

PRORAČUN INFILTRACIJE VODE U NEZASIĆENO ZEMLJIŠTE

Mr Vesna ĐUKIĆ, dipl. građ. inž.
Šumarski fakultet, Beograd

REZIME: Predmet ovog rada je modeliranje procesa infiltracije vode kroz zemljište primenom Ričardsove jednačine za slučaj kretanja vode samo u jednom, vertikalnom, pravcu. Primenom Ričardsove jednačine dobijaju se najrealnije procene veličine infiltracije, jer se primenom ove jednačine infiltracija određuje vodeći računa o fizičkim zakonima koji utiču na nju. Primenjeni model infiltracije sadrži parametre koji odražavaju fizičku prirodu samog procesa i koji mogu biti merljivi. S obzirom da uspešna simulacija oticaja u velikoj meri zavisi od tačnosti predviđanja zapremine infiltrirane vode u zemljište, pomoću ovog modela analizirani su uslovi za pojavu površinskog oticaja. Validnost modela je pokazana na primeru smeđeg skeletoidnog zemljišta na škriljcima u mestu Rebelj, u blizini Valjeva.

Ključne reči: Ričardsova jednačina, nezasićena sredina, infiltracija, profili vlažnosti zemljišta, oticaj

1. UVOD

Proces transformacije padavina u oticaj je veoma složen. Proračun oticaja sa nekog sliva je veoma značajan pri planiranju i upravljanju vodnim resursima pogotovo u slučaju malih slivova na kojima ne postoje mereni podaci o oticajima, ili pak u slučajevima kada su ljudskim aktivnostima nastale značajne promene prirodnih uslova u slivu. Uspešna simulacija oticaja u velikoj meri zavisi od tačnosti predviđanja zapremine infiltrirane vode u zemljište zbog čega je u ovom radu posebna pažnja posvećena modeliranju procesa infiltracije i analizi uslova za pojavu površinskog oticaja na primeru elementarnog dela smeđeg skeletoidnog zemljišta na škriljcima u mestu Rebelj, u blizini Valjeva, u toku 1990. godine.

Uprkos velikom uticaju infiltracije na veličinu oticaja sa zemljišta, infiltraciona komponenta se često predstavlja empirijskim povezanostima koje sadrže konstante koje se moraju fitovati prema karakteristikama sliva: Kostjakova jednačina (Rode, 1965), Hortonova

jednačina (Childs, 1969) Holtanova jednačina (Holtan, 1961), metoda Φ -indeksa, Green-Amptova jednačina (Green and Ampt, 1911) i dr.

S obzirom da infiltracija opisuje kretanje vode sa površine u unutrašnjost zemljišta i definiše uslove kretanja vode na površini terena, njena veličina se može odrediti na osnovu jednačina koje opisuju kretanje vode kroz zemljište.

Veličina infiltracije, kao i veličina oticaja, u velikoj meri zavise od fizičkih karakteristika sliva: klimatskih, pedoloških, geoloških i vegetacionih karakteristika. Na veličinu infiltracije u velikoj meri utiču: intenzitet i vrsta padavina, uslovi na površini terena, fizičke osobine zemljišta (mehanički sastav i struktura zemljišta, poroznost, količina vode u zemljištu), vrsta vegetacije i dr.

Vertikalno kretanje vode kroz nezasićenu sredinu obavlja se u okviru sistema atmosfera (A) – nezasićena sredina (NS) - podzemna voda (PV) i povezano je sa graničnim uslovima na njenoj gornjoj i donjoj granici. Dominantan uticaj na kretanje vode kroz zemljište imaju kapilarne i gravitacione sile pri čemu gravitaciona sila teži da primora element da ga spusti na niži nivo, a kapilarna sila teži da izazove kretanje elementa iz zone višeg pritiska u zonu nižeg pritiska.

Površina zemljišta predstavlja granicu, koja deli podsistem A i NS i predstavlja oštru promenu zakonitosti kretanja vode ispod i iznad nje. Površina zemljišta ima specifična svojstva, koja određuju koji deo vode se upija u zemljište, koji deo se zadržava u udubljenjima mikroreljefa, a koji obrazuje površinski oticaj. Uslovi na površini zemljišta predstavljaju gornje granične uslove pri opisivanju kretanja vode u nezasićenoj sredini zemljišnog profila.

Nivo podzemne vode predstavlja granicu između podistema nezasićene sredine i podistema podzemne vode, odnosno predstavlja donju granicu nezasićene

sredine. Uslovi kretanja vode na donjoj granici nezasićene sredine nazivaju se njenim donjim graničnim uslovima.

Veličina infiltracije i karakteristike kretanja vode kroz nezasićenu sredinu smeđeg skeletoidnog zemljišta na škriljcima određeni su numeričkim rešavanjem Ričardsove jednačine za slučaj kretanja vode samo u vertikalnom pravcu. Primenom ove jednačine dobijaju se najrealnije procene veličine infiltracije, jer ona uzima u obzir većinu faktora od kojih zavisi proces infiltracije. Ričardsova jednačina u sebi povezuje uslove na površini terena (padavine i isparavanje), uslove na donjoj granici nezasićene sredine, karakteristike zemljišta i uzima u obzir procese kretanja vode kroz zemljište koji su se odvijali u prošlosti.

Pri definisanju uslova za pojavu i trajanje površinskog oticaja bitan je odnos intenziteta padavina, intenziteta infiltracije i koeficijenta filtracije. Pri maloj vlažnosti zemljišta sila usisavanja (negativna vrednost kapilarne sile) u zemljištu je velika, a provodljivost je mala. Pri velikoj vlažnosti zemljišta, blizu zasićenja, sila usisavanja u zemljištu je mala, pa je relativna provodljivost zemljišta velika. Do površinskog oticaja dolazi u trenutku kada je u površinskom sloju zemljišta vlažnost jednaka vlažnosti zasićenja, a kapilarna sila jednaka nuli. Ovaj uslov se javlja samo u slučaju kada je intenzitet padavina veći od maksimalnog intenziteta kojim zemljište apsorbuje vodu. Pojavi površinskog oticaja pogoduju slabo propusna zemljišta ili zemljišta koja leže na slabo propusnoj ili nepropusnoj površini.

Pri analizi oticaja veoma je važno tačno odrediti trenutak početka oticaja. Trenutak početka oticaja zavisi od intenziteta padavina, od početne vlažnosti zemljišta, od vodno-fizičkih svojstava sredine. Povećanje akumulacione sposobnosti zemljišta odlaže trenutak početka oticaja što znači da će, ukoliko koeficijent filtracije ima veću vrednost, kasnije doći do oticaja.

2. OPIS MATEMATIČKOG MODELA

Vertikalno kretanje vode kroz nezasićenu sredinu opisano je Ričardsovom jednačinom (Richards, 1981) za nestacionarni vertikalni tok:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(w) \frac{\partial w}{\partial z} \right] + \frac{\partial k_w}{\partial z}; \quad k_w = k_w(w) \quad (1)$$

U jednačini (1) w je vlažnost zemljišta (cm^3/cm^3), t - vreme (dan); $D(w)$ -koeficijent difuzije zemljišne vlage

ili kapilarna difuzija (cm^2/s); k_w - koeficijent vodoprovodljivosti za nezasićenu sredinu.

Jednačina (1) je diferencijalna jednačina dinamike vlažnosti, čijim rešavanjem se dobijaju profili vlažnosti - krive koje pokazuju kako se menja vlažnost po dubini. Profili vlažnosti omogućavaju da se prati kretanje fronta vlažnosti kroz zemljište u toku vremena i da se odredi trenutak početka oticaja. Da bi se jednačina (1) mogla rešiti potrebno je definisati početne i granične uslove.

Početni uslov predstavlja poznati raspored vlažnosti ili kapilarnog potencijala po dubini u početnom trenutku $t=t_0$:

$$w(z, t=t_0) = w_0(z) \quad \text{za } t=t_0 \quad (2)$$

gde je: w_0 - unapred zadata funkcija od z ;
 t_0 - vreme početka simulacije;

Početni uslovi obično se odnose na neku vrstu ustaljenog stanja. U slučaju da ovi podaci nisu raspoloživi uzima se vlažnost poljskog kapaciteta kao početni uslov pri potpunom zasićenju zemljišta vodom, odnosno ravnotežni raspored pritiska po dubini.

Postoje tri tipa graničnih uslova, pomoću kojih se opisuju nezavisne interakcije sistema na gornjoj i donjoj granici strujne oblasti: Neumann-ov tip, Dirichlet-ov tip i Cauchy-jev tip [2].

Gornji granični uslovi, odnosno uslovi na međupovršini zemljište-vazduh, obično se odnose na atmosferske uslove. U ovom radu gornji granični uslovi definisani su razlikom između izračunatih prosečnih dnevnih padavina (P) i dnevnih vrednosti evapotranspiracije (ET) sa određene vrste vegetacije (Neumann-ov tip graničnog uslova):

$$q = P - ET \quad \text{za } z = 0 \quad (3)$$

Razlika između padavina i evapotranspiracije definiše potencijalni intenzitet infiltracije (f_p) na površini terena, koji je uslovljen isključivo atmosferskim prilikama. Stvarni intenzitet infiltracije (f_a) dobija se na osnovu uslova koji vladaju u zemljištu i njegove mogućnosti da primi iz atmosfere ili u nju otpusti određenu količinu vode.

U nezasićenom zemljištu potencijalni i stvarni intenzitet infiltracije su jednaki. U zasićenom zemljištu, nakon početka oticaja, potencijalni i stvarni intenzitet infiltracije se razlikuju, a njihova razlika definiše intenzitet površinskog oticaja (P_{ef}):

$$q=f_p=f_a \quad \text{za } \partial w/\partial t \neq 0 \quad (4.1)$$

$$q=f_p \neq f_a \quad \text{i } P_{ef}=f_p-f_a \quad \text{za } \partial w/\partial t=0 \quad (4.2)$$

Za proračun referentne evapotranspiracije korišćena je FAO Penman-Montejeva jednačina (Allen, 1990):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (5)$$

gde je: ET_0 -referentna evapotranspiracija biljke [mm d^{-1}], Δ -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 [$\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$], γ -psihometrijska konstanta [$\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$], U_2 -brzina vetra izmerena na visini od 2 m [ms^{-1}], $(e_s - e_a)$ -deficit saturacije na 2m visine [kPa], T -srednja dnevna temperatura vazduha na 2m visine [$^\circ\text{C}$].

Kao donji granični uslov primenjen je uslov slobodnog dreniranja. Ovaj granični uslov se zadaje kada je nivo podzemne vode dovoljno dubok i nema uticaja na raspored vlažnosti u oblasti proračuna. Pretpostavlja se da, u tom slučaju, voda nesmetano otiče u dublje slojeve.

$$\frac{\partial H_k}{\partial z} = 0.0 \Rightarrow q = k(H_k) \quad z=l \quad (6)$$

Da bi se jednačina (1) mogla rešiti, potrebno je uspostaviti povezanost između vlažnosti (w), kapilarnog potencijala (H_k) i koeficijenta vodoprovodljivosti (k_w). Uzajamna veza ovih veličina zavisi od vodno-fizičkih svojstava zemljišta. Za opisivanje ovih funkcija postoje mnogi empirijski izrazi, a u ovom radu korišćena je van Genuchten-ova jednačina (van Genuchten, 1980):

$$w(H_k) = w_r + \frac{w_s - w_r}{\left[1 + |\alpha H_k|^n\right]^m} \quad (7)$$

$$k(H_k) = k_s S_e^L \left[1 - \left(1 - S_e^m\right)^2\right] \quad (8)$$

$$m=1-1/n, n>1$$

pri čemu je:

w_r , w_s - rezidualna vlažnost i vlažnost zasićenog zemljišta respektivno; S_e - efektivni sadržaj vode ili efektivna vlažnost zemljišta; k_s -hidraulička provodljivost zasićenog zemljišta; α -koeficijent koji zavisi od količine vazduha u šuplinama zemljišta; n - indeks koji zavisi od raspoređenosti pora i šupljina u zemljištu; L -parametar koji uzima u obzir povezanost pora.

Parametri α , n i L su empirijski koeficijenti koji utiču na oblik datih hidrauličkih funkcija. Jednačine (7) i (8) sadrže ukupno pet nezavisnih parametara: w_r , w_s , α , n , k_s .

Richardsova jednačina za nezasićenu sredinu rešena je numerički primenom metode konačnih elemenata.

3. FIZIČKE KARAKTERISTIKE SMEDEG SKELETOIDNOG ZEMLJIŠTA NA ŠKRILJCIMA

Smeđe skeletoidno zemljište na škriljcima dominira na području sliva Kolubare do Valjeva. Ovo zemljište je interesantno pri analizi infiltracije i sa gledišta uslova formiranja oticaja, jer usled značajnog prisustva glinenih čestica, i usled toga što leži na skoro nepropusnim glinenim škriljcima, može da primi samo malu količinu vode dok veći deo otiče površinskim putem.

Pri analizi infiltracije i oticaja sa ovog zemljišta važno je napomenuti da je klima u ovom delu Srbije izuzetno vlažna i sa velikom količinom padavina, što je uticalo i na rezultate proračuna u ovom radu.

Na genezu smeđeg skeletoidnog zemljišta na škriljcima značajno je uticao reljef, koji je uglavnom brdovit i veoma diseciran usled velikog broja uskih i strmih dolina malih vodotoka. Smeđe skeletoidno zemljište je podložno eroziji, naročito posle krčenja šuma, a procesi su negde u toj meri intenzivirani da se pojavljuje ogoljen geološki supstrat koga u ovom slučaju čine peščari, krečnjaci i škriljci. Argilošisti, filiti i glinci lako podležu fizičkom raspadanju, zbog čega se na ovoj podlozi zemljište brzo stvara. Važna morfološka osobina gotovo svih profila smeđeg zemljišta na škriljcima je prisustvo skeleta. Odlomci škriljaca se često nalaze u dubljim slojevima, ali ih ima i u blizini površine terena. Oni ne dozvoljavaju da se zemljišna masa zbije. Ovo zemljište karakteriše velika trošnost zemljišne mase. Zemljišna masa je slabo vezana usled lakog sastava, sitnogrudvičaste ili neizražene strukture, usled odlomaka skeleta u profilu, visokog udela humusa u površinskom sloju i drugih činilaca. Usled ovoga zemljište dobro upija vodu, ali ga trošnost čini i erodibilnim, posebno u delovima gde je uklonjena zaštitna vegetacija i gde je golo zemljište izloženo direktno atmosferilijama.

Usled visokog udela sitnog peska i praha ovo zemljište ima pretežno lak sastav i dobre vazdušne osobine. Poroznost zemljišta je srednja. Upijanje vode je dobro izraženo, posebno pod šumom i travama, gde vegetacija

privremeno zadržava vodu i ona ne otiče naglo niz nagib. Ali, zadržavanje tako primljene vode nije dužeg trajanja zbog plitkoće profila i pretežno lakog mehaničkog sastava. Do površinskog oticanja naročito dolazi u proređenoj hrastovoj šumi i na njivama i pašnjacima.

U ovom radu je, kao tipičan primer smeđe skeletoidnog zemljišta na škriljcima, uzet primer ovog zemljišta u mestu Rebelj. U tabeli 1. su prikazani rezultati laboratorijskih istraživanja zemljišta ovog tipa u mestu Rebelj:

Tabela 1. Granulometrijski sastav smeđeg skeletoidnog zemljišta na škriljcima u mestu Rebelj

Horizont	Dubina (cm)	Granulometrijski sastav (%)				Hig.vlaga (%)	Tekstura
		Skelet	kr.i sit.pes.	prah	glina		
A	0-15	5	43.2	29.3	27.5	4.16	Ilovača
A-B	15-35	10	30.5	39.5	30	2.77	glinovita ilovača
(B)	35-55	20	50	20.9	29.1	2.49	peskovito-glinovita ilovača

Na osnovu reprezentativnog profila smeđeg skeletoidnog zemljišta na škriljcima, u vertikalnom preseku mogu se izdvojiti tri različita sloja u pogledu vodno-fizičkih svojstava: ilovača koja ima umereno povoljna vodno-fizička svojstva i karakteristike infiltracije, glinovita ilovača koja ima nepovoljnija vodno-fizička svojstva i nepovoljnije karakteristike infiltracije i peskovito-glinovita ilovača, koja usled značajnog udela peska može da primi velike količine vode. Geološku podlogu čine škriljci, razne veličine i stepena raspadnutosti, uglavnom glinovitog sastava, do dubine od 500 cm. Za vodu su nepropustljivi. Na dubini od 500 cm ispod površine terena nalazi se podzemna voda.

Ovo zemljište je pogodno za gajenje šuma, voćnjaka i raznih trava. Kiselo smeđe zemljište na škriljcima je obrazovano pod hrastovom i bukovom šumom. Šume su danas uglavnom potisnute sa blagih nagiba do visina od oko 800m, a zemljišta su razorena ili su prekrivena livadama, pašnjacima i voćnjacima. Upijanje vode je dobro izraženo, naročito pod šumom i travama, gde prirodna vegetacija privremeno zadržava vodu. Usled nedovoljne akumulacije vode, ova zemljišta se leti brzo isušuju.

4. MATERIJAL I METODE

Osnovni ulazni podaci koji su korišćeni za proračun infiltracije kroz elementarni deo smeđeg skeletoidnog zemljišta na škriljcima su: meteorološki podaci u toku 1990. godine (prosečne dnevne visine padavina u oblasti u kojoj je zastupljeno smeđe skeletoidno zemljište na škriljcima i meteorološki podaci potrebni za proračun evapotranspiracije (srednja dnevna temperatura vazduha, srednja relativna vlažnost vazduha, insolacija i srednja

dnevna brzina vetra)); pedološke karakteristike smeđeg skeletoidnog zemljišta na škriljcima (rezidualna vlažnost zemljišta, vlažnost zasićenja, koeficijent hidrauličke provodljivosti zasićenog zemljišta, empirijski koeficijenti koji zavise od veličine, rasporeda i povezanosti pora); karakteristike vegetacije koje se gaje ili rastu na ovoj vrsti zemljišta (proračun infiltracije urađen je za deo smeđeg skeletoidnog zemljišta na škriljcima na kome se gaje livade); 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.

Potrebni meteorološki podaci dobijeni su od Saveznog Hidrometeorološkog Zavoda (SHMZ) i odnose se na merenja u Valjevu, jer je to jedina meteorološka stanica u slivu.

Institut za zemljište izvršio je detaljno laboratorijsko istraživanje zemljišta sliva Obnice i sliva Jablanice, i rezultate istraživanja objavio je u [7]. Iz [7] dobijeni su podaci o pedološkim karakteristikama smeđeg skeletoidnog zemljišta na škriljcima, odnosno podaci o karakterističnom granulometrijskom sastavu ove vrste zemljišta kao i podaci o njegovim vodno-fizičkim svojstvima (vlažnost zasićenog zemljišta, Darsijev koeficijent filtracije). Vrednosti empirijskih koeficijenata potrebnih za definisanje vodno-fizičkih svojstava po jednačini van Genuchtena (van Genuchten, 1980) preuzeti su iz literature (Carsel i Parrish, 1988).

Podaci o karakteristikama geološke podloge na kojoj se ovo zemljište nalazi, kao i podaci o prostornoj raspoređenosti biljnih vrsta u slivu dobijeni su od Instituta za šumarstvo i drvenu industriju iz Beograda [8].

5. OBRADA ULAZNIH PODATAKA

Pri simulaciji kretanja vode kroz nezasićenu sredinu zemljišta pretpostavljeno je da su kiše padale ravnomerno i jednovremeno na ovo zemljište intenzitetom koji odgovara veličini prosečnih dnevnih padavina. Analizirano područje karakteriše velika količina padavina u toku cele godine. Pri tome 1990. god. je bila sušna godina, jer je ukupna godišnja količina padavina u njoj bila 611 mm.

U cilju proračuna stvarne evapotranspiracije sa livada koje se nalaze na smeđem skeletoidnom zemljištu na škriljcima u radu je najpre određena veličina referentne evapotranspiracije primenom FAO Penman-Montejeve jednačine (Allen, 1990). Referentna evapotranspiracija predstavlja veličinu one evapotranspiracije na osnovu koje se u postupku poređenja određuju ostale i ona se definiše kao ona količina vode koja se gubi sa zemljišta kada je ono pokriveno zelenom gustom travom, visine 8-15cm, za određeno mesto i za klimatske uslove toga mesta. Pri proračunu referentne evapotranspiracije FAO Penman-Montejeva metoda uzima u obzir, pored klimatskih, i vegetacione faktore biljke, definisane preko aerodinamičkog i površinskog otpora biljke.

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 vegetacije nisu bile poznate, pretpostavljeno je da je aerodinamički i površinski otpor jednak onim vrednostima koje važe za referentnu biljku,

a da se vrednosti evapotranspiracije sa različitih vrsta vegetacije razlikuju, prvenstveno zahvaljujući razlikama u veličini albeda sa različitih vegetacionih vrsta.

Primenom FAO Penman-Montejeve metode dobijaju se vrednosti potencijalne evapotranspiracije. Potencijalna evapotranspiracija predstavlja idealizovanu, teorijski maksimalno moguću evapotranspiraciju biljke u uslovima kada kada biljka ima sve potrebne uslove za razvoj, kako u pogledu vode, tako i u pogledu ekoloških uslova. Na osnovu poznate vrednosti albeda sa livada (0.15) određene su dnevne vrednosti potencijalne evapotranspiracije (PET) sa livada.

Stvarne vrednosti evapotranspiracije zavise od konkretnih uslova u zemljištu (stanja vlažnosti, količine raznih hranljivih materija) i one su manje ili jednake od vrednosti potencijalne evapotranspiracije. Stvarne vrednosti evapotranspiracije sa smeđeg skeletoidnog zemljišta prekrivenog livadama dobijene su na osnovu složenijeg proračuna vodnog bilansa sliva Kolubare prikazanog u [2]. Ukupna godišnja evapotranspiracija sa livada u toku 1990. godine iznosila je 49.2 cm.

Na osnovu poznatih morfoloških karakteristika i mehaničkog sastava ovog zemljišta određeni su kvantitativni pokazatelji vodno-fizičkih svojstava zemljišta: rezidualna vlažnost zemljišta, vlažnost zasićenog zemljišta, Darsijev koeficijent filtracije i empirijski koeficijenti koji zavise od vrste zemljišta. U tabeli 2. prikazane su vrednosti parametara koji u prikazanom matematičkom modelu definišu vodno-fizička svojstva ovog zemljišta.

Tabela 2. Vrednosti parametara koji definišu vodno-fizička svojstva smeđeg skeletoidnog zemljišta

tip zem.	tekstura	d (cm)	wr (-)	ws (-)	alfa (-)	n (-)	ks (cm/dan)	geološka podloga	NPV (cm od pov. zem.)	
									opaženi opseg	usv. u proračunima
SSZ	ilovača	0-15	0.078	0.499	0.036	1.56	61.34			
	glinuša	15-35	0.200	0.470	0.019	1.31	19.87			
	peskovita	35-55	0.100	0.440	0.059	1.48	3.37			
			55-600	0.200	0.430	0.019	1.31	0.02	škriljci	500-1000

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 nezasićenu sredinu smeđeg skeletoidnog zemljišta, stanje vlažnosti u zemljištu na početku 1990.god. određeno je kao rezultat atmosferskih uticaja i stanja vlažnosti zemljišta u toku prethodne 1989. godine. Na početku 1989.god. pretpostavljen je ravnotežni raspored pritiska po dubini.

Na taj način, u model je uključena određena "istorija" procesa kretanja vode na slivu.

Na ovaj način izvršena je priprema potrebnih ulaznih podataka: određene su prosečne vrednosti dnevnih padavina i potencijalne evapotranspiracije sa livada kojima je prekriveno smeđe skeletoidno zemljište na škrljicima, utvrđeni su parametri kojima se definišu vodno-fizička svojstva smeđeg skeletoidnog zemljišta na škrljicima i definisani su početni uslovi vlažnosti na početku 1990. godine. Ovi elementi su bili dovoljni da se, uz usvojene pretpostavke modela, pristupi proračunu infiltracije kroz razmatrano zemljište. Primenom Ričardsove jednačine, uz poznavanje početnih i graničnih uslova, kao i vodno-fizičkih svojstava razmatrane vrste zemljišta u potpunosti je opisano kretanje vode kroz nezasićenu sredinu zemljišta.

Simulacije vertikalnog kretanja vode kroz elementarnu zapreminu smeđeg skeletoidnog zemljišta na škrljicima urađene su primenom programskog paketa HYDRUS (van Genuchten, 1995).

Na početku proračuna infiltracije vode kroz zemljište definisani su i parametri koji se odnose na numeričku šemu (trenutak početka simulacije, trenutak kada se simulacija završava, veličina početnog vremenskog priraštaja, veličina minimalnog i maksimalnog vremenskog priraštaja, veličina i broj priraštaja po dubini). Simulacije kretanja vode kroz smeđe skeletoidno zemljište na škrljicima obuhvataju period od 1. januara (trenutak početka simulacije) do 31. decembra (trenutak završetka simulacije) 1990.god. Usvojena veličina priraštaja po dubini je 10cm.

6. REZULTATI I DISKUSIJA

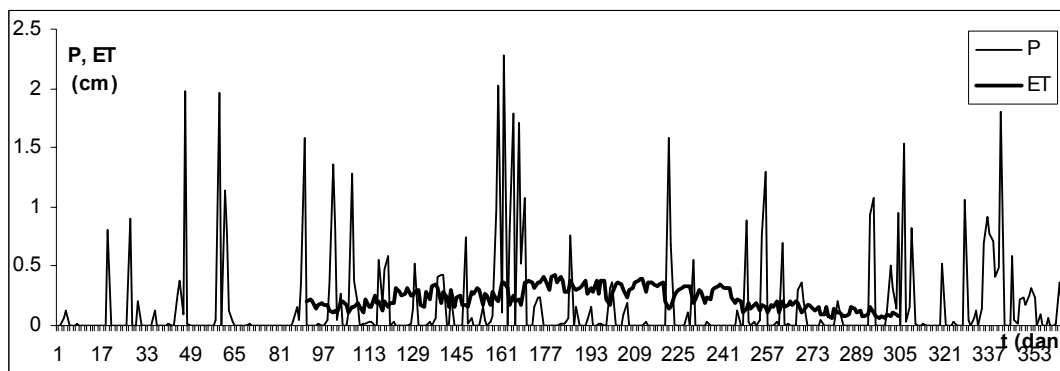
Primenom prikazanog matematičkog modela opisano je kretanje vode kroz zemljište, odnosno određeni su profili vlažnosti zemljišta i veličina infiltracije vode u zemljište. Analizom profila vlažnosti zemljišta određen je trenutak početka oticaja.

Bilansni elementi na međupovršini atmosfera - nezasićena sredina koji definišu gornji granični uslov (promene padavina i evapotranspiracije u toku godine i, na osnovu njih određene potencijalne vrednosti

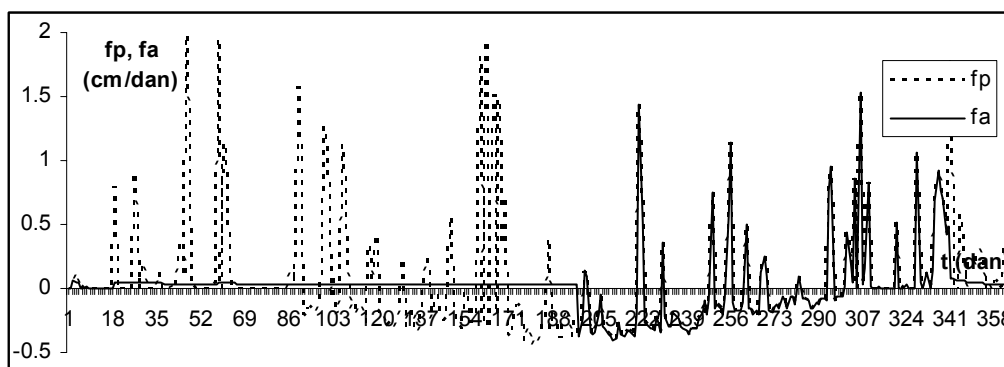
evapotranspiracije), kao i rezultati proračuna infiltracije prikazani su u tabeli (3) i na slikama 1 i 2.

Tabela 3. Elementi bilansa na granici atmosfera-nezasićena sredina (P, ET) i intenziteti potencijalne (f_p) i stvarne (f_a) infiltracije vode u zemljište.

datum (dan)	P (cm/d)	PET (cm/d)	ET (cm/d)	f_p (cm/d)	f_a (cm/d)
1.01.'90.	0	0	0	0.00	0
2.01.'90.	0	0	0	0.00	0
3.01.'90.	0.07	0	0	0.07	0.07
4.01.'90.	0.13	0	0	0.13	0.043
5.01.'90.	0	0	0	0.00	0.042
6.01.'90.	0	0	0	0.00	0
7.01.'90.	0	0	0	0.00	0
8.01.'90.	0.01	0	0	0.01	0.01
.
.
.
.
.
1.04.'90	0	0.275	0.205	-0.21	0.039
2.04.'90	0	0.289	0.216	-0.22	0.039
3.04.'90	0	0.272	0.203	-0.20	0.039
4.04.'90	0	0.189	0.141	-0.14	0.038
5.04.'90	0.02	0.223	0.166	-0.14	0.038
6.04.'90	0.01	0.259	0.193	-0.19	0.038
7.04.'90	0	0.23	0.171	-0.17	0.038
.
.
.
..
.
23.12.'90	0	0	0	0.00	0.036
24.12.'90	0.06	0	0	0.06	0.035
25.12.'90	0	0	0	0.00	0.034
26.12.'90	0	0	0	0.00	0.034
27.12.'90	0.02	0	0	0.02	0.034
28.12.'90	0.36	0	0	0.36	0.033
29.12.'90	0.17	0	0	0.17	0.034
30.12.'90	0	0	0	0.00	0.033
31.12.'90	0	0	0	0.00	0.033



Slika 1. Prosečne dnevne visine padavina (P) i procenjene "stvarne" evapotranspiracije (ET) sa livada na slivu Kolubare do v.s. "Valjevo" u toku 1990. god.



Slika 2. Potencijalni (f_p) i stvarni (f_a) intenziteti infiltracije kroz smeđe skeletoidnog zemljišta na škriljcima prekrivenog livadama u toku 1990. god.

Na slici 3 prikazane su promene prosečne dnevne vlažnosti po dubini smeđeg skeletoidnog zemljišta na škriljcima samo za nekoliko karakterističnih dana pre i nakon početka površinskog oticaja u toku 1990. god., zbog preglednosti, iako su simulacije kretanja vode kroz zemljište urađene za celu godinu [2].

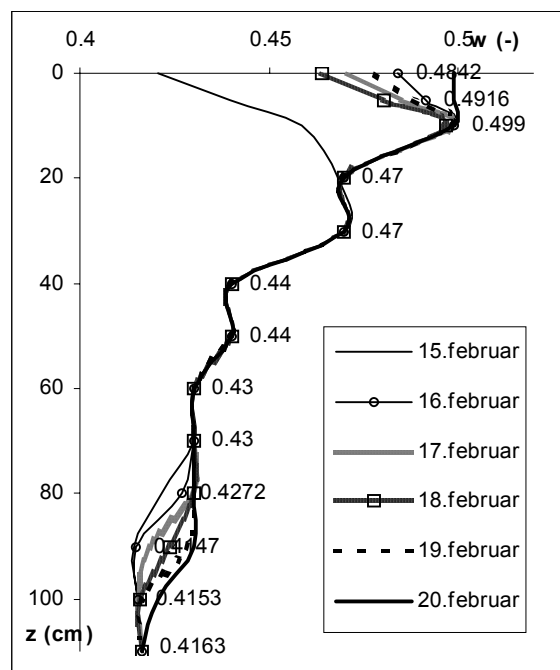
Najizrazitije promene vlažnosti po dubini zemljišta, usled pale kiše, dešavaju se u slojevima koji se nalaze bliže površini terena, dok su u dubljim slojevima zemljišta promene vlažnosti po dubini manje izražene [2]. Zato je stanje vlažnosti u zemljištu prikazano samo do dubine od 110 cm ispod površine terena, iako se podzemna voda nalazi tek na dubini od 5 m ispod površine terena.

Na osnovu slike 2 može se zaključiti da se u slučaju smeđeg 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.

Trenutak početka površinskog oticaja određen je na osnovu promene potencijalnih i stvarnih intenziteta infiltracije kroz gornju granicu nezasićene sredine i na osnovu oblika profila vlažnosti zemljišta. Na slici 3 vidi se da površinski oticaj počinje 20. februara. U trenutku početka oticaja površinski sloj zemljišta je zasićen vodom, dok dublji slojevi to nisu. U toku simulacija kretanja vode kroz smeđe skeletoidno zemljište na škriljcima uočeno je da kod ove vrste zemljišta nikada ne dolazi do zasićenja celog profila vodom, jer peskovito glinovita ilovača može da primi velike količine vode i do dubljih slojeva ne dolazi voda od padavina. U slučaju smeđeg skeletoidnog zemljišta na škriljcima presudnu ulogu na formiranje oticaja ima intenzitet kiše, jer je nivo podzemne vode na velikoj

dubini. Nakon početka oticaja stvarni intenzitet infiltracije odgovara promeni količine vode u zemljištu, koja se smanjuje, ali nikada ne postaje jednaka koeficijentu filtracije dubljih slojeva.



Slika 3. Promene prosečne dnevne vlažnosti za smeđe skeletoidno zemljište na škriljcima od 15. februara do 20. februara 1990. god.

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. Neka od ograničenja su:

- Karakteristike kretanja vode kroz zemljište prvenstveno zavise od pedoloških i geoloških karakteristika sredine, odnosno od njihovih vodno-fizičkih svojstava, ali je teško precizno kvantitativno izraziti ove faktore.

- Početna vlažnost zemljišta na početku simulacije kretanja vode kroz zemljište je veoma važan faktor koji mnogo utiče na rezultate proračuna, ali je teško precizno odrediti raspored vlažnosti zemljišta u početnom trenutku. Ovaj parametar bi se mogao preciznije definisati ukoliko bi se raspolagalo sa

desetogodišnjim dnevnim vrednostima klimatskih podataka, što nije bio slučaj u ovom radu.

- Simulacije kretanja vode kroz zemljište rađene su koristeći srednje dnevne vrednosti klimatskih podataka. Pretpostavljeno je da kiša pada ravnomernim intenzitetom u toku celog dana. Ni jedna od ove dve pretpostavke u prirodi ne postoji, ali je ovde bila nužna.

- Potrošnja vode od strane vegetacije uzeta je u obzir preko evapotranspiracije. Gubici na evapotranspiraciju se teško kvantifikuju.

- Infiltraciju vode kroz suvo zemljište je teško numerički simulirati. 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.

Rezultati simulacije predstavljaju samo korisne uopštene pokazatelje, na osnovu kojih je moguće doneti odgovarajuće upravljačke odluke.

7. ZAKLJUČAK

U radu je analizirana sposobnost smeđeg skeletoidnog zemljišta na škriljcima da upija vodu i njegovo ponašanje u odnosu na pojavu oticaja. Karakteristike kretanja vode kroz nezasićenu sredinu zemljišta zavise od atmosferskih uslova na površini terena odnosno od gornjeg graničnog uslova, od vodno-fizičkih svojstava sredine kroz koju se voda kreće, od uslova koji vladaju na donjoj granici nezasićene sredine, kao i od početnih uslova vlažnosti u zemljištu, zbog čega je ove parametre potrebno definisati pre početka simulacija kretanja vode kroz zemljište. Kretanje vode kroz nezasićenu sredinu opisano je primenom Ričardsove jednačine za nestacionarni vertikalni tok, uz poznavanje početnih i graničnih uslova, kao i veze između vlažnosti, kapilarnog potencijala i hidrauličke provodljivosti.

Smeđe skeletoidno zemljište na škriljcima spada u grupu slabo propusnih zemljišta. S obzirom na to da podloga nije propustljiva, a moć akumulacije vode je mala, najveći deo vode od padavina otiče niz nagib, što se može videti na osnovu prikazanih promena potencijalne i stvarne infiltracije u toku vremena (slika 2).

Simulacione analize kretanja vode kroz zemljište omogućavaju da se različite upravljačke akcije ljudi usmere u cilju zaštite zemljišta od erozije i sprečavanja ekološke degradacije predela.

U zavisnosti od zahtevane i potrebne tačnosti proračuna, ponekad je potrebno uraditi i neke dodatne analize i eksperimentalna merenja na terenu, na osnovu kojih bi se izvršila kalibracija nekih parametara modela. Ipak, i pored nesavršenosti prikazanog modela, on pruža sliku o infiltraciji vode kroz zemljište pod uticajem atmosferskih uticaja na površini terena i, na osnovu toga pruža određene korisne informacije za donošenje odgovarajućih upravljačkih odluka. Treba naglasiti da je proces kretanja vode u nezasićenoj sredini jako složen i da su u cilju njegovog rešavanja učinjeni samo prvi koraci. Jedan od takvih koraka je i korišćenje Ričardsove jednačine za opisivanje kretanja vode kroz nezasićenu sredinu.

LITERATURA

- [1] Allen, R.G., Smith, M., Pereira, L.S., Perrier (1990) A., *An Update for the Calculation of Reference Evapotranspiration*. FAO, Rome.
- [2] Avakumović, V. (2000), *Analiza kretanja vode na površini i u zemljištu*, magistarska teza, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 203
- [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. J.Wiley and Sons Ltd. 493
- [5] Green, W.H. and Ampt, G.A.(1911) Studies on soil physics I.The flow of air and water through soils. *J.Agric. Sci.* 4; 1-24
- [6] Holtan, H.N.(1961). A concept for infiltration estimates in watershed engineering . *ARS paper* 41-51.
- [7] Institut za zemljište, *Pedološki pokrivač zapadne i severozapadne Srbije*, Beograd
- [8] Institut za zemljište, *Zemljišta brdsko-planinskog područja sliva Jablanice (Valjevo) i predlog budućeg načina rešavanja*, Beograd.
- [9] Richards, L.A., 1981. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics*, 1: 318-333.
- [10] Rode, A.A.(1965). Theory of soil moisture. Vol.1. Published for U.S.D.A. and N.S.F.by the Israel Programfor Scientific Translation. Jerusalem. (1969)
- [11] Van Genuchten, M.Th.(1980) *A closed-form equation for predicting the hydraulicconductivity of unsaturated soils*, *Soil Sci.Soc.Am. J.*,44,892-898.
- [12] 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

THE CALCULATION OF WATER INFILTRATION IN UNSATURATED SOIL

by

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

Summary

This study is about the modeling of a process of water infiltration applying the Richards' equation for one dimensional, vertical water flow. By application of the Richards' equation the most realistic prediction of infiltration values can be obtained, as this equation takes care of the physical laws affecting the process of infiltration. The model of infiltration which was applied in this study introduces parameters of physical characteristics of the process that are measurable. Because successful simulations of runoff largely depend

on an accurate prediction of the volume of infiltration, the conditions for forming of surface runoff were analyzed by applying this model. The validity of the model is documented with the evidence obtained from the results of an analysis carried out on the brown skeletal soil on schist, at Rebelj, near the town of Valjevo.

Key words: Richards' equation, unsaturated media, infiltration, soil moisture profiles, runoff

Redigovano 07.12.2005.