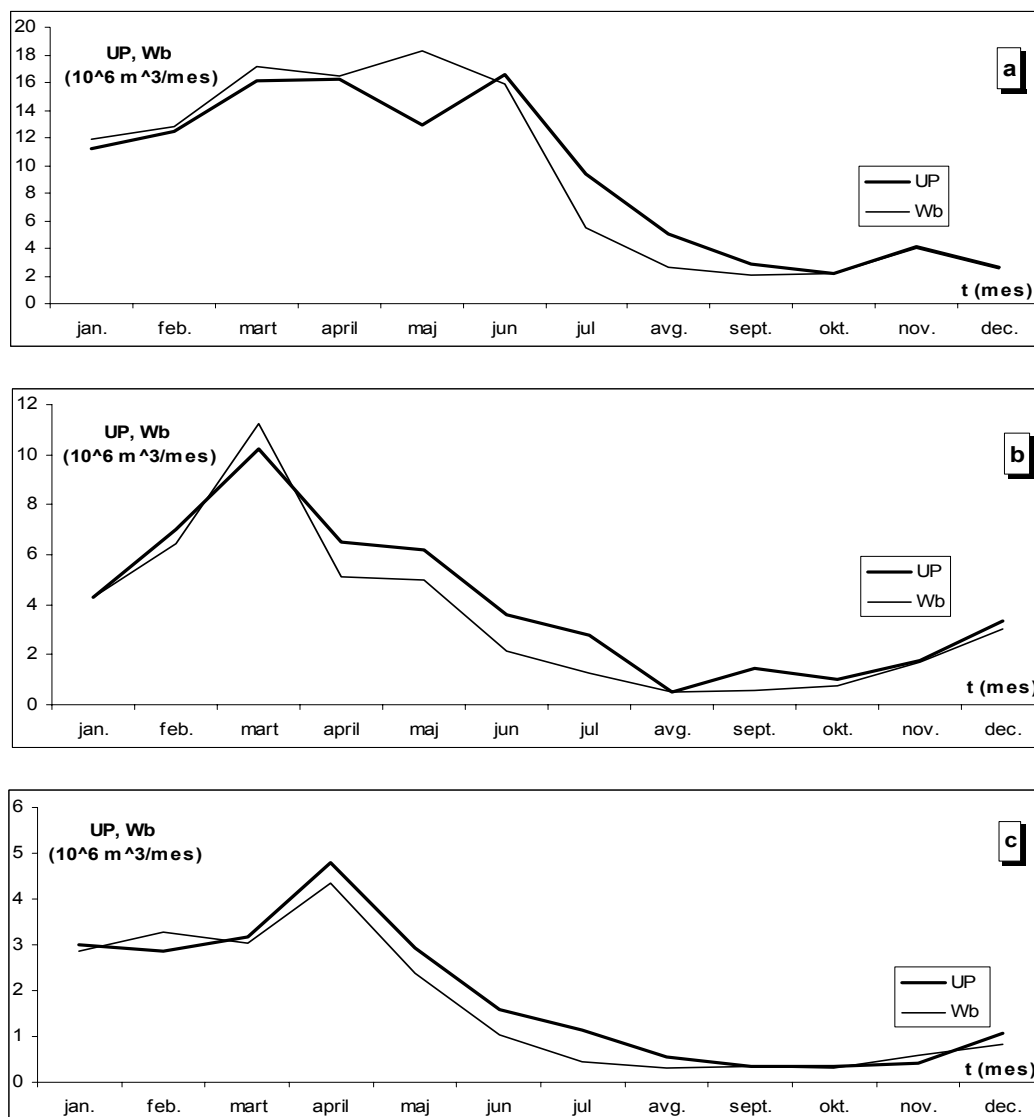
podložne velikim promenama, zbog čega se i proces obrazovanja površinskog i podzemnog oticaja odvija neravnomerno, kako sa gledišta količine vode koja potiče sa različitih delova sliva, tako i u pogledu vremena kada dolazi do oticaja. Oblik hidrograma baznih oticaja uslovljavaju propusne vrste zemljišta na slivu, kroz koje voda od padavina protiče i vrši prihranjivanje podzemnih voda. U propustljivim vrstama zemljišta sa plitkim nivoom podzemnih voda, vrlo brzo nakon prihranjivanja podzemnih voda dolazi do reakcije u vidu oticaja. Takođe, oblik hidrograma baznih oticaja ne zavisi samo od toga koje su pedološke i geološke vrste zastupljene u slivu već i od njihovog rasporeda - pedološke i geološke vrste zemljišta koje se nalaze bliže izlaznoj stanici sliva pokazuju veći uticaj nego one koje se nalaze dalje.

Na osnovu slika 8 i 9, može se zaključiti, da su odstupanja između vrednosti baznih oticaja dobijenih na osnovu osmotrenih hidrograma oticaja primenom grafičke metode lokalnih minimuma i izračunatih vrednosti ukupnog prihranjivanja podzemnih voda dobijenih primenom metode vertikalnog vodnog bilansa mala, u slučaju svake od tri analizirane godine. Ipak, neke razlike su očekivane, a u nastavku će se objasniti razlozi koji dovode do ovih razlika.

Od prirodnih uslova svakako se najviše razlikuju pretpostavke da je moguće poređenje registrovanih (baznih) dnevnih proticaja na izlazu iz sliva sa onima koji se dobijaju sumiranjem doticaja u podzemne vode. Dakle, procesi zadržavanja i putovanja podzemnih voda (koji evidentno postoje) su u potpunosti zanemareni pri poređenju registrovanih (baznih) dnevnih proticaja na izlazu iz sliva sa onima koji se dobijaju sumiranjem doticaja u podzemne vode. Ove pretpostavke su bile neminovne da bi se problem modeliranja ograničio samo na analizu vertikalnih komponenti vodnog bilansa. Sa tog stanovišta direktno poređenje dnevnih vrednosti prihranjivanja podzemnih voda i baznih oticaja nema nikakvog smisla, ali zato informacije o sezonskim promenama i globalnoj preraspodeli voda tokom godina imaju puno opravdanje.

Sužavanjem analize samo na vertikalne komponente zanemarene su evidentne razmene količina vode između susednih elementarnih zapremina što takođe utiče na rezultate simulacije.

U radu je simulirano vertikalno tečenje kroz homogenu sredinu, ali u prirodi ne postoji ni jedna potpuno homogena oblast.

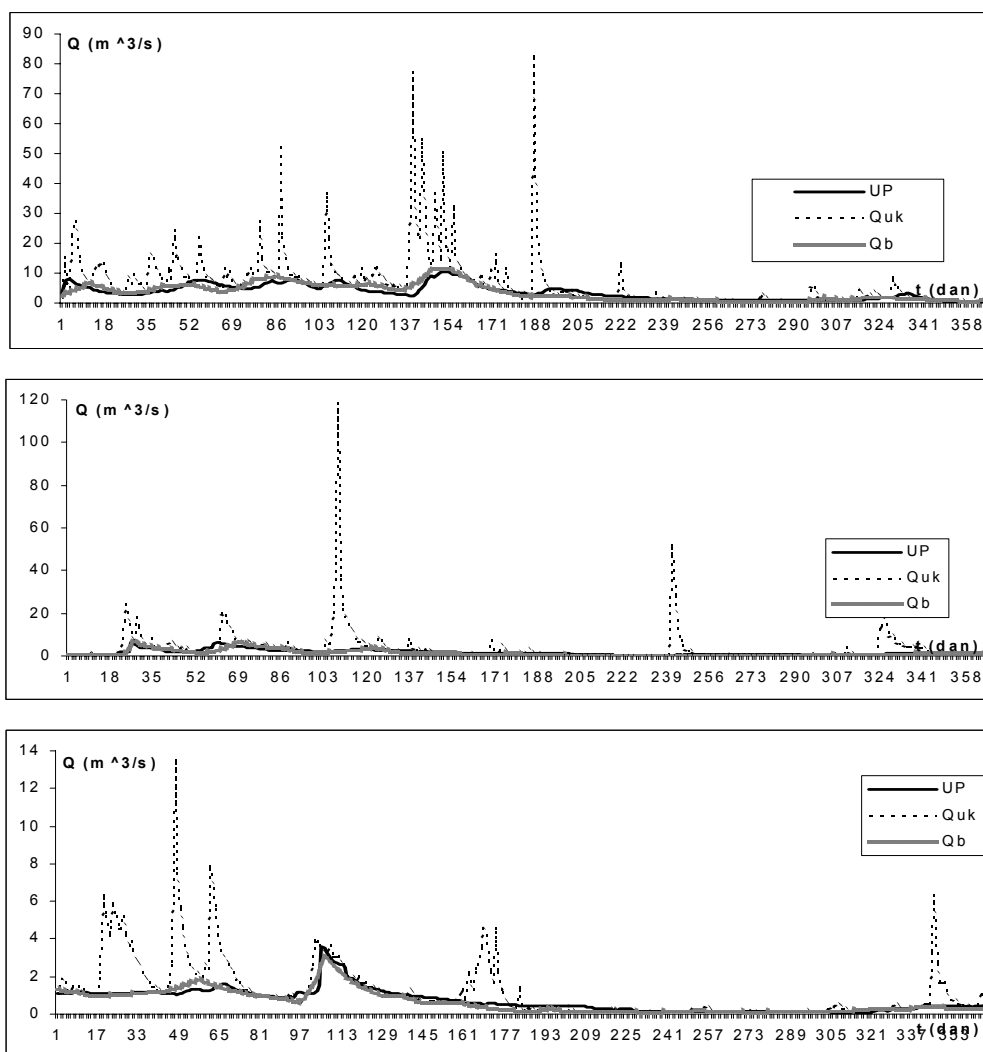


Slika 8. Prikaz ukupnih mesečnih zapremina prihranjivanja podzemnih voda i ukupnih mesečnih zapremina baznih oticaja dobijenih primenom grafičke metode lokalnih minimuma za god: 1970.(a), 1985.(b) i 1990.(c) (reka Kolubara, v.s. "Valjevo")

Pedološke i geološke karakteristike zemljišta na slivu su značajan faktor koji utiče na veličinu oticaja sa sliva, posebno na veličinu baznog oticaja, ali je teško kvantitativno izraziti ove faktore, kako bi se pokrio širok dijapazon svih mogućih slučajeva, koji se mogu javiti na slivu.

Na analiziranom slivu se nalaze mnogobrojni kraški oblici reljefa, koji su otežavali određivanje tačnih

bilansa. Usled postojanja ovih kraških oblika reljefa i nepoznavanja njihovih fizičkih karakteristika i geometrije teško je tačno odrediti koje količine vode odlaze u podzemlje, kao i kolika je površina sa koje se vrši prihranjivanje podzemnih voda. Najmanje što bi trebalo obezbediti da bi se stanje u slivu bolje interpretiralo i simuliralo je da se kontinualno mere proticaji na izvorima i karstnim vrelima u slivu reke Kolubare.



Slika 9. Hidrogrami ukupnih oticaja i hidrogrami baznih oticaja dobijeni primenom grafičke metode lokalnih minimuma i proračunom vodnog bilansa za tri karakteristične godine: 1970., 1985. i 1990.god. (reka Kolubara, v.s. "Valjevo")

Početna vlažnost zemljišta veoma mnogo utiče na rezultate proračuna vertikalnog vodnog bilansa, ali je teško precizno odrediti raspored vlažnosti u početnom trenutku. Ovaj parametar je moguće preciznije definisati ukoliko bi se raspolagalo sa desetogodišnjim dnevnim vrednostima klimatskih podataka, što nije bilo slučaj u ovom radu.

Svi proračuni su rađeni koristeći srednje dnevne vrednosti klimatskih podataka. Pretpostavljeno je da kiša pada ravnomernim intenzitetom i u toku celog dana. Ni jedna od ove dve pretpostavke u prirodi ne postoji, ali je ovde bila nužna.

Veličina relativne greške između hidrograma baznih oticaja i hidrograma prihranjivanja podzemnih voda je najveća u toku letnjih meseci tj. u toku perioda malih voda, pri čemu su ukupne dnevne vrednosti prihranjivanja podzemnih voda u tom periodu nešto veće od dnevnih vrednosti baznih oticaja. Ove razlike mogu se objasniti transpiracijom biljaka direktno iz podzemnih voda (u toku rasta) (Feddes i dr.,1974) i kretanjem izdanih voda prve izdani u dublju izdan, što se nije uzelo u obzir. Gubici na evapotranspiraciju se teško kvantifikuju, a ovde je dodata i dodatna (gruba) pretpostavka da je  $ET=k \cdot PET$ , pri čemu je  $k=const.$  tokom čitave godine.

Takođe, do odstupanja između ovih metoda, u toku leta, dolazi i zbog toga što je infiltraciju vode kroz suvo zemljište teško simulirati numerički. U tim slučajevima teško dolazi do konvergencije tačnom rešenju. Mogu se koristiti samo krupniji vremenski priraštaji, a onda se dobija rešenje koje je manje tačno, nego u slučaju sitnijih vremenskih koraka.

Na osnovu svega ovoga zaključuje se da je, u zavisnosti od zahtevane i potrebne tačnosti rezultata proračuna, ponekad potrebno uraditi i neke dodatne analize i eksperimentalna merenja na terenu. Ipak, i pored opisanih nedostataka, dobijena odstupanja između vrednosti baznih oticaja dobijenih primenom grafičke metode lokalnih minimuma i proračunom ukupnog prihranjivanja podzemnih voda na osnovu fizičkih karakteristika sliva su mala u slučaju svake od tri analizirane godine. Može se zaključiti da, iako ne postoji mogućnost merenja oticaja podzemnih voda, promene baznih oticaja u toku vremena moguće je pratiti analizom fizičko-geografskih činilaca sliva.

## ZAKLJUČAK

Bazni oticaji na izlaznoj stanici sliva određeni su na osnovu kompleksne hidrološko-hidrauličke analize vodnog bilansa sliva, uzimajući u obzir većinu fizičko-geografskih činilaca sliva. Prikazana je mogućnost simulacije zapremine baznog oticaja na bazi zatvaranja vertikalnog vodnog bilansa sliva, pri čemu je pretpostavljeno da je vertikalno doticanje do podzemnih voda, odnosno prihranjivanje podzemnih voda, ekvivalentno baznom oticaju. U ovom radu je pokazano da je analizom pedoloških, geoloških i vegetacionih karakteristika sliva moguće dobiti informacije o veličini baznih proticaja, ali i o drugim komponentama bilansa. Važan zaključak ovog rada je, da je ukupno prihranjivanje podzemnih voda određeno kao suma prihranjivanja podzemnih voda sa različitih vrsta zemljišta, prekrivenih različitim vrstama vegetacije približno jednako ukupnom baznom oticaju sa sliva dobijenom analizom hidrograma oticaja na izlaznoj stanici sliva. Na taj način, u radu je uspostavljena povezanost između fizičko-geografskih karakteristika sliva i karakteristika baznog oticaja.

Premda sliv reke Kolubare spada u red bolje opremljenog i detaljnije studiranog sliva, nivo raspoloživih podataka nije bio takav da bi se u potpunosti mogle demonstrirati sve prednosti razvijenog modela. Ovo se pre svega odnosi na podatke o nameni površina i korišćenju zemljišta koji utiču i na proračun

evapotranspiracije i na preraspodelu voda na komponente direktnog i baznog oticaja.

U budućnosti, ovaj model je moguće proširiti i na simulaciju horizontalnih komponenti bilansa čime bi se uzela u obzir i razmena vode između susednih elementarnih zapremina. Uvođenjem GIS-tehnologije biće omogućeno povezivanje velikog broja fizičko-geografskih karakteristika sliva čime će se doprineti prevazilaženju problema nastalih dekompozicijom sliva na homogene oblasti. Time će se ostvariti svi preduslovi za širu primenu razvijenog tipa bilansnog modela.

## LITERATURA

- [1] 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).
- [2] 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
- [3] Carsel, R.F., Parrish R. S., 1988 Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resour. Res., 24: 755-769.
- [4] Childs, E.C., 1969 An introduction to the physical basis of soil water phenomena. Wiley (Interscience), New York.
- [5] Dausse, M., 1842 De la pluie et de l'influence des forets sur la cours d'eau. Ann. Ponts Chaussees, Mars-Avril, 184-209.
- [6] Feddes, R. A., Bresler, E., Neuman, S., 1974 Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems, Water Resour. Res., 10(6), 1199-1206.
- [7] Hall, F.R., 1968 Base flow recessions – a review. Water Resour. Res., 4(5):973-983.
- [8] Henning, A., Pettyjohn, T., 1979 Hysep - hydrograph separation program, U.S. Geological Survey,
- [9] Hillel, D., 1971 Soil and water, physical principles and processes. Academic Press, New York.
- [10] Lindsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H., 1982 Hydrology for engineers (3<sup>rd</sup> ed.). McGraw – Hill, New York, NY. 508 pp.

- [11] Meyboom, P., 1961. Estimating ground water recharge from stream hydrographs. *J. Geophys. Res.* no.66:1203-1214
- [12] Monteith, J.L., 1965. Evaporation and Environment. *Proc. 15<sup>th</sup>, Symp. Soc. Exp. Biology*, 19, Cambridge University Press, London, 205-234.
- [13] Moore, G.K., 1992. Hydrograph analysis in a fractured rock terrane. *Ground Water*. v.30, no. 3, pp. 390-395
- [14] Nathan, R.J., McMahon, T.A., 1990. Evaluation of automated techniques for base flow recession analyses. *Water Resour. Res.*, 7(26): 1465-1473.
- [15] Richards, L.A., 1981. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics*, 1: 318-333.
- [16] Rijtema, P.E. 1965. An analysis of actual evapotranspiration. *Pudoc. Wageningen*.
- [17] Rorabaugh, M. I., 1964. Estimating changes in bank storage and ground water contribution to streamflow. *Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.* 63, pp.432 – 441.
- [18] 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
- [19] Institut za zemljište, 1989. *Pedološki pokrivač zemljišta zapadne i severozapadne Srbije*, Beograd
- [20] Institut za zemljište, 1989. *Zemljišta brdsko-planinskih područja sliva reke Jablanice i predlog budućeg rešavanja*, Belgrade
- [21] Tallaksen, L.M., 1995. A review of baseflow recession analysis. *J. Hydrol.*, 165: 311-348.
- [22] Toebes, C., Strang, D.D., 1964. On recession curves, 1-Recession equations. *J. Hydrol. (New Zealand)*, 3(2): 2-15.
- [23] van Genuchten, M. Th., 1980 A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898, 1980.
- [24] van Genuchten, M. Th., Vogel, T., Huang, K., Zhang, R., 1995 *HYDRUS – a simulation model of one dimensional variably saturated water flow, solute transport, and heat movement including hysteresis, root water uptake and nonlinear sorption*. Reference manual, U.S. Salinity Laboratory, Agricultural Research Service, Riverside, California

## MATHEMATICAL MODELLING OF UNDERGROUND FLOW OF THE BASIN OF KOLUBARA RIVER

by

Mr Vesna ĐUKIĆ, dipl.grad.inž.  
Faculty of Forestry, University of Belgrade

## Summary

This study presents a physically founded hydrologic-hydraulic model for determining the base flow of the catchment by analysing the water balance of the basin and vertical exchange of water between the atmosphere, unsaturated media and ground water, basing on the known physical characteristics of the basin (climatic, paedological, geological and vegetation ones) on the example of the 340 km<sup>2</sup> Kolubara River basin up to "Valjevo" water level monitoring station in Serbia in three characteristic years: an extremely rainy year (1970), an average year (1985) and an extremely dry year (1990).

Taking into consideration that the amount of base flow of a basin is impossible to measure at the catchment outlet, the hydrograph of the base flow values obtained by separating from the streamflow hydrograph registered at the outlet of a drainage basin by

application of the graphical local minimum method was used for checking the model's functioning.

It was finally determined that the total base flow values at the outlet point of the catchment, obtained by application of the graphical local minimum method, equal approximately the base flow values obtained through analysing the basin's water balance, representing the summary of groundwater recharge originating from different soil types covered with different types of vegetation, under the influence of atmospheric conditions of the soil surface. Thus it was confirmed that when characteristics of a basin are known, it is possible to obtain information on the base flow values.

Key words: base flow, water balance, infiltration, evapotranspiration, groundwater recharge.

Redigovano 20.12.2006.