

## MODELIRANJE VODNIH REŽIMA U KARSTU

Doc. dr Miloš STANIĆ, Doc. dr Tina DAŠIĆ  
Građevinski fakultet, Beograd

### REZIME

Zakovitosti tečenja podzemnih tokova u karstnim predelima u potpunosti se razlikuje od tečenja u intergranularnoj sredini. U hidrauličkom smislu, ovo se tečenje bolje se opisuje zakonitostima tečenja u kanalima (cevima) pod pritiskom i sa slobodnom površinom, nego klasičnim tečenjem kroz poroznu sredinu. U ovom radu prikazan je jedan konceptualni (pojednostavljeni) fizički model, u okviru koga je vertikalni vodni bilans modeliran UNSAT modelom, koji se zasniva na tečenju kroz nezasićenu sredinu, a tečenje u horizontalnom pravcu modelirano je kvazi ustaljenim strujanjem. Model je urađen za slivno područje izvorišne zone reke Bregave u Istočnoj Hercegovini.

**Ključne reči:** karst, podzemni tok vode, hidrogeologija, matematičko modeliranje

### UVOD

Modeliranje tokova podzemnih voda u karstnim sredinama težak je i veoma složen posao. Za razliku od podzemnih voda u intergranularnim sredinama, za koje se relativno jednostavno i sa dovoljnom tačnošću mogu odrediti karakteristike toka, karstne sredine karakteriše veliki broj izvora, ponora, estavela i podzemnih kanala različitih veličina (od kanala-prslina prečnika nekoliko milimetara, do kanala čiji su prečnici u pojedinim presecima i do nekoliko desetina metara). Zbog takvih hidrogeoloških karakteristika za karstne predele vezane su mnoge neodređenosti, počevši od definisanja slivnog područja, koje se može i značajno razlikovati od orografskog sliva, do definisanja glavnih pravaca tokova podzemnih voda.

Zbog svega navedenog, za analizu i modeliranje podzemnih tokova u karstnim predelima neophodno je raspolagati rezultatima veoma detaljnih terenskih ispitivanja, različitih opita (opiti bojenjem,...), kao i

dovoljno dugačkim serijama osmatranja različitih parametara (padavine, nivo podzemne vode, nivoi površinskih voda, protoci i dr.) na velikom broju mernih stanica. Jedno od retkih područja na našim prostorima koje je tako sistematski ispitivano, je područje Istočne Hercegovine, odnosno slivovi reka Trebišnjice, Bregave, Zalomke, Bune i Bunice (slika 1).

Predmet ovog rada je ispitivanje režima voda izvorišta reke Bregave (odnosno izvorišne zone Bitunja - Suhavići) i analiza eventualnih uticaja koji se mogu javiti kao posledica antropogenih aktivnosti na slivu: uticaj izgrađenog tunel između Dabarskog i Fatničkog polja, kojim se odvođe vode iz Dabarskog polja, kao i tunel u izgradnji od Fatničkog polja do akumulacije Bileća, kojim bi se odvodile vode iz Fatničkog polja. Ovim merama sprečilo bi se plavljenje Dabarskog i Fatničkog polja i omogućilo intenzivnije poljoprivredno korišćenje tih polja.

### HIDROGEOLOŠKE KARAKTERISTIKE PODRUČJA

Izvorišna zona reke Bregave nalazi se u regionu spoljnih Dinarida i ima sve odlike karsta koji je poznat pod nazivom "Dinarski karst" (Milanović, 1987). To je tipičan primer holokarsta, u čijoj geološkoj građi dominiraju kredni krečnjaci sa zonama i proslojcima dolomita. Karakteriše ga postojanje površinskih i podzemnih karsnih fenomena, sa malo obradivih površina i vegetacije, kao i nekoliko većih i manjih karstnih polja. Ova polja su izduženog oblika, čiji pravac pružanja duže ose uglavnom prati pravac pružanja Dinarida severozapad - jugoistok, tzv, dinarski pravac pružanja. Po obodu polja nalaze se vrela, estavele i ponori, pri čemu su vrela uglavnom locirana na severnoj ivici polja, a ponori na južnoj ivici, obično u najnižim delovima polja. Između najznačajnijih vrela i ponora obično se formira stalni ili povremeni tok sa velikim varijacijama protoka. U periodima intenzivnih padavina kapaciteti izvora su veći od kapaciteta ponora,

zbog čega dolazi do plavljenja najnižih delova polja, a često i čitavog polja.



Slika 1. Deo područja Istočne Hercegovine sa osnovnim pravcima podzemnih tokova i slivnim područjima izvorišta reka Bregave i Trebišnjice

Najznačajaniji deo sliva izvorišne zone reke Bregave čini sliv Dabarskog polja, koji uključuje podslivove Trusinskog i Lukavačkog polja. Međutim, pored ovog slivnog područja neophodno je analizirati i sliv reke Trebišnjice, ili konkretnije sliv Fatničkog polja, s obzirom da se manji deo voda iz ovog polja, u određenim periodima, prazni preko izvorske zone Bitunja - Suhavić (slika 1).

#### Hidrogeološke karakteristike sliva izvorišne zone reke Bregave

Slivno područje izvorišne zone reke Bregave pokriva površinu od oko 396 km<sup>2</sup>. Izvorišna zona sastoji se od izvora Bitunja, na nadmorskoj visini od 130 mm, i Veliki i Mali Suhavići na 190 mm. Karakteristične vrednosti protoka ove zone su:

$$Q_{\min} = 0.45 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{\max} = 59 \text{ m}^3/\text{s}$$

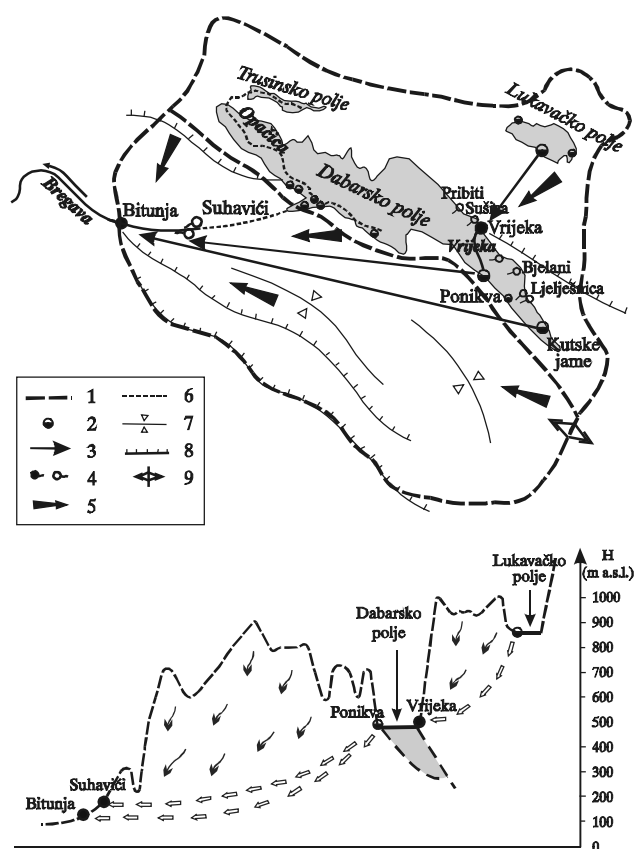
$$Q_{\text{sr}} = 17.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

Slivno područje podeljeno je dubokom flišnom barijerom ispod Dabarskog polja (koja je mestimično i preko 200 m dubine), na dve hidrogeološke celine, koje se po nizu parametara međusobno značajno razlikuju: neposredni i posredni sliv (slika 2).

**Neposredni (direktni) sliv** obuhvata planinske masive Hrgud i Sitnicu, locirane u zoni između Dabarskog polja i regionalnog raseda između Ljubomirskog polja i Stoca. Vode koje padnu na ovaj podsliv otiču (podzemno) direktno prema izvorišnoj zoni Bitunja - Suhavići. Ovaj podsliv obuhvata oko 60% površine ukupnog sliva, i u ukupnom bilansu on ima veći udeo od indirektnog sliva, tj. veći deo voda izvorišta Bregave potiče iz karsne izdani neposrednog sliva.

**Posredni (indirektni) sliv** obuhvata sliv Dabarskog polja, koji uključuje slivove Trusinskog i Lukavačkog polja. Vode iz severoistočnog dela sliva ne mogu da probiju flišnu barijeru, zbog čega se prazne duž ruba Dabarskog polja. U ovoj zoni formiran je podsliv u kojem Lukavačko polje predstavlja lokalni erozioni bazis i zonu koncentrisane infiltracije. Izdan Lukovičkog polja se prazni na erozionom bazisu višeg ranga - Dabarskom polju, preko više povremenih vrela Lješnica, Sušica, Bijelani i Pribiti i vrela Vrijeke. Retardacione sposobnosti ovih izdani učestvuju u opštim retardacionim karakteristikama izdani Bregave. Zbog razlike između dotoka i poniranja Lukavačko polje je povremeno plavljeno, a to se na vrelima Bregave manifestuje kao dodatni retardacioni efekat. Dabarsko polje predstavlja erozioni bazis i za podsliv Trusinskog polja koje ima karakteristike bujičarskog površinskog sliva, a sa Dabarskim poljem ga povezuje povremeni površinski tok Opačica (slika 2).

Vode koje dospevaju u Dabarsko polje poniru u ponorima duž južnog oboda polja. Po svojim transportnim mogućnostima u izdani Bregave se izdvaja karstni sistem Ponikve. Najveći deo voda posrednog sliva se transportuje kroz ovaj sistem. Kada je u polju poplava, odnosno kada je ovaj sistem pod pritiskom, u njemu dolazi do vrlo brze cirkulacije. Voda se kreće brzinom od oko 10 cm/s. U sušnom periodu kroz ovaj sistem se odvija tečenje sa slobodnom površinom. Fiktivna brzina podzemnog toka u ovim uslovima iznosi oko 0.6 cm/s.



Slika 2. Uprošćena hidrogeološka karta slivnog područja vrela Bregave

1. Granice slivnog područja i podslivova, 2. Ponor, 3. Podzemna veza utvrđena bojenjem, 4. Stalno i povremeno vrelo, 5. Generalni pravci podzemne cirkulacije, 6. Suva dolina, 7. Osa sinklinale, 8. Reversni rased, 9. Bifurkaciona zona

### Režim voda Dabarskog polja

Dabarsko polje, površine oko 31.7 km<sup>2</sup>, tipičan je primer zatvorenog kraškog polja. Ono ima karakterističan dinarski pravac pružanja od severozapada ka jugoistoku. Visinski polje generalno pada prema jugoistoku i nalazi se između kota 360 mm i 470 mm.

Izvorske zone Vrijeka, Lješnica, Sušica, Opačica i Pribiti na severnom rubu polja i ponori Ponikva i znatno manji Kutske jame, na južnom rubu polja, u potpunosti određuju režim voda ovog kraškog polja. Sve izvorske zone javljaju se povremeno, formirajući povremene površinske tokove, i imaju izrazit kraški karakter.

Izuzetak je Vrijeka koja ima stalni, ali vrlo kratak tok, dužine oko 2.5 km, sa minimalnim protokom od 100 l/s, a maksimalnim oko 25 m<sup>3</sup>/s. Ovaj tok završava na ponoru Ponikva.

Terenskim ispitivanjima utvrđeno je da sve vode, koje se pojavljuju u ovom polju, poniru u navedenim zonama i da se ponovo javljaju na povremenim ili stalnim izvorima reke Bregave. Kapacitet ponorske zone Dabarskog polja zavisi od različitih parametara, od kojih su najznačajniji nivo vode u polju i nivoi podzemnih voda u zaleđu ponora, a u maksimumu iznosi oko 45 m<sup>3</sup>/s. Najznačajniji ponor je ponor Ponikve, sa maksimalnim kapacitetom od 10 - 15 m<sup>3</sup>/s. Međutim, u periodu visokih nivoa podzemnih voda ponor je blokiran i ne propušta vodu.

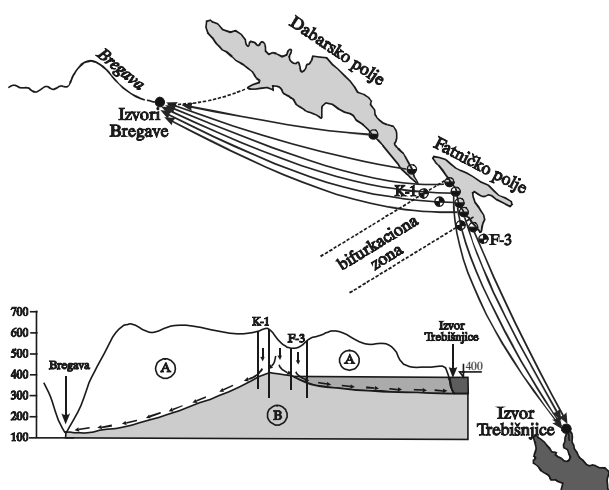
Obrada poplava rađena na osnovu podataka sa vodomernih stanica Kuti i Ponikva pokazuje da poplave u ovom polju traju od minimalno 42 dana do maksimalno 216 dana, dok se razmatranjem linije trajanja poplave može uočiti da prosečna poplava traje oko 110 dana.

### Hidrogeološke karakteristike sliva izvorišne zone reke Trebišnjice

Slivno područje izvorišne zone reke Trebišnjice obuhvata površinu od oko 1100 km<sup>2</sup>. Iako čitavo područje karakteriše visok infiltracioni kapacitet, mogu se izdvojiti tri zone sa veoma koncentrisanom infiltracijom: Gatačko polje (sa maksimalnim kapacitetom poniranja od 160 m<sup>3</sup>/s), Cerničko polje (sa maksimalnom izdašnošću izvora od 50 m<sup>3</sup>/s, a ponora 40 m<sup>3</sup>/s) i Fatničko polje (sa maksimalnim kapacitetom poniranja od 120 m<sup>3</sup>/s). Najveća količina voda ovog područja prazni se na najnižem erozionom bazu (izvori reke Trebišnjice), sa srednjim godišnjim protokom od 80 m<sup>3</sup>/s i maksimalnim vrednostima od oko 864 m<sup>3</sup>/s. Ova vrela su potopljena nakon izgradnje brane i formiranja akumulacije Bileća.

Deo voda koji se gubi u ponoru Srđevići, koji se nalazi u severozapadnom delu Gatačkog polja, nakon podzemnog toka pojavljuje se na estaveli Obod, u istočnom delu Fatničkog polja. To je ujedno i osnovni dotok vode u Fatničko polje, s obzirom da je njegov orografski sliv relativno mali, površine 40 km<sup>2</sup>. Jedan deo voda ponora Srđevići otiče i direktno prema vrelima reke Trebišnjice. Vode koje poniru u južnim delovima ovog polja uglavnom podzemno otiču prema vrelima reke Trebišnjice.

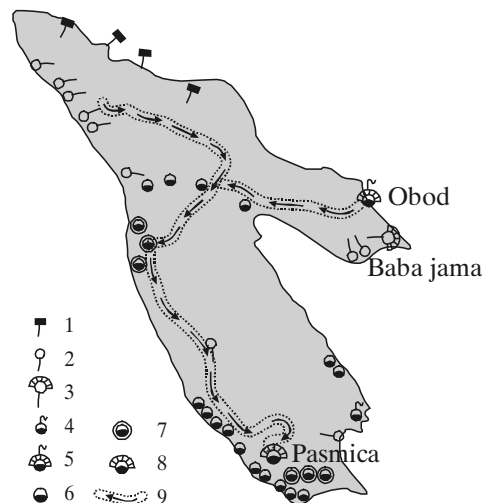
U delu izdani južno od Dabarskog polja bazis vrela Bregave (100 mmm) je preovladao nad bazisom vrela Trebišnjice (325 mmm). Područje podzemne vododelnice (bifurkaciona zona) između ova dva sliva nalazi se južno od Fatničkog polja. Naime, kao što se na slici 3 može zapaziti, u području Fatničkog polja postoji široka zona, sa nizom ponora, iz koje poniru vode istovremeno otiču u dva sliva: sliv reke Trebišnjice i sliv Bregave. Podzemni tokovi u zoni poniranja se ukrštaju i isprepliću na razne načine. Situacija je naročito komplikovana u periodu plavljenja polja, kada je praktično nemoguće utvrditi tačne količine voda koje odlaze u pravcu jednog i u pravcu drugog sliva. Procenjeno je da u periodu plavljenja Fatničkog polja, kada je nivo vode u polju veći od 10 m, deo voda (10% - 15%) otiče kroz ponore u jugozapadnom delu polja prema Bregavi.



Slika 3. Bifurkaciona zona u području Fatničkog polja  
A - karstifikovana stena, B - kompaktna stena ispod baze karstifikacije

### Režim voda Fatničkog polja

Fatničko polje, površine 5.6 km<sup>2</sup>, prirodni je produžetak Dabarskog polja u smeru jugoistok. Odvojeni su manjim krečnjačkim grebenom, što je uslovalo da postanu dve, po hidrološkim karakteristikama, odvojene celine. Režim voda ovog karstnog polja određen je režimom karstnih izvora Obod, Baba jama i Pribabići, smeštenih uz severni rub polja i ponorskih zona Pasmica i Velika pećina na jugoistočnom i južnom rubu polja (slika 4). Povremeni tok u Fatničkom polju egzistira relativno kratko vreme, od momenta kada proradi estavela Obod pa dok polje ne dođe pod uspor.



Slika 4. Fatničko polje

1 - kaptirani izvor, 2 - povremeno vrelo, 3 - veliko povremeno vrelo, 4 - estavela, 5 - velika estavela, 6 - ponor, 7 - grupa bliskih ponora, 8 - veliki ponor, 9 - povremeni rečni tok

Najznačajniji izvor u Fatničkom polja predstavlja estavela Obod, koja uglavnom radi kao vrelo, dok je funkcija ponora daleko podređenija i sa aspekta odvodnjavanja polja gotovo zanemarljiva. Najveća izmerena količina vode koja je isticala na Obodu iznosi 35.8 m<sup>3</sup>/s. Maksimalno nije izmeren jer se u periodu maksimalne izdašnosti Obod nalazi pod usporom. Procenjuje se da bi ta količina vode mogla biti oko 60 m<sup>3</sup>/s. Najznačajniji ponor u Fatničkom polju je ponor Pasmica u južnom delu polja, sa kapacitetom gutanja od 15 - 20 m<sup>3</sup>/s. U ovom delu polja nalazi se i veliki broj manjih ponora, kao i ponorske zone u vidu sistema uskih pukotina (slika 4). Vode koje poniru u zoni Pasmice pojavljuju se na izvorima Trebišnjice i čepelnice, dok ponorska zona Velike pećine drenira manji deo ovog polja u pravcu izvora reke Bregave.

Obrada poplava izvršena je sa podacima vodomerne stanice Pasmica. Analizom podataka uočeno je da minimalne poplave traju 67 dana, a maksimalne 235 dana. Prosečna poplava na ovom polju traje 137 dana.

### KONCEPTUALNI MODEL SISTEMA

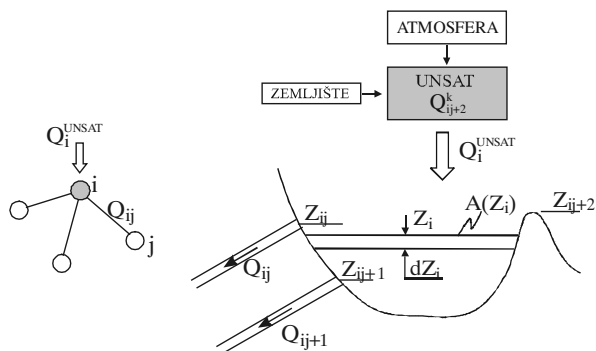
#### Opis korišćene metode simulacije

Kao što je već istaknuto, pojednostavljeni fizički model sistema urađen je u cilju ispitivanja uticaja izgrađenog tunela između Dabarskog i Fatničkog polja, kao i tunela u izgradnji između Fatničkog polja i akumulacije Bileća

na režim voda izvorišne zone reke Bregave i na plavljenje Dabarskog i Fatničkog polja.

Razmatrano područje modelira se sistemom čvorova (rezervoari) i veza između tih čvorova (cevi, kanali, ispusti, ustave). Proračun se obavlja po modelu kvazi ustaljenog strujanja. Graf koji formira mreža čvorova i veza je neorijentisani graf, što znači da protok može biti usmeren u oba pravca (pozitivan i negativan).

Za svaki čvor može se definisati njegovo slivno područje, što znači da čvor može imati spoljašnji dotok vode, koji je rezultat procurivanja iz nezasićene sredine (slika 5). Kretanje vode u nezasićenoj sredini odvija se primarno u vertikalnom pravcu i modelirano je posebnim podprogramom - modelom UNSAT, kojim se padavine transformišu u oticaj. Tako dobijene vrednosti proticaja predstavljaju ulazni dotok u rezervoare.



Slika 5. Šematski prikaz dela mreže (veze čvorova "i" sa susednim čvorom) i vodnog bilansa u rezervoaru (čvoru "i")

Osnovna jednačina modela je bilansna jednačina za rezervoar "i":

$$\frac{dZ_i}{dt} = \frac{Q_i^{UNSAT} - \sum_i Q_{ij}}{A(Z_i)}$$

$$Q_{ij} = K_{ij} \Delta H_{ij}^x \frac{\Delta H_{ij}}{|\Delta H_{ij}|}$$

gde su:

$Z_i$  - nivo vode u čvoru "i"

$A(Z_i)$  - površina poprečnog preseka

$K_{ij}$  - koeficijent protoka za vezu između čvorova "i" i "j", a zavisi od tipa veze i nivoa vode u oba čvora

$x$  - koeficijent koji zavisi od tipa veze

Opisane jednačine definišu se za čitavu mrežu, tako da se formira sistem običnih diferencijalnih jednačina, koji

se rešava simultano za celu mrežu. Kao rezultat proračuna dobijaju se nivoi vode za svaki čvor ( $Z_i(t)$ ) i protoci za svaku vezu ( $Q_{ij}(t)$ ).

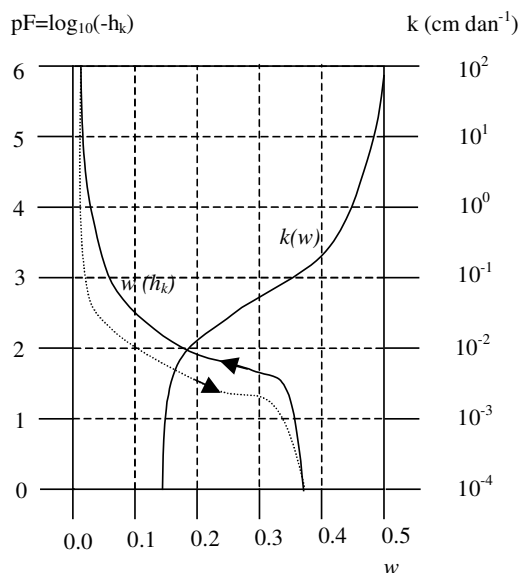
### UNSAT - model za simulaciju kretanje vode u nezasićenoj sredini

Parcijalna diferencijalna jednačina koja opisuje nestacionarno jednodimenzionalno strujanje u nezasićenim sredinama, je nelinearna diferencijalna jednačina paraboličkog tipa za koju analitičko rešenje u opštem slučaju ne postoji.

$$C(h_k) \frac{\partial h_k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (k(h_k) (\frac{\partial h_k}{\partial z} - 1))$$

$w$  - vlažnost zemljišta ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $q$  - fluks koji nastaje kao posledica razlike potencijala ( $\text{cm}/\text{dan}$ ),  $k$  - koeficijent filtracije u nezasićenom stanju ( $\text{cm}/\text{dan}$ ),  $z$  - vertikalna koordinatna osa koja je pozitivno usmerena na dole ( $\text{cm}$ ),  $h_k$  - kapilarni potencijal ( $\text{cm}$ ).

Da bi se rešila jednačina (1) za određene početne i granične uslove neophodno je definisati karakteristike zemljišta koje su zadate u funkciji od kapilarnog potencijala odnosno vlažnosti  $k(w)$  i  $w(h_k)$ . Na slici 6 prikazani su uobičajeni dijagrami ovih veličina.



Slika 6. Uobičajeni oblici dijagrama vlažnosti zemljišta  $w(h_k)$  i koeficijenta filtracije  $k(w)$

Postoje tri tipa graničnih uslova:

1. Dirichlet-ov granični uslov u kome je na granici zadat potencijal
2. Neuman-ov uslov u kome je na granici zadat fluks

3. Cauchy-jev granični uslov gde je zadata funkcionalna veza fluksa I potencijala.

Za definisanje graničnog uslova na površini terena neophodno je imati merene ili sračunate vrednosti evapotranspiracije i padavina.

Granični uslov na površini terena zadaje se u obliku poznatog fluksa (Neuman-ov tip):

$$q_{\Gamma_1} = P - E_p$$

U prethodnoj jednačini sa  $\Gamma_1$  je označena gornja granica domena strujanja, P su padavine i  $E_p$  je potencijalna evaporacija.

Ovako sračunat fluks ( $q_{\Gamma_1}$ ) zapravo potencijalna vrednost, uslovljena isključivo atmosferskim prilikama. Stvarni fluks kroz gornju granicu dobija se na osnovu uslova koji vladaju u zemljištu i njegove mogućnosti da primi iz atmosfere ili otpusti u nju određenu količinu vode.

U slučaju padavina jakog intenziteta samo deo padavina se infiltrira, ostatak otiče i čini tako zvani direktan oticaj. Na sličan način evaporacija je ograničena mogućnošću zemljišta da transportuje vlagu iz dubljih slojeva. Sve ovo navodi na zaključak da gornji granični uslov nije unapred poznat, već se utvrđuje u toku simulacije.

U uslovima kada je potencijalna vrednost fluksa na gornjoj granici veća od nule (preovlađuju padavine), pritisak na površini terena mora biti manji od unapred zadate pozitivne vrednosti  $h_p$ , koja predstavlja maksimalan nadsloj vode, odnosno maksimalan pritisak, koji se može javiti na površini terena. Ukoliko preovlađuje evaporacija (fluks je negativan), minimalan pritisak koji se može javiti na površini zemljišta računa se iz pretpostavke o ravnoteži, uslova koji vladaju u zemljištu i atmosferi.

Iz svega navedenog mogu se napisati sledeće relacije:

$$|q_{\Gamma_1}^*| \leq |q_{\Gamma_1}| = -k(h_k) \left( \frac{\partial h_k}{\partial z} - 1 \right)$$

$$h_l \leq h_k \leq h_p$$

$$h_l = \frac{RT}{Mg} \ln\left(\frac{RH}{100}\right)$$

gde je R - univerzalna gasna konstanta  $J \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , T - temperatura vazduha (K), g - gravitaciono ubrzanje, M - molekularna težina vode ( $\text{kg mol}^{-1}$ ) i f - relativna vlažnost vazduha.

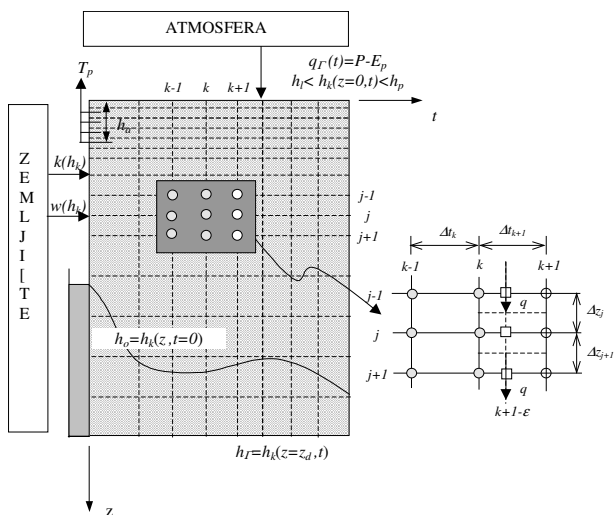
Kao donji granični uslov mogu se javiti sva tri navedena tipa graničnih uslova.

Početni uslov se zadaje u formi poznate vlažnosti zemljišta u trenutku  $t = 0$ .

$$h_k(t=0, z) = h_0(z)$$

Postoje brojne metode za numeričko rešavanje parcijalne diferencijalne jednačine paraboličkog tipa (1). U okviru modela UNSAT korišćen je metod konačnih elemenata.

Primena metoda konačnih razlika, podrazumeva da se prostor rešenja diskretizuje. Korak diskretizacije po z je  $\Delta z$ , a po nezavisno promenljivoj t je  $\Delta t$ . Šema proračuna prikazana je na slici 7.



Slika 7. Šema proračunske mreže i podaci neophodno za rešavanje parcijalne diferencijalne jednačine metodom konačnih elemenata

Osnovna parcijalna diferencijalna jednačina, može se napisati u diskretnom obliku:

$$C_j^{k+1-\varepsilon} \frac{h_j^{k+1} - h_j^k}{\Delta t_k} + \frac{2(q_{j+1/2}^{k+1-\varepsilon} - q_{j-1/2}^{k+1-\varepsilon})}{\Delta z_{j-1} + \Delta z_j} + \alpha_j^{k+1-\varepsilon} S_{\max}^{k+1-\varepsilon} = 0$$

U prethodnoj jednačini sa q je označen fluks između tačaka diskretizovanog prostora:

$$q_{j-1/2}^{k+1-\varepsilon} = -k_{j-1/2}^{k+1-\varepsilon} \left( \frac{(1-e) \cdot h_j^{k+1} + e \cdot h_j^k - (1-e) \cdot h_{j-1}^{k+1} - e \cdot h_{j-1}^k - \Delta z_{j-1}}{\Delta z_{j-1}} \right)$$

$$q_{j+1/2}^{k+1-\varepsilon} = -k_{j+1/2}^{k+1-\varepsilon} \left( \frac{(1-e) \cdot h_{j+1}^{k+1} + e \cdot h_{j+1}^k - (1-e) \cdot h_j^{k+1} - e \cdot h_j^k - \Delta z_j}{\Delta z_j} \right)$$

U prvoj iteraciji se vrednosti kapilarnog potencijala u vremenskom preseku  $k+1-\varepsilon$  dobijaju kvadratnom ekstrapolacijom a u narednim iteracijama linearnom interpolacijom:

$$h^{k+1-e} = (1-e) \cdot h^{k+1} + e \cdot h^k$$

Sređivanjem diskretizovane jednačine, problem se svodi na rešavanje tridijagonalnog sistema linearnih jednačina, koji se rešava u svakoj iteraciji po nepoznatim vrednostima kapilarnog potencijala  $h^{k+1}$ .

### Model razmatranog područja

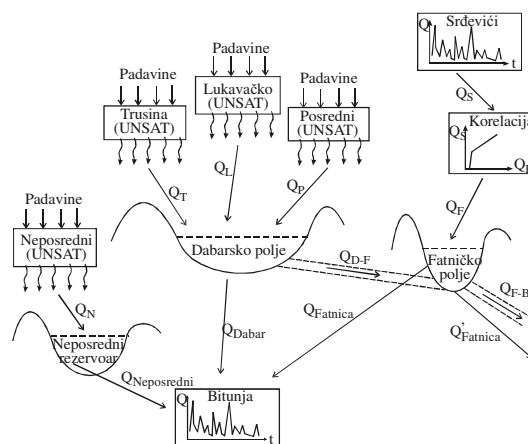
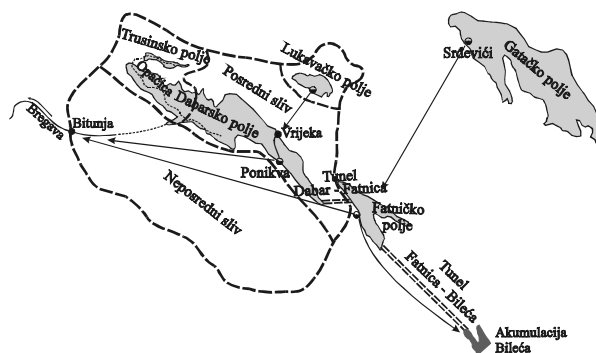
Analizom hidrogeoloških karakteristika razmatranog područja uočavaju se tri (po svojim geološkim i fizičkim karakteristikama) različita podsistema (slika 8):

1. Posredni sliv izvorišne zore reke Bregave
2. Neposredni (direktni) sliv izvorišne zore reke Bregave
3. Deo slivnog područja izvorišne zone reke Trebišnjice

Dalja dekompozicija definisanih podsistema zasniva se na uobičajenoj praksi da se posebno modelira tečenje vode u nezasićenju i zasićenju sredini:

- u nezasićenju sredini kretanje vode obavlja se primarno u vertikalnom pravcu, vodni bilans modeliran je UNSAT modelom.
- u zasićenju sredini odvija se primarno horizontalno kretanje vode koje je modelirano mrežom čvorova i veza između njih.

Zbog postojanja nepropusne hidrogeološke barijere ispod Dabarskog polja, sve vode sa posrednog dela sliva dospevaju u Dabarsko polje, gde se javljaju kao stalni i povremeni površinski tokovi. Posredni deo sliva podeljen je na tri dela (podsliva): Trusina (kojim je predstavljeno slivno područje Trusinskog polja), Lukavačko (slivno područje Lukavačkog polja) i Posredni (preostali deo posrednog sliva). Ovim podsistemima simulirano je vertikalno kretanje vode i oticanje/procurivanje iz nezasićene sredine. U periodima intenzivnih padavina Dabarsko polje se plavi, pa je ono modelirano kao rezervoar (čvor - Dabarsko polje). Dotoci u ovaj rezervoar su isticanja iz podslivova: Trusina ( $Q_T$ ), Lukavačko ( $Q_L$ ) i Posredni ( $Q_P$ ). Voda iz ovog čvora, sistemom veza, otiče prema izvorišnoj zoni reke Bregave (čvoru - Bitunja) ( $Q_{Dabar}$ ) (slika 8).



Slika 8. Šema dekomponovanog modela sistema

Drugi podsistem, koji je definisan kao Neposredni sliv izvorišne zone reke Bregave, dekomponuje se na dva dela: model strujanja vode u nezasićenju sredini (UNSAT), definisan kao Neposredni i zasićena sredina neposrednog sliva definisana kao rezervoar Neposredni rezervoar (slika 8). U ovaj rezervoar dotiče voda sa sliva Neposredni ( $Q_N$ ), a ističe prema čvoru Bitunja ( $Q_{Neposredni}$ ).

Treći podsistem, deo slivnog područja izvorišne zone reke Trebišnjice, uključuje se u sistem zbog postojanja bifurkacione zone, odnosno činjenice da jedan manji deo voda iz Fatničkog polja, u određenim hidrološkim situacijama, otiče prema izvorima reke Bregave. Dotoci vode u Fatničko polje određuju se iz korelacije između protoka izmerenih na vodomernoj stanici Srđevići ( $Q_S$ ) i dotoka u Fatničko polje ( $Q_F$ ). Zbog toga u formiranom modelu Fatničko polje nema sopstvenu slivnu površinu. U periodima intenzivnih padavina Fatničko polje plavi, pa je ono u modelu definisano kao rezervoar. S obzirom da vode iz ovog polja otiču prema različitim slivovima

(izvorištima), ovaj čvor (rezervoar) ima dva izlaza/ispusta:

- jedan izlaz na dnu polja, kojim voda otiče prema izvorima reke Trebišnjice ( $Q_{\text{Fatnica}}$ ) i
- drugi izlaz kojim voda otiče prema izvorima reke Bregave ( $Q_{\text{Fatnica}}$ ). Ovaj izlaz nalazi se 10 m iznad prvog, jer je hidrogeološkim istraživanjima utvrđeno da voda iz Fatničkog polja otiče prema izvorima Bregave kada je nivo vode u polju veći od 10 m, što je opisano u prvom delu rada.

S obzirom da je formiranim modelom potrebno ispitati uticaj izgradnje tunela na režim voda izvorišne zone reke Bregave, analizirana su tri perioda (za koja se u izvesnoj meri razlikuje i struktura modela):

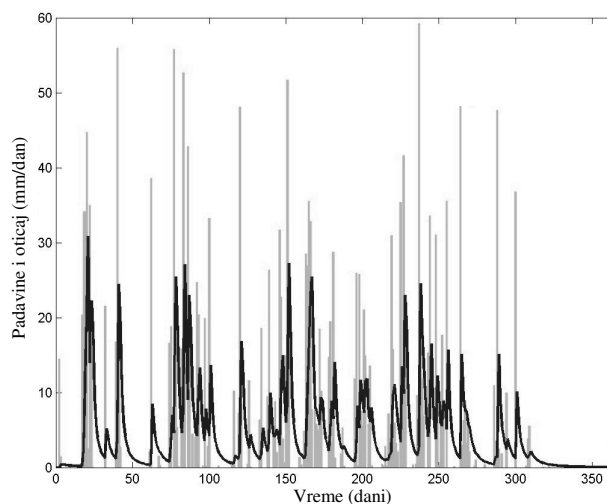
1. Prirodni uslovi (pre 1986. godine) - opisana tri rezervoara bila su, sistemom veza, povezana sa jednim izlazom - izvori Bregave (izuzetak je Fatničko polje koje je bilo vezano i sa izvorima Trebišnjice).
2. Puštanje u rad tunela između Dabarskog i Fatničkog polja (nakon 1986. godine) - u model se uključuje i veza između ova dva rezervoara ( $Q_{\text{D-F}}$ ). Režim rada tunela definisan je nivoima vode u poljima, odnosno tunel je zatvoren je samo u slučajevima kada je nivo vode u Fatničkom polju veći od nivoa vode u Dabarskom polju, što je uključeno kao dodatni uslov u model.
3. Izgradnja i puštanje u rad tunela između Fatničkog polja i akumulacije Bileća (neki vremenski presek u budućnosti). Ovaj tunel modelira se kao još jedan ispuštanje vode iz Fatničkog polja ( $Q_{\text{F-B}}$ ), i ne zavisi od nivoa vode u akumulaciji Bileća.

## REZULTATI SIMULACIJE

### Rezultati UNSAT simulacionog modela

Na osnovu globalnog bilansa voda, koji je urađen za čitav simulacioni period, pokazuje se da samo 16% padavina ne doprinosi protoku na vodomernoj stanici Bitunja, koja se nalazi neposredno nizvodno od izvorišne zone reke Bregave. Iz ove analize zaključuje se da se izračunata količina padavina gubi na evaporaciju, dok se ostatak padavina, nakon prolaska kroz nezasićenu sredinu pojavljuje u površinskim i podzemnim rezervoarima, koji su definisani kao čvorovi sistema.

Model UNSAT zahteva podatke koje se odnose na karakteristike zemljišta, a najznačajniji su poroznost i koeficijent filtracije pri saturaciji ( $K_s$ ). Prethodno sprovedenim istraživanjima pokazano je da je akumulaciona sposobnost stene mala, pa je usvojena relativno mala vrednost poroznosti od 0.1. Sa druge strane, očekuju se velike vrednosti koeficijenta filtracije, odnosno voda brzo infiltrira u karstifikovanu stenu, zbog čega su evaporacija i oticaj mali (što je jasno iz globalnog bilansa voda). Kalibracijom UNSAT modela pokazalo se da je koeficijent filtracije  $K_s = 5 \cdot 10^{-4}$  m/s. Protok kroz nezasićenu sredinu simuliran je za prva 2 m tla. Rezultati simulacije prikazani su na slici 9, za jednu hidrološku godinu koja počinje 01. septembra, odnosno krajem sušnog perioda (period 01.09.1977. - 31.08.1978).



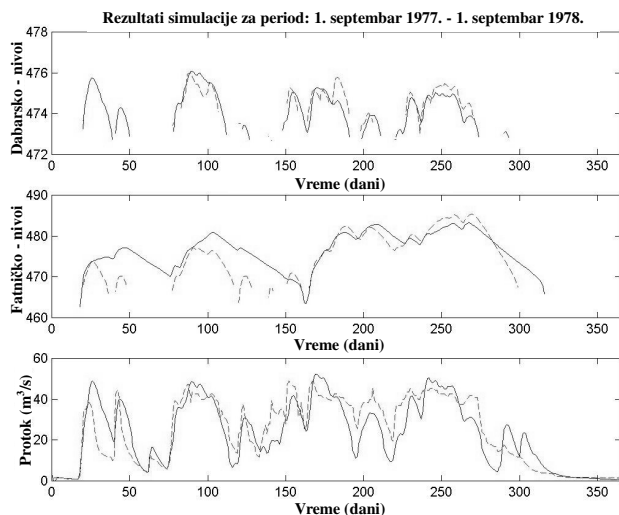
Slika 9. Rezultati UNSAT modela, za period 01.09.1977 - 31.08.1978.

### Rezultati konceptualnog modela sistema

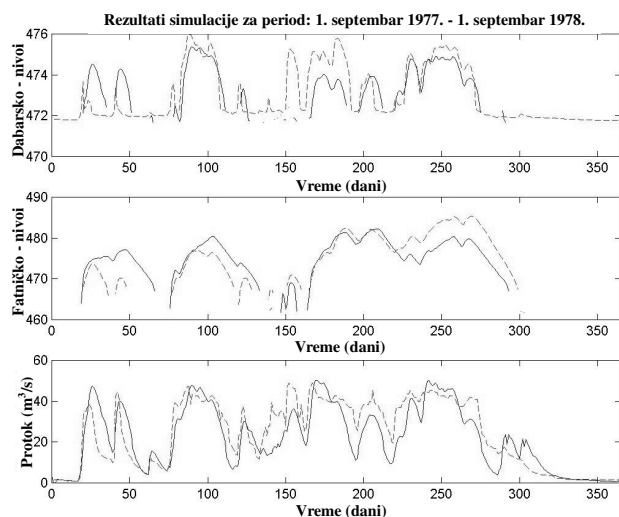
Modelom je simuliran period od 10 godina (period za koji se raspolagalo svim potrebnim mernim podacima). Simulacija je urađena za sva tri definisana perioda (scenarija): prirodni uslovi, nakon izgradnje tunela između Dabarskog i Fatničkog polja i nakon izgradnje tunela između Fatničkog polja i akumulacije Bileća. Kako bi se sagledali efekti tunela na režime voda izvora reke Bregave i na plavljenje polja, sve tri analize urađene su za isti period. Na slikama 10, 11 i 12 date su osmotrene vrednosti u prirodnim uslovima i simulirane vrednosti nivoa vode u Dabarskom i Fatničkom polju i protoka na izvorištima reke Bregave (vodomerna stanica



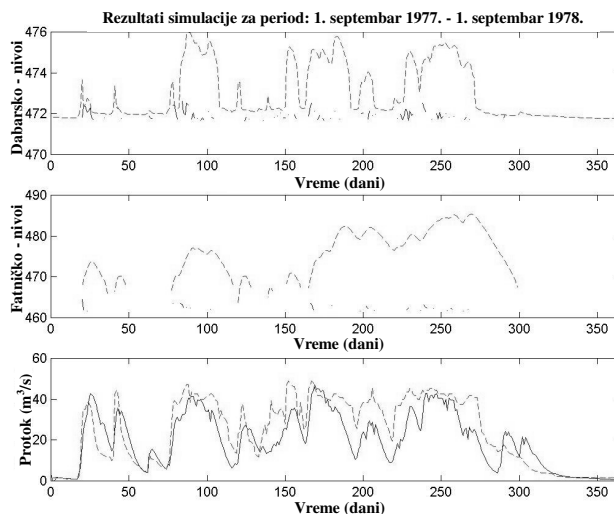
Bitunja), za sva tri analizirana scenarija. U cilju preglednosti podataka rezultati simulacije prikazani su samo za jednu simuliranu godinu.



Slika 10. Simulacioni rezultati za prirodne uslove (period 01.09.1977. - 31.08.1978.). Puna linija - simulirani rezultati, isprekidana linija - osmotrene vrednosti



Slika 11. Simulacioni rezultati kada postoji tunel Dabarsko - Fatničko polje (period 01.09.1977. - 31.08.1978.). Puna linija - simulirani rezultati, isprekidana linija - osmotrene vrednosti



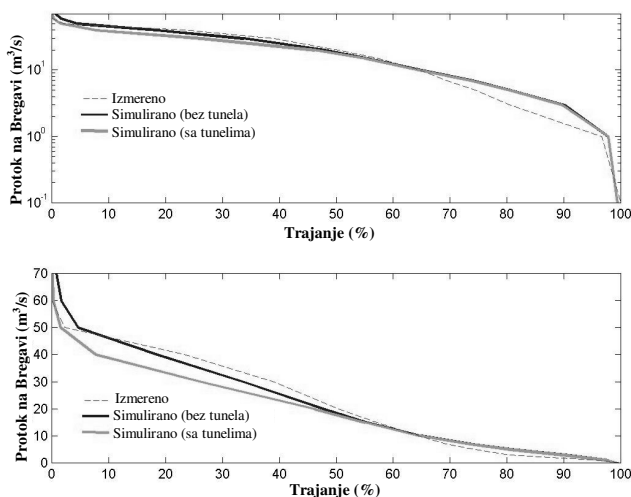
Slika 12. Simulacioni rezultati kada postoje tuneli Dabarsko - Fatničko polje i Fatničko polje - akumulacija Bileća (period 01.09.1977. - 31.08.1978.). Puna linija - simulirani rezultati, isprekidana linija - osmotrene vrednosti

Kao što se na slici 10 može uočiti, između osmotrenih i simuliranih vrednosti protoka na izvorima Bregave, u određenim periodima, javlja se sistematsko odstupanje rezultata. Ova odstupanja posledica su sledećih činjenica:

- za čitavo područje neposrednog sliva raspolagalo se podacima padavina sa jedne hidrološke stanice. S obzirom da se modelom ne simulira prostorna neravnomernost padavina, koja je gotovo izvesna za površinu sliva od oko 240 km<sup>2</sup>, realno je očekivati izvesna odstupanja simuliranih i osmotrenih vrednosti. Ovo odstupanje posebno je uočljivo u periodu oko 300-tog dana (približno početak jula), a najverovatniji razlog su padavine koje su pale samo na posredni deo sliva, a ne na čitav sliv.
- modelom se ne simuliraju efekti histerezisa, koji su karakteristični za karsna područja (što je utvrđeno terenskim ispitivanjima), što znači da se funkcija oticaj - nivo vode razlikuju za periode povećanja i smanjenja nivoa vode. Ovaj uticaj može biti posebno izražen u periodu malih proticaja.

Na slici 13 prikazana je kriva trajanja protoka na vodomernoj stanici Bitunja formirana na osnovu osmotrenih vrednosti i simuliranih vrednosti za sva tri

ispitivana slučaja, za razmatrani period od 10 godina. Krive trajanja prikazane su u običnoj i logaritamskoj razmeri, kako bi se bolje uočile vrednosti za protoke manje od  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Slika 13. Krive trajanja protoka na vodomernoj stanici Bitunja

## ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da formirani konceptualni model sistema daje relativno dobre rezultate za karstne predele. Izvesna odstupanja, koja se uočavaju, najverovatnije su posledica nedovoljnog broja ulaznih podataka, odnosno podataka o padavinama na slivnoj površini.

Upoređivanjem podataka dobijenih za prirodne uslove i uslove kada postoji tunel između Dabarskog i Fatničkog polja može se zaključiti da rad ovog tunela neznatno utiče na nivo vode u Dabarskom i Fatničkom polju, kao i na protoke na izvorštima Bregave. Sa krive trajanja protoka uočava se da su protoci manji od  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  ostali u potpunosti nepromenjeni.

Uključivanjem u rad tunela između Fatničkog polja i akumulacije Bileća uočavaju se značajni efekti na nivo vode (poplavu) u Dabarskom i Fatničkom polju, odnosno radom analizirana dva tunela gotovo u potpunosti se sprečava plavljenje polja. Kada je reč o

protocima na izvorštima reke Bregave, značajniji uticaji javljaju se za protoke veće od  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ , odnosno ovi protoci (koji su veći od srednjeg godišnjeg protoka) smanjuju se za 15 - 20%. Nasuprot tome, protoci manji od  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  ostaju u potpunosti nepromenjeni.

## LITERATURA

- [1] Avdagić I.: Određivanje proticaja u potopljenim kraškim poljima merenjem nivoa vode u pjezometrima i akumulaciji, Zbornik jugoslovensko-američkog simpozijuma "Hidrologija i vodno bogatstvo krša", Dubrovnik, 1975.
- [2] Kabat P. and Beekma P., 1994. Water in Unsaturated Zone, Drainage Principles and Application, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen.
- [3] Milanović P.: Hydrogeological features and methods of investigation in karst of Eastern Herzegovina, Review of Institute for geology and hydrogeology, Belgrade, 1972/1973.
- [4] Milanović P.: Karst hydrogeology, WRS, Colorado, 1981.
- [5] Milanović P.: Influence of the karst spring submergence on the karst aquifer regime, Journal of Hydrology, 1986.
- [6] Milanović P.: Hidrogeološke karakteristike karsne sredine sa primerima slivova Trebišnjice i Bregave, časopis "Vodoprivreda", Beograd, 1987.
- [7] Milićević M.: Influence of reservoirs on changes in natural flooding of upstream karst plains, Karst Hydrology and Water Resources: Proceedings of the US-Yugoslavian Symposium, Dubrovnik, 2-7 1975, Published by Water Resources Publication Fort Collins Colorado 1976
- [8] Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Am. J. 44

## NAPOMENA

Ovaj članak rezultat je rada na projektu "Analysis of the effects of the water transfer through the tunnel Fatničko polje - Bileća reservoir on the hydrologic regime of Bregava river".

## MODELLING OF WATER REGIME IN KARST

by

Miloš STANIĆ, Tina DAŠIĆ  
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

### Summary

Underground flow regime in karst areas completely differs from flow in intergranular aquifers. Hydraulically, this flow can be better described as a system of reservoirs and pipes with flow under pressure and with free surface, than as underground flow in intergranular aquifer. A simplified (conceptual) physically based model of water regimes in karst areas is presented in the article. Vertical water movement and

leakage from unsaturated zone is simulated using UNSAT model. The model for water balance in horizontal plane is based on quasi-steady hydraulic simulation, with the case study for the catchment area of Bregava river spring zone in Eastern Herzegovina.

Keywords: karst, underground water flow, hydrogeology, mathematical modeling

Redigovano 18.04.2005.