

## MODELIRANJE PROCESA PADAVINE-OTICAJ NA PODSLIVOVIMA SLIVA DRINE METODOM SWAT

Zoran SIMIĆ<sup>1</sup>, Stevan PROHASKA<sup>2</sup>, Nikola MILIVOJEVIĆ<sup>3</sup>, Aleksandra ORLIĆ<sup>1</sup>

1. Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi"
2. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
3. Mašinski fakultet, Kragujevac

### REZIME

U radu je prikazana struktura modela SWAT koji se koristi za modeliranje procesa "padavine-oticaaj". Model SWAT je hidrodinamički i fizički zasnovan model. Ulaz u model su radijacija na granici atmosfere, temperatura vazduha, padavine i visina snežnog pokrivača. Računa sve procese važne za kretanje vode: akumulisanje i topljenje snega, potencijalnu i stvarnu evapotranspiraciju, padavine koje dospevaju na tlo, perkolaciju, kao i bazni i površinski oticaj. Osnovna jedinica za modeliranje je elementarna površina u mreži pravougaonika (grid), čija mera diskretizacije zavisi od željene tačnosti, kao i tačnosti podatka. Ukupan oticaj na izlaznom profilu sliva dobija se konvolucijom sumarnog oticaja (površinskog i baznog).

Ilustracija rada modela SWAT biće prikazana na jednom fiktivnom slivu površine oko 300km<sup>2</sup>.

**Ključne reči:** padavine, oticaj, HRU

### 1. UVODNE NAPOMENE

Fizički procesi padavine-oticaaj predstavljaju veoma složene procese u prirodi, i zbog toga je njihovo modeliranje veoma kompleksno. Model SWAT je hidrodinamički i fizički zasnovan model. Za funkcionisanje ovog modela potreban je veći broj ulaznih podataka: meteorološki, topografski, pedološki, podaci o biljnom pokrivaču, korišćenju zemljišta... Svi procesi povezani sa kretanjem vode, rastinjem, direktno se modeliraju pomoću SWAT-a. Model SWAT omogućuje simulaciju više fizičkih procesa. Sliv se deli na konačan broj pravougaonika (ili kvadrata u spec.slučaju). Ova mreža pravougaonika (grid) je osnovna jedinica za modeliranje. Mera diskretizacije zavisi od željene tačnosti, kao i od tačnosti ulaznih podataka. Svako pojedino polje mreže pravougaonika se zove HRU – *Hidrologic responce units* (Hidrološka elementarna jedinica). Pretpostavka je da su sve ulazne

veliçine modela na nivou HRU-a homogene, odnosno kvazihomogene.

Model je nastajao početkom 90-tih godina. Tvorac modela SWAT je Dr. Jeff Arnold sa Univerziteta USDA (Texas,USA). Preteçe ovog modela su modeli: SWRRB (Simulator for Water Resources in RuralBasins) (Williams et al., 1985; Arnold et al., 1990) i ROTO (Routing Outputs to Outlet) (Arnold et al., 1995). U razvoju originalnog interfejsa i programerskog okruženja korišćen je Visual Basic, GRASS i ArcView.

### 2. OSNOVNE POSTAVKE PRORAČUNA

Prvo se određuju klimatski ulazi: nepromenljivi (radijacija na granici atmosfere i razne vremenske konstante) i promenljivi (temperature, padavine,...) u vremenu i prostoru, jer oni definišu vlažnost i energiju za ostale procese koji se simuliraju na slivu. Za svaki HRU se generišu (GIS tehnologijom) referentne kote, određuju se površine i sav ostali potreban sadržaj za modeliranje. Zatim se za svaki HRU računaju srednje padavine, temperature i visine snega:

#### a) srednje padavine

$$R_{band} = R + (EL_{band} - EL_{gage}) \cdot \frac{P_{laps}}{1000}$$

gde su:

R - padavine (mm)

T - temperature (°C)

hs - visina snega (mm)

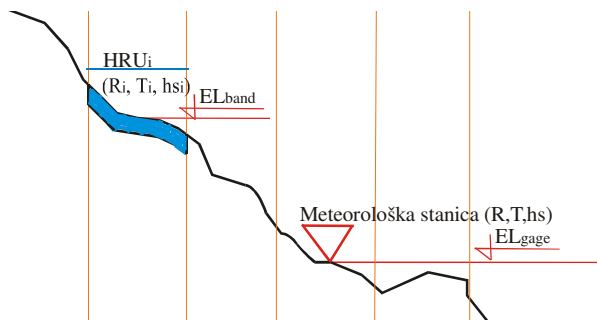
EL – nadmorska visina (mnm) ,

band – srednja visina posmatranog HRU-a,

gage – visina gde su zabeležene padavine ( na meteorološkoj stanici)

P<sub>laps</sub> – gradijent padavina (mm/km), ovo je mera povećavanja padavina sa povećavanjem nadmorske visine

Proračun referentnih veličina za svaki HRU korišćenjem gornje formule se radi zato što se kod terena u nagibu meteorološke veličine menjaju sa promenom nadmorske visine.



Slika 1. Ilustracija terena u nagibu

### b) srednje temperature

$$T_x = T_x + (EL_{band} - EL_{gage}) \cdot \frac{t_{laps}}{1000}$$

gde su:

x – min, max i srednja temperatura vazduha

band – srednja visina posmatranog HRU-a

gage – visina gde su zabeležene padavine (na meteorološkoj stanici)

t<sub>laps</sub> – gradijent smanjivanja temperatura sa porastom nadmorske visine (°C/km)

### c) visina snega

$$h_{s\ band} = h_s + (EL_{band} - EL_{gage}) \cdot \frac{h_{s\ laps}}{1000}$$

gde su:

h<sub>s</sub> - visina snega (mm)

EL – nadmorska visina (m),

band – srednja visina posmatranog HRU-a

gage – visina gde su zabeležene padavine (na meteorološkoj stanici)

h<sub>slaps</sub> – gradijent visine snega (mm/km), ovo je mera povećavanja visine snega sa povećavanjem nadmorske visine

Hidrološki ciklus u okviru jednog HRU-a koji se simulira ovim modelom, definisan je bilansnom jednačinom:

$$SW_i = SW_{i-1} + (R_{day} + SNO_{melt}) - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}$$

gde su:

SW<sub>i</sub> – sadržaj vode u tlu u vremenskom trenutku t<sub>i</sub> (mm)

SW<sub>i-1</sub> – sadržaj vode u tlu u vremenskom trenutku t<sub>i-1</sub> (mm)

R<sub>day</sub> – količina padavina u periodu diskretizacije i (mm) (kada je srednja temperatura vremenskog koraka veća od Ts-r) koja je dospela do tla. Jedan deo ovih padavina se zadržava na vegetaciji i nikada ne dospeva do tla.

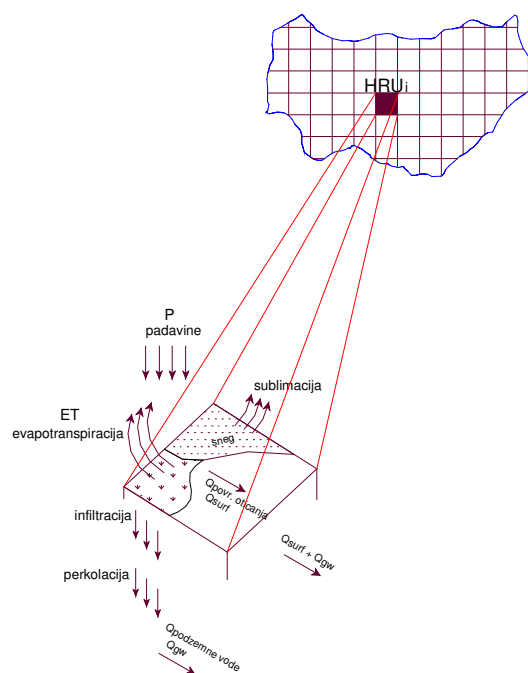
SNO<sub>melt</sub> – topljenje snega

Q<sub>surf</sub> – količina površinskog oticaja (mm)

E<sub>a</sub> – stvarna evapotranspiracija (mm)

w<sub>seep</sub> – filtracija (mm)

Q<sub>gw</sub> – bazni oticaj (mm)



Slika 2. Bilansna šema modela SWAT

## 3. PRORAČUN KARAKTERISTIČNIH JEDNAČINA BILANSA U OKVIRU JEDNOG HRU-A

### 3.1. Proračun akumulisanja i topljenja snega

#### a) Slučaj kada postoje merene visine snega

Proces topljenja snega se modelira za svaki HRU pojedinačno tako što se odredi referentna kota za svaki HRU i za tako određenu nadmorsku visinu i površinu HRU-a u svakom vremenskom koraku računa da li postoji i koliko iznosi topljenje snega. Visina otopljenog snega u svakom vremenskom koraku se računa prema sledećoj formuli:

$$SNO_{melt} = b_{melt} \cdot sno_{cov} \left[ \frac{T_{snow} + T_{max}}{2} - T_{melt} \right]$$

gde su:

- $SNO_{melt}$  – vodeni ekvivalent od topljenja snega (mm)  
 $b_{melt}$  – stepen-dan, faktor topljenja snega (mm/dan °C)  
 $T_{melt}$  – bazna (reperna) temperatura za topljenje snega (bliska je ili jednaka nuli)  
 $T_{max}$  – maksimalna vrednost temperature zabeležena u periodu diskretizacije  
 $T_{snow}$  – temperatura snega

$$T_{snow(dn)} = T_{snow(dn-1)} \cdot (1 - l_{sno}) + \overline{T_{dn}} \cdot l_{sno}$$

gde su:

- $l_{sno}$  – uticaj temperatura snega prethodnih dana  
 $sno_{cov}$  – procenat pokrivenosti HRU-a snegom  
 $\overline{T_{dn}}$  – srednje dnevne temperature

### b) Slučaj kada ne postoje merene visine snega

Ako ne postoje merene visine snežnog pokrivača model SWAT razdvaja padavine na kišu i sneg u zavisnosti od granične temperature  $T_{s-r}$ . Ova granična temperatura ne mora da bude po automatizmu jednaka nultom podeoku Celzijusove skale, ali obično jeste jednaka ili je veoma bliska njoj ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Proces topljenja snega se modelira za svaki HRU pojedinačno tako što se odredi referentna kota za svaki HRU i za tu nadmorsku visinu i površinu HRU-a se u svakom vremenskom trenutku računa vodeni sadržaj snežnog pokrivača:

$$SNO^i = SNO^{i-1} + R^i - SNO_{melt}^{i-1} - E_{sub}^{i-1}$$

gde je:

- $SNO$  – vodeni ekvivalent visine snega (mm)  
 $SNO_{melt}$  – vodeni ekvivalent od topljenja snega (mm)  
 Visina otopljenjeg snega se računa sledećom formulom:

$$SNO_{melt} = b_{melt} \cdot sno_{cov} \left[ \frac{T_{snow} + T_{max}}{2} - T_{melt} \right]$$

gde su:

- $b_{melt}$  – stepen-dan, faktor topljenja snega (mm/dan °C)  
 $T_{melt}$  – bazna (reperna) temperatura za topljenje snega (bliska je ili jednaka nuli)  
 $T_{max}$  – maksimalna vrednost temperature zabeležena u periodu diskretizacije  
 $R$  – padavine kada je temperatura vazduha manja od  $T_{s-r}$  (mm)  
 $T_{s-r}$  – bazna temperatura za početak formiranja snežnog pokrivača  
 $T_{snow}$  – temperatura snega

$$T_{snow(dn)} = T_{snow(dn-1)} \cdot (1 - l_{sno}) + \overline{T_{dn}} \cdot l_{sno}$$

gde su:

- $l_{sno}$  – uticaj temperatura snega prethodnih dana  
 $E_{sub}$  – sublimacija vode iz čvrstog stanja (sneg) u gasovito stanje, računa se samo kada je  $T > T_{melt}$   
 $\overline{T_{dn}}$  – srednje dnevne temperature

$$E_{sub} = \frac{E_s}{1 + cov_{sol}}$$

$cov_{sol}$  – pokrivenost zemljišta (za visinu snega  $> 0.5\text{mm}$ ,  $cov_{sol} = 0.5$ )

$E_s$  – max sublimacija (zemljišna evaporacija)

$$E_s = E_o' \cdot cov_{sol}$$

Potencijalna evapotranspiracija u skladu sa slobodnom vodom na biljkama:

$$E_o' = E_o - E_{can} \quad , \text{ ako je } E_o > E_{can}$$

$$E_o' = E_o \quad , \text{ ako je } E_o < E_{can}$$

gde su:

- $E_o$  – potencijalna evapotranspiracija  
 $E_{can} = R_{INT}$  – količina slobodne vode na biljkama  
 $sno_{cov}$  – procenat pokrivenosti HRU-a snegom

### 3.2. Proračun površinskog oticaja

Model SWAT koristi SCS CN model za proračun vrednosti površinskog oticaja. U zavisnosti od stanja zemljišne vlažnosti površinsko oticanje postoji ili ne postoji:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} + SNO_{mlt})^2}{R_{day} + SNO_{mlt} + S} \quad , \text{ ako je } SW^i > 0.2S = I_a$$

$$Q_{surf} = 0 \quad , \text{ ako je } SW^i < 0.2S = I_a$$

gde su:

- $I_a = 0.2S$  – inicijalni uslov za površinski oticaj  
 $R_{day}$  – padavine koje dospevaju do tla  
 $S$  – retenzioni parametar koji se računa korišćenjem sledeće jednačine:

$$S = 25.4 \cdot \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

gde je:

$CN = f$  (klasa zemljišta (A, B, C ili D); vegetacija; način obrade zemljišta; korišćenje zemljišta)

### 3.3 Proračun evapotranspiracije (ET)

U zavisnosti od raspoloživih podataka SWAT nudi jedan od tri načina za proračun  $E_p$  (potencijalne ET):

- Hargreaves (ako su poznate srednje, min i max temperature)
- Penman – Montheit (ako su poznate solarna radijacija, temperatura vazduha, vlažnost vazduha i brzina vetra)
- Priestly –Taylor (ako su poznate solarna radijacija, temperatura vazduha i vlažnost vazduha)

#### a) Proračun evapotranspiracije Hargreaves metodom

Za proračun potencijalne evapotranspiracije najjednostavnija metoda je Hargreaves (za ovu metodu potrebno je znati samo srednje, min. i max. temperature vazduha).

$$\lambda \cdot E_o = 0.0023 \cdot H_o \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \cdot (\bar{T} + 17.8)$$

gde su:

$$\lambda = 2.501 - 2.361 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{T}$$

$\lambda$  - latentna toplota isparavanja

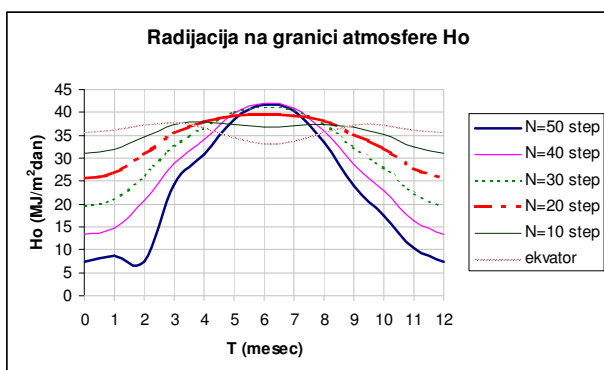
$T_{\min}$  - minimalna temperatura određenog HRU-a u periodu simulacije

$T_{\max}$  - maksimalna temperatura određenog HRU-a u periodu simulacije

$\bar{T}$  - referentna temperatura određenog HRU-a u i-tom koraku

$H_o$  - radijacija na granici atmosfere ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dan}$ )

$H_o$  zavisi od dana u godini i geografske širine i to je prikazano na slici 3:



Slika 3. Radijacija na granici atmosfere  $H_o$

#### b) Proračun evapotranspiracije metodom Penman – Montheit

Osnovna jednačina ove metode iz koje se izračunava potencijalna evapotranspiracija je:

$$\lambda \cdot E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p [e^0 - e] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)}$$

gde su:

$G$  - fluks toplote u podlozi (SWAT pretpostavlja da je uvek jednak nuli) ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\Delta$  - promena maksimalnog napona vodene pare u funkciji temperature

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e^0}{(\bar{T}_{av} + 237.3)^2}$$

$\bar{T}_{av}$  - srednja temperatura za period diskretizacije

$e^0$  - saturisani napon vodene pare u datom danu (kPa)

$e$  - stvarni napon vodene pare u datom danu (kPa)

$\rho_{air}$  - gustina vazduha ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c_p$  - specifična toplota vazduha pri konstantnom pritisku ( $1.013 \cdot 10^{-3}$ )

$\lambda$  - latentna toplota isparavanja

$$\lambda = 2.501 - 2.361 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{T}_{av}$$

$\gamma$  - psihrometrijska konstanta

$$\gamma = \frac{c_p \cdot P}{0.622 \cdot \lambda}$$

$P$  - atmosferski pritisak (kPa), može da se računa prema sledećoj jednačini:

$$P = 101.3 - 0.01152 \cdot EL + 0.544 \cdot 10^{-6} \cdot EL^2$$

gde su:

$EL$  - nadmorska visina (mnm)

$r_a$  - aerodinamički otpor za osetnu toplotu (vodenu paru) u sloju do visine  $h=2\text{m}$  na kojoj se mere meteorološki parametri (s/m)

$$r_a = \frac{\ln[(z_w - d) / z_{om}] \cdot \ln[(z_p - d) / z_{ov}]}{k^2 \cdot u_z}$$

$u_z$  - brzina vetra (m/s)

$$z_{ov} = 0.1 z_{om}$$

$$z_{om} = 0.123 h_c \quad (h_c < 200 \text{cm});$$

$$z_{om} = 0.058 h_c^{1.19} \quad (h_c > 200 \text{cm})$$

$$d = 2/3 \cdot (h_c)$$

$h_c$  - visina biljnog pokrivača (ulazni podatak) (cm)

$z_p$ ;  $z_w$  – visine na kojima se mere temperatura i vlažnost vazduha

$k$  – Karmanova konstanta (0.36-0.43).

(Preporuka SWAT-a za ovu konstantu je:  $k=0,41$ )

$r_c$  – površinski otpor biljnog pokrivača (ova veličina zavisi od vrste biljke)

$$H_{net} = (1 - \alpha) \cdot H_{day} + H_b$$

$H_{net}$  – dnevna neto radijacija (MJ/m<sup>2</sup>sat)

$\alpha$  – albedo

$H_{day}$  – kratkotalasna radijacija (MJ/m<sup>2</sup>sat)

$H_b$  – neto dolazeća dugotalasna radijacija (MJ/m<sup>2</sup>sat)

$$H_{day} = (0.25 + 0.5 \cdot n / N) \cdot H_0 \quad (\text{MJ/m}^2\text{sat})$$

$H_0$  – radijacija na granici atmosfere

$n_{dan}$  – dan u godini za koji se radi proračun (1. januar je prvi dan, 2. januar - drugi itd.)

$n$  – insolacija (vrednosti koje su zabeležene na meteorološkoj stanici)

$N$  – potencijalno trajanje sunčevog sjaja (max insolacija)

$$N = 24 / \pi \cdot \omega \quad (\text{h/dan})$$

$\omega$  – ugao zalaska sunca

$$\omega = \arccos(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (\text{rad})$$

$\varphi$  – geografska širina na kojoj se nalazi stanica

$$\delta = 0.4093 \cdot \sin((2 \cdot \pi / 365) \cdot n_{dan} - 1.39)$$

$\delta$  – solarna deklinacija (rad)

$$H_b = 4.9 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{1}{2} \cdot (0.9 \cdot \frac{n}{N} + 0.1) \cdot (0.34 - 0.139 \cdot \sqrt{e_d}) \cdot \{(T_{min} + 273.16)^4 + (T_{max} + 273.16)^4\}$$

$T_{min}$  – minimalna temperatura (°C)

$T_{max}$  – maksimalna temperatura (°C)

$$e_d = \frac{RH(\%)}{\frac{50}{e_a(T_{min})} + \frac{50}{e_a(T_{max})}}$$

$e_d$  – napon vodene pare (kPa)

$RH$  – vlažnost vazduha (%)

gde su:

$$e_a(T_{min}) = 0,611 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T_{min}}{237,3 + T_{min}}\right)}$$

$$e_a(T_{max}) = 0,611 \cdot e^{\left(\frac{17,27 \cdot T_{max}}{237,3 + T_{max}}\right)}$$

### c) Proračun evapotranspiracije metodom Priestley & Taylor

Priestley & Taylor su razvili uprošćenu verziju prethodne metode koja se koristi kada je površina zemljišta mokra (vlažna). U osnovnoj jednačini nema aerodinamičke komponente, a energetska komponenta se množi koeficijentom  $\alpha_{pet}$ . Metoda je vrlo slična prethodno opisanoj metodi, tačnije postoji razlika samo u osnovnoj formuli koja definiše potencijalnu evapotranspiraciju:

$$\lambda \cdot E_o = \alpha_{pet} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (H_{net} - G)$$

Ostale veličine u ovoj metodi se računaju isto kao u metodi Penman – Monteith.

### 3.4. Proračun padavina koje dospevaju do tla

Padavine koje se beleže na padavinskim stanicama ( $R_{day}$ ) ne stižu u potpunosti do tla ako postoji vegetacija, odnosno jedan deo tih padavina se zadržava na lišću i deblima drveća. Deo tih padavina ispari, a deo koriste biljke u svom razvoju.

Količina slobodne vode na biljkama se računa prema sledećim relacijama:

$$R_{int}^i = R_{int}^{i-1} + R'_{day} - E_a^{i-1} \quad \text{kada je: } R_{day} = 0 \quad \text{i} \\ R_{day} \leq can_{day} - R_{int}^{i-1}$$

$$R_{int}^i = can_{day} \quad \text{kada je: } R_{day} = R'_{day} - (can_{day} - R_{int}^{i-1}) - E_a^{i-1} \\ R'_{day} > can_{day} - R_{int}^{i-1}$$

gde su:

$R_{day}'$  – padavine pre nego što lišće biljaka zadrži vodu (mm)

$R_{day}$  – padavine nakon što lišće biljaka zadrži vodu (mm)

$E_a$  – stvarna evapotranspiracija (mm)

Uvodi se sledeći logičan uslov:

$$R_{int} \leq can_{day}$$

Ovaj uslov obezbeđuje da količina slobodne vode na biljkama nikako ne bude veća od maksimalne količine vode koja se može zadržati na biljkama u posmatranom danu.

U procesu evapotranspiracije učestvuje canopy storage: deo vode koji se zadržava na biljkama i koji može značajno da utiče na infiltraciju, površinski oticaj, i evapotranspiraciju.

Canopy storage dnevno varira i funkcija je površine lista biljke. Kad pada kiša, u predelima sa gustom

vegetacijom, prvo se zadovolji canopy storage pa tek onda voda može doći do tla.

$$can_{day} = can_{max} \cdot \frac{LAI}{LAI_{max}}$$

gde su:

$can_{day}$  – max. količina vode koja se može zadržati na biljkama u posmatranom danu

$can_{max}$  – max. količina vode koja se može zadržati na biljkama u punom razvoju

LAI – ukupna površina zelenih listova po površini tla u posmatranom danu ( $m^2/m^2$ )

$LAI_{max}$  – površina zelenih listova po površini tla u danu u godini kada je to maksimalna vrednost ( $m^2/m^2$ )

LAI i  $LAI_{max}$  se daju tablično, u bazi podataka (GIS sadržaj) za svaku biljnu vrstu posebno.

### 3.5. Stvarna evapotranspiracija

Kada se izračuna potencijalna evapotranspiracija i količina vode koja se zadržava na biljkama može da se izračuna i stvarna (aktuelna) evapotranspiracija:

$$E_a = E_0 \quad \text{ako je} \quad E_0 < R_{int}$$

$$E_a = E_0 \quad \text{ako je} \quad R_{int} = 0$$

$$E_a = R_{int} \quad \text{ako je} \quad E_0 > R_{int}$$

### 3.6. Prodiranje vode u dublje slojeve zemljišta (perkolacija)

Deo vode na HRU-u prodire u dublje slojeve zemljišta. Brzina prodora vode u dublje slojeve zemljišta zavisi od veličine pora tla, strukture tla, gustine frakcija tla, vlažnosti zemljišta i drugih parametara.

Prodiranje vode u dublje slojeve (perkolacija) se računa na sledeći način:

$$w_{seep} = SW_{excess} \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right\}$$

gde je:

$SW_{excess}$  – voda koja se drenira

$$\boxed{SW_{excess} = SW - FC; \quad SW > FC}$$

$$\boxed{SW_{excess} = 0; \quad SW < FC}$$

FC – sadržaj vode u profilu tla - poljski kapacitet (mm)

SW – sadržaj vode u profilu tla (mm)

$$FC = WP + AWC$$

WP – sadržaj vode u zemljištu pri tački venuća (mm)

$$WP = 0.4 \cdot \frac{m_c \cdot \rho_b}{100}$$

$\rho_b$  – specifična težina ( $kg/m^3$ )

$m_c$  – procenat sadržaja gline

AWC – mogući vodeni kapacitet zemljišta (ova veličina je input korisnika)

$TT_{perc}$  – vreme putovanja za perkolaciju

$$TT_{perc} = \frac{SAT - FC}{k_{sat}}$$

SAT – sadržaj vode u potpuno zasićenom zemljištu (mm)

$k_{sat}$  – hidraulička provodnost u zasićenom zemljištu (mm/h)

$\Delta t$  – vremenski korak

Vreme putovanja za perkolaciju je jedinstveno za svaki sloj i zavisi od količine vode u sloju tla kada je ono potpuno zasićeno i sadržaja vode u sloju tla.

### 3.7. Proračun baznog oticaja

Bazni oticaj je deo ukupnog oticaja sa sliva koji se javlja nezavisno od epizoda kiša ili topljenja snega. U zavisnosti od retenzione sposobnosti podzemlja sliva, ovaj oticaj može biti manji ili veći, ali je za podslivove na slivu reke Drine on značajno manji od površinskog oticaja, i zbog toga je formula za njegov proračun relativno jednostavna, iako je jasno da je to u prirodi složenije.

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot k_{sat}}{L_{gw}^2} \cdot h_{wtbl} \quad (\text{mm})$$

$k_{sat}$  – hidraulička provodnost u zasićenom zemljištu (mm/h)

$h_{wtbl}$  – visina sloja podzemne vode (m)

$L_{gw}$  – dužina putovanja podzemne vode do izlaznog profila

## 4. UKUPAN OTICAJ SA SLIVA

Pod polaznim uslovom da na jednom slivu ima k HRU-ova, izlazni oticaj sa sliva je zbir površinskog i baznog oticaja po svim HRU-ovima u posmatranom vremenskom koraku j.

$$Q_j = \sum_{i=1}^k Q_{surf}^i + Q_{gw}^i$$

Model SWAT daje dve komponente izlaznog oticaja:  $Q_{surf}$  i  $Q_{gw}$ . Kod prve komponente dolazi do kašnjenja oticaja od nastanka do dolaska u izlazni profil. Kod druge komponente uvedena je pretpostavka da je bazni oticaj konstantan, pa samim tim i nema kašnjenja istog.

#### 4.1. Proračun proticaja na izlaznom profilu sliva

Površinski oticaj  $Q_{surf}$  putuje izvesno vreme pre nego što stigne do izlaznog profila. To je posledica tečenja po površini slivnog područja i kanalskog tečenja. Površinski oticaji sa svih HRU-ova se superponiraju na izlaznom profilu. Vreme potrebno da oticaj od HRU-a stigne do izlaznog profila zove se vreme doticanja (putovanja). Svaki pojedinačan HRU ima svoje vreme doticanja:

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch}$$

gde su:

$t_{ov}$  – vreme putovanja površinskog oticaja

$t_{ch}$  - vreme putovanja kanalskog oticaja

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0.6} \cdot n^{0.6}}{18 \cdot slp^{0.3}}$$

$L_{slp}$  - dužina putovanja vode po slivu (m)

$n$  – Manningov koeficijent za tečenje po padinama sliva

$slp$  – prosečan nagib podsliva (m/m)

$$t_{ch} = \frac{0.62 \cdot L \cdot n^{0.75}}{Area^{0.125} \cdot slp_{ch}^{0.375}}$$

$L$  - dužina kanalskog tečenja (km)

$n_{ch}$  – Manningov koeficijent za tečenje u vodotoku (kanalu, reci)

$Area$  – površina HRU-a (km<sup>2</sup>)

$slp_{ch}$  – nagib kanala (m/m)

Za proračun površinskog oticaja na jednom HRU-u koristi se sledeća jednačina:

$$Q_{surf} = (Q_{surf} + Q_{stor,i-1}) \left(1 - \exp\left(-\frac{sur_{lag}}{t_{conc}}\right)\right)$$

$Q_{surf}$  – površinski oticaj

$Q_{stor,i-1}$  - površinski oticaj iz prethodnog vremenskog trenutka koji još putuje

$sur_{lag}$  – koeficijent kašnjenja površinskog oticaja

#### 4.2. Potrebni podaci za funkcionisanje modela SWAT

##### a) Podaci neophodni za proračun vremena koncentracije su :

$L_{slp}$  - dužina putovanja vode po slivu (m)

$n$  – Manningov koeficijent (m<sup>-1/3</sup>s)

$slp$  – prosečan nagib podsliva (m/m)

$L$  - dužina kanalskog tečenja (km)

$n_{ch}$  – Manningov koeficijent (m<sup>-1/3</sup>s)

$Area$  – površina HRU -a (km<sup>2</sup>)

$slp_{ch}$  – nagib kanala (m/m)

$sur_{lag}$  – koeficijent kašnjenja površinskog oticaja

##### b) Potrebni ulazni podaci svakog HRU-a za rad modela SWAT:

$A_i$  – površina svakog HRU-a (imaju iste površine, osim graničnih) (km<sup>2</sup>)

$z_i$  - referentne kote svakog HRU-a (mmm)

CN - broj za svaki HRU (do njega se dolazi preko sledećih podataka):

- klasa zemljišta (A,B,C,D)
- vegetacija (šume, pašnjaci, livade, njive...)
- način obrade zemljišta
- način korišćenja zemljišta

SWo – očetni sadržaj vlage u zemljištu (mm)

SAT - sadržaj vode u potpuno zasićenom zemljištu (mm)

$k_{sat}$  – hidraulička provodnost u zasićenom zemljištu (mm/h)

AWC – potreban sadržaj vode u zemljištu (mm)

$h_{wtbl}$  – dubina sloja podzemne vode (m)

$L_{gw}$  – dužina putovanja podzemne vode (m)

$sno_{cov}$  - procenat pokrivenosti HRU-a snegom

$\rho_b$  – specifična težina (kg/m<sup>3</sup>)

$m_c$  - procenat sadržaja gline

LAI – ukupna površina zelenih listova po površini tla u posmatranom danu (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)

LAI<sub>max</sub> – površina zelenih listova po površini tla u danu u godini kada je to maksimalna vrednost (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)

can<sub>max</sub> - maksimalna količina vode biljaka u punom razvoju

#### 5. MOGUĆNOSTI PRIMENE MODELA SWAT NA SLIVU REKE DRINE

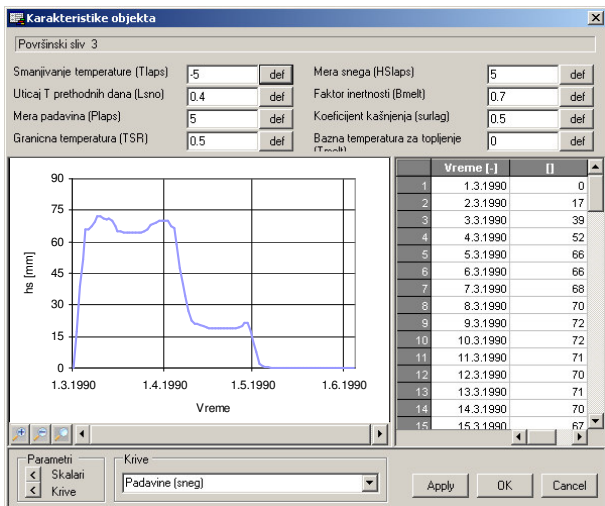
Sliv Drine sa oko 19 570 km<sup>2</sup> je velike površine i u Simulacionom modelu Drina je podeljen na veliki broj podslivova manje površine. Model SWAT se zasniva na primeni GIS tehnologije i velikom broju podataka koji opisuju sliv i zbog toga je za njegovu primenu bilo neophodno pripremiti sve to za ceo sliv reke Drine. Tu spadaju svi ulazni podaci koji su nabrojani u prethodnom poglavlju. Bitan GIS sadržaj baze podataka neophodan za rad modela je: DEM (digitalizovana karta terena), karta vegetacionog sadržaja, pedološka karta, geološka karta i hidrogeološka karta. Model SWAT je teoretski i softverski razrađen i kao takav je primenljiv na slivu reke Drine.

### 6. ILUSTRACIJA RADA MODELA SWAT

Originalno je model razvijen za dnevni period diskretizacije ali se ravnopravno može koristiti i za neki drugi nivo diskretizacije (npr. časovni). U nastavku su prikazane ilustracije korišćenja modela SWAT na dnevnom nivou diskretizacije za jedan fiktivan podsliv reda veličine 300 km<sup>2</sup>.

Ulazne parametre unosi korisnik, ili se generišu GIS tehnologijom, a korisniku je onda ostavljeno da vrši određene korekcije. Ulazni meteorološki podaci se uzimaju iz baze podataka i vrši se njihovo popunjavanje, ukoliko postoje praznine u arhiviranim podacima. Maske programa u kojima se vidi prikaz nekih ulaznih podataka modela se daju u nastavku.

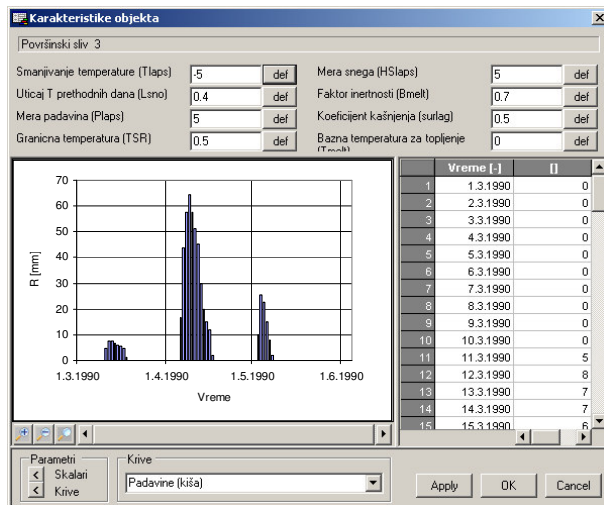
Bitna ulazna komponenta koju model SWAT uzima u obzir je visina snežnog pokrivača:



Slika 4. Podaci iz baze podataka: visine snega

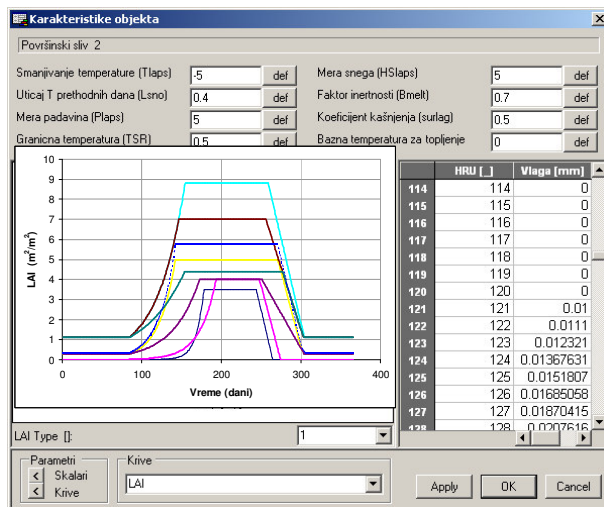
Padavine (kiša) predstavljaju najvažniju ulaznu merenu veličinu. Model SWAT po unapred definisanom kriterijumu uzima vrednosti padavina sa određene meteorološke stanice i te vrednosti koriguje, odnosno prilagođava svakom pojedinačnom HRU-u. Prikaz padavina u ovoj ilustraciji je dat na slici 5.

Za rad modela SWAT neophodni su brojni ulazni parametri, koji imaju svoje fizičko značenje, pa je zbog toga ovo model tkz. "zelene kutije". U prethodnom poglavlju su nabrojani svi ulazni parametri pa se zbog njihove brojnosti sada daje samo nekoliko ilustracija ulaznih parametara.



Slika 5. Podaci iz baze podataka: zabeležene visine kiše

Ovde se može videti prikaz vrednosti ukupne površine zelenih listova po površini tla u posmatranom danu:

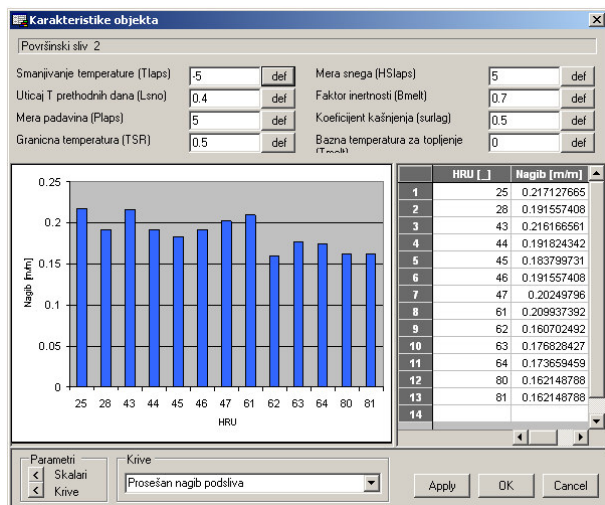


Slika 6. Vrednosti LAI za različite tipove vegetacije

Jedna od komponenti za određivanje vremena potrebnog za putovanje vode od određenog HRU-a pa do izlaznog profila se prikazuje na slici 7.

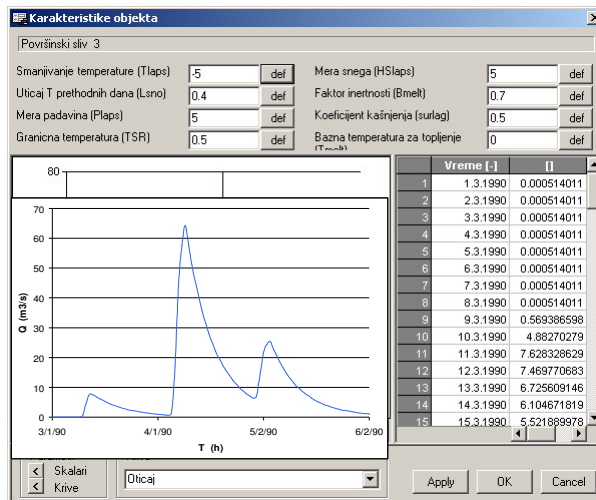
Kada se izvrši kontrola svih ulaznih veličina može se pustiti simulacija. Nakon izvršene simulacije dobijaju se izlazni rezultati. Najvažniji rezultat je hidrogram oticaja sa posmatranog podsliva. Primer ovog proračuna za jedan podsliv dat je na slici 8.





Slika 7. Prosečan nagib podsliva

Model SWAT kako je ovde koncipirano i prikazano, omogućava da se generisanje padavina u oticaj izvrši na svim podslivovima jednog kompletnog sliva kakav je sliv Drine. Primenjivao bi se za sve uzvodne podslivove koji nisu pod uticajem akumulacije. Hidrogrami isticanja na nizvodnim profilima predstavljali bi ulazne dotoke u akumulacijama. Drugim modelima bi se vršila transformacija tih hidrograma kroz akumulacije i njihova propagacija do izlaznog profila razmatranog kompletnog sliva, što bi u slučaju reke Drine bio profil uliva u reku Savu.



Slika 8. Hidrogram oticaja na izlaznom profilu

#### LITERATURA

- [1] J.G. Arnold, S.L. Neitschn, J.R. Kiniry, J.R. Williams, SWAT -Soil and Water Assessment Tool Users Manual, Texax 2001.
- [2] Jugoslav Nikolić, Isparavanje vode u prirodnim uslovima, Beograd, 2002.
- [3] Mojca Šraj, Modeliranje in merjenje prestreženih padavin – doktorska disertacija, Ljubljana, mart 2003.
- [4] Prohaska S., Ristić V., Hidrogeologija kroz teoriju i praksu, Beograd, 2002.
- [5] Prohaska S., Ristić V., Hidrologija I deo, hidro-teteorologija, hidrometrija i vodni režim, Beograd 2003.

MODELING OF THE PRECIPITATION/RUNOFF PROCESS IN SUB-CATCHMENTS OF THE DRINA RIVER BASIN BY THE SWAT METHOD

by

Zoran SIMIĆ

The Jaroslav Černi Institute for the Development of Water Resources

Stevan PROHASKA

Faculty of Mining and Geology, Belgrade,

Nikola MILIVOJEVIĆ

Faculty of Mechanical Engineering, Kragujevac

Aleksandra ORLIĆ

The Jaroslav Černi Institute for the Development of Water Resources

Summary

The paper presents the architecture of the SWAT model used for modeling of the precipitation/runoff process. The SWAT model is based on hydrodynamics and physics. Model inputs are atmospheric boundary radiation, air temperature, precipitation and height of snow cover. It computes all processes relevant to the movement of water: snow accumulation and melting, potential and actual evapotranspiration, precipitation reaching the ground, percolation, base flow and surface runoff. The basic

modeling unit is an elementary area of the grid, whose discretization size depends on the desired level of detail and data accuracy. The total outflow at the exit profile a catchment area is obtained by convoluting the summary outflow (surface runoff and base flow).

The SWAT model is illustrated by means of an imaginary catchment area of about 300km<sup>2</sup>.

Key words: precipitation, runoff, HRU.

Redigovano 16.05.2004.