

KRATAK PREGLED MODELA OTICAJA I EROZIJE ZASNOVANIH NA FIZIČKIM PROCESIMA

Ognjen Gabrić¹
Mirjana Horvat²
Zoltan Horvat³

UDK: 551.311.21:001.891.54

DOI: 10.14415/zbornikGFS27.16

Rezime: *Izučavanje procesa oticaja i erozije predstavlja jedan od osnovnih istraživanja u hidrologiji. Na bazi terenskih i laboratorijskih merenja, a uporedo sa razvojem računarske tehnike, razvijeni su i modeli oticaja i erozije zasnovani na rešavanju jednačina kojima se opisuje fizika procesa. U radu je prikazan opšti opis i uporedni prikaz nekoliko modela oticaja i erozije zasnovanih na jednačinama koji opisuju celokupnu dinamiku nastanka i transporta nanosa na slivu.*

Ključne reči: *erozija, model, oticaj*

1. UVOD

Razvoj modela za proračun oticaja i erozije započeo je sredinom prve polovine XX veka, kada je Zingg objavio empirijsku formulu pomoću koje je erozija sračunata na osnovu dužine i nagiba tla [1].

Najviše upotrebljavan model za proračun erozije predstavlja USLE koji je razvijen od strane USDA pod vođstvom Wischmeier-a i Smith-a. Model je prvi put objavljen 1965. godine u Agriculture Handbook 282 [2] dok je nešto prerađena verzija objavljena 1978. godine u Agriculture Handbook 537. Zbog nedostataka koje je imao mnogi istraživači su predstavljali poboljšane modele USLE-a. Jedna od značajnijih modifikacija bio je model MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) [3] a zatim, 1987. godine, i model RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Osim navedenih modela, u svetu je razvijeno još mnoštvo empirijskih modela zasnovanih na empirijskim vezama pojedinih činilaca procesa oticaja i erozije [4], [5].

Na bazi terenskih i laboratorijskih merenja, a uporedo sa razvojem računarske tehnike, razvijani su i matematički modeli oticaja i erozije. Pod matematičkim modeliranjem erozionih i transportnih procesa podrazumeva se opisivanje ovih procesa jednačinama i njihovo povezivanje u integrisane modele koji opisuju celokupnu dinamiku geneze i transporta nanosa u slivu [6]. Modeli predstavljaju korisno sredstvo, čijom primenom je

¹ dr Ognjen Gabrić, diplomirani građevinski inženjer, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, 24000 Subotica, Srbija, e-mail: ogabric@gf.uns.ac.rs

² dr Mirjana Horvat, diplomirani građevinski inženjer, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, 24000 Subotica, Srbija, e-mail: isicm@gf.uns.ac.rs

³ dr Zoltan Horvat, diplomirani građevinski inženjer, Građevinski fakultet Subotica, Kozaračka 2a, 24000 Subotica, Srbija, e-mail: horvatz@gf.uns.ac.rs

moгуće predvideti kako će se procesi oticaja i erozije odvijati i kako će se promena neke karakteristike sliva odraziti na promenu ovih veličina. U fizički baziranim modelima procesi erozije zemljišta i transporta nanosa na slivu opisuju se kao odgovor sliva na određene klimatske, topografske, pedološke, geološke i vegetacione uslove na slivu [7]. U nastavku rada dat je opšti opis i uporedni prikaz karakteristika šest fizički baziranih modela oticaja i erozije: ANSWERS-2000, CREAMS, WEPP, KINEROS2, EUROSEM i SHETRAN.

Cilj rada je upoznavanje korisnika modela sa načinom modeliranja procesa formiranja površinskog oticaja, transportnog kapaciteta i erozije sa sliva. Modeli su upoređivani sa aspekta modeliranja sledećih elemenata procesa: površinskog oticaja, erozije kišom, erozije površinskim tečenjem i modeliranjem transportnog kapaciteta.

2. OPIS MODELA

2.1. KINEROS2

KINEROS2 (The KINematic Runoff EROsion Model) je distributivan, fizički zasnovan model koji opisuje procese intercepcije, infiltracije, površinskog oticaja i erozije sa sliva pod dominantnim uticajem površinskog toka [8]. Konceptija modela se zasniva na podeli sliva na kaskadno poređane nizove površina i kanala preko kojih se oticaj propagira nizvodno koristeći metodu konačnih razlika za rešavanje 1-D jednačina kinematskog talasa.

U modelu, infiltracija se može modelisati za najviše dva sloja zemljišta konačnih debljina. Javlja se usled padavina ili od površinskog zadržavanja vode u depresijama a modeliše se primenom Smith-Parlang-ovog modela.

Oticaj se modeliše kao 1-D proces jednačinama kinematskog talasa:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t) \quad (1)$$

$$Q = \alpha h^m \quad (2)$$

gde je h dubina vode u preseku, t vreme, Q protok, q lateralni dotok, x rastojanje duž toka, a α i m parametri koji zavise od načina obračuna trenja. Za otpore trenja računatim po Manning-ovoj formuli:

$$\alpha = \frac{S^{1/2}}{n}; \quad m = \frac{5}{3} \quad (3)$$

a za otpore trenja računate po Chezy-jevoj formuli:

$$\alpha = CS^{1/2}; \quad m = \frac{3}{2} \quad (4)$$

gde je S nagib dna, n Manning-ov koeficijent hrapavosti a C Chezy-jev koeficijent.

KINEROS2 zasebno računa eroziju usled erozionog dejstva kiše i eroziju usled tečenja vode – hidraulička erozija. Erozijska se računa kako za slivne površine tako i za kanale. Jednačina koja opisuje kretanje sedimenata je jednačina kontinuiteta koja je slična kinematskoj jednačini tečenja vode:

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x,t) = q_s(x,t) \quad (5)$$

gde je C_s koncentracija sedimenata, Q protok, A površina poprečnog preseka, e intenzitet erozije i q_s intenzitet lateralnog dotoka sedimenata u kanale.

Za površinske elemente, pretpostavka je da se e sastoji iz dve osnovne komponente – produkcije erodovanog zemljišta usled kiše, e_s i hidrauličke erozije (ili taloženja), e_h , kao odnosa tangencijalnih sila i gravitacije. S toga, e može biti pozitivno (povećanje koncentracije nanosa u vodi) ili negativno (taloženje). Ukupna erozija predstavlja sumu erozije erozionim dejstvom kiše i hidrauličke erozije:

$$e = e_s + e_h \quad (6)$$

Na osnovu malog broja eksperimentalnih istraživanja, erozija kišom se može prikazati kao:

$$\begin{aligned} e_s &= c_f k(h) r^2 & ; & \quad q > 0 \\ e_s &= 0 & ; & \quad q < 0 \end{aligned} \quad (7)$$

gde je $c_f = 422 * K_{USLE}(\Phi_f)$ konstanta vezana za zemljište i osobine površine, K_{USLE} vrednost faktora K iz USLE modela, Φ_f faktor ublaženja erozije biljnim pokrivačem, $k(h) = \exp(-c_h h)$ redukcioni faktor erozije kišom usled povećavanja dubine vode.

Za hidrauličku eroziju, KINEROS2 polazi od pretpostavke da za određene uslove tečenja vode postoji koncentracija nanosa koja može biti transportovana ukoliko se ti uslovi nastave – transportni kapacitet. Hidraulička erozija, e_h je linearno proporcionalna razlici između transportnog kapaciteta i trenutne koncentracije nanosa.

$$e_h = c_g (C_m - C_s) A \quad (8)$$

gde je C_m transportni kapacitet, $C_s(x,t)$ trenutna lokalna koncentracija nanosa a c_g koeficijent intenziteta pronosa predstavljen kao količnik brzina tonjenja čestice v_f i dubine vode h .

$$c_g = \frac{v_f}{h} \quad (9)$$

$$v_f^2 = \frac{4g(\rho_s - 1)}{3C_D} d \quad (10)$$

$$C_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0.34 \quad (11)$$

$$R_n = \frac{v_f d}{\nu} \quad (12)$$

gde je g gravitaciono ubrzanje, ρ_s bezdimenzionalna gustina zrna, d prečnik zrna, R_n Reynolds-ov broj, C_D koeficijent sile otpora.

Za proračun transportnog kapaciteta koristi se modifikovana jednačina Govers-a:

$$C_m = \frac{0.05}{d(\gamma_s - 1)^2} \sqrt{\frac{Sh}{g}} (\Omega - \Omega_c) \quad (13)$$

gde je d prečnik zrna nanosa, γ_s specifična težina čestica u suspenziji, S nagib linije nivoa, h dubina vode, Ω jedinična snaga toka (proizvod brzine i nagiba linije nivoa), u brzina vode, Ω_c granična jedinična snaga toka za male dubine tečenja (0.004).

2.2. WEPP

WEPP (Water Erosion Prediction Project) je model kontinualnih kišnih epizoda za procenu erozije sa poljoprivrednih površina, površina pod šumom, građevinskih parcela i urbanih površina [9]. Preporučena veličina slivne površine je do 250 ha.

Za proračun evapotranspiracije model koristi Ričijevu metodu a za proračun infiltracije metodu Green-Ampt Mein Larson.

Proračun površinskog oticaja se vrši rešavanjem jednačina kinematskog talasa (izrazi 1 i 2). Obračun trenja vrši se Chezy-jevim izrazom (izraz 4) [10].

Proračun kretanja i transporta sedimenata sa sliva vrši se jednačinom kontinuiteta za ustaljeno kretanje nanosa:

$$\frac{dG}{dx} = D_f + D_i \quad (14)$$

gde je G koncentracija nanosa, D_f erozija u brazdama a D_i površinska erozija.

Proračun površinske erozija ima konceptualni karakter. Smatra se da je proporcionalna proizvodu intenziteta kiše R , površinskog oticaja Q i parametra erodibilnosti zemljišta K_r .

$$D_i = RQK_r \quad (15)$$

Erozija u brazdama se javlja kada je tangencijalni napon na kontaktu vode i zemljišta veći od kritičnog napona i kada je koncentracija sedimenata u toku manja od transportnog kapaciteta toka. Za slučaj pokretanja nanosa:

$$D_f = D_c \left(1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (16)$$

gde je D_c erozioni kapacitet toka a T_c transportni kapacitet toka. Erozioni kapacitet se računa preko izraza:

$$D_c = K_r (\tau_f - \tau_c) \quad (17)$$

gde je τ_f tangencijalni napon toka u brazdi i τ_c kritičan tangencijalni napon.

$$\tau_f = \gamma \bar{S} R \left(\frac{\tau}{\tau_a} \right) \quad (18)$$

gde je γ specifična težina vode, \bar{S} prosečan nagib brazde, R hidraulički radijus, τ stvarni tangencijalni napon, τ_a prosečan tangencijalni napon.

Kritičan tangencijalni napon τ_c je u funkciji Reynoldsovog broja i određuje se uz pomoć Shields-ovog dijagrama [11].

Ukoliko je koncentracija sedimenata u toku veća od transportnog kapaciteta, dolazi do deponovanja i tada je:

$$D_f = \frac{\beta V_f}{q} (T_c - G) \quad (19)$$

gde je β koeficijent turbulencije usled kišnih kapi, V_f brzina tonjenja zrna nanosa i q jedinični oticaj.

U modelu WEPP, transportni kapacitet je funkcija rastojanja i računa se pomoću izraza:

$$T_c = k_t \tau_f^{3/2} \quad (20)$$

gde je k_t transportni koeficijent.

2.3. SHETRAN

SHETRAN predstavlja programski paket zasnovan na interakciji nekoliko različitih modula kojima su opisani procesi evapotranspiracije i intercepcije, kretanje vode po površini terena i kroz hidrografsku mrežu, kretanje kroz nezasićenu i zasićenu sredinu i modula u kome su opisani erozioni i transportni procesi.

Model infiltracije u nezasićenoj zoni zasnovan je na rešavanju jednodimenzionalne Richards-ove diferencijalne jednačine a u zasićenoj zoni rešavanjem dvodimenzionalne jednačine Boussinesq-a [12]. Evapotranspiracija se određuje preko Penman-Monteith metode.

Tečenje po površini terena simulira se rešavanjem diferencijalnih jednačina difuzionog talasa u x i y pravcu. Dinamička jednačina, u oba pravca, može da se napiše u sledećem obliku [13]:

$$S_{fx} + \frac{\partial(z_g + h_0)}{\partial x} = 0; S_{fy} + \frac{\partial(z_g + h_0)}{\partial y} = 0 \quad (21)$$

gde je S_f nagib trenja, z_g kota dna a h_0 dubina vode. Ukoliko se obračun trenja izvrši po Manning-ovoj formuli:

$$S_{fx} = \frac{u_x^2}{K_x^2 h_0^{4/3}}; S_{fy} = \frac{u_y^2}{K_y^2 h_0^{4/3}} \quad (22)$$

i kombinovanjem izraza (15) i (16) dobija se jednačina difuzionog talasa u x i y pravcu:

$$\begin{aligned} Q_x &= u_x h_0 w_x - K_x \left[-\frac{\partial(z_x + h_0)}{\partial x} \right]^{-1/2} w_x h_0^{5/3} - \frac{K_x w_x h_0^{5/3}}{L_x^{1/2}} [z_u - z_d]^{1/2} \\ Q_y &= u_y h_0 w_y - K_y \left[-\frac{\partial(z_y + h_0)}{\partial y} \right]^{-1/2} w_y h_0^{5/3} - \frac{K_y w_y h_0^{5/3}}{L_y^{1/2}} [z_u - z_d]^{1/2} \end{aligned} \quad (23)$$

gde je w širina elementa u pravcu tečenja, K Strickler-ov koeficijent (inverzna vrednost Manning-ovog koeficijenta hrapavosti), L rastojanje između centara dvaju elemenata, z_u i z_d kote nivoa vode uzvodno i nizvodno a Q proticaj.

Transport nanosa u pravcu tečenja vode računa se preko dvodimenzionalne jednačine kontinuiteta za neustaljeno tečenje:

$$\frac{\partial(c_i h)}{\partial t} + (1 - \lambda) \frac{\partial z_i}{\partial t} + \frac{\partial g_{xi}}{\partial x} + \frac{\partial g_{yi}}{\partial y} = 0 \quad (24)$$

gde je h dubina vode, c_i koncentracija i-te frakcije sedimenta, λ gornjeg sloja, z debljina gornjeg sloja, g volumetrijski transport nanosa.

Model obračunava eroziju usled kišnih kapi i kapi koje padaju sa lišća empirijskim obrascem [14]:

$$D_r = k_r F_w (1 - C_g - C_r) (M_r + M_d) \quad (25)$$

gde je D_r intenzitet erozije kišnim kapima i kapima sa lišća, k_r erodibilnost zemljišta kišnim kapima, C_g i C_r procentualno učešće zaklonjenog zemljišta, M_r i M_d energija udara kišne kapi odnosno kapi koja padne sa lista. Zaštitni efekat površinskog sloja vode na eroziju, F_w , se obračunava preko sledećeg izraza:

$$F_w = \begin{cases} 1 & h \leq d_m \\ \exp\left(1 - \frac{h}{d_m}\right) & h > d_m \end{cases} \quad (26)$$

gde je h dubina vode a d_m efektivni prečnik kapi.

Energija udara kišnih kapi na površinu sliva, M_r , određuje se empirijskim izrazom:

$$M_r = (1 - C_c) a_1 I^{b_1} \quad (27)$$

gde je C_c procenat zemljišta zaštićen vegetacijom, I intenzitet kiše a koeficijenti a_1 i b_1 dati su tabelarno u funkciji intenziteta kiše.

Tabela 1. Vrednosti koeficijenata a_1 i b_1

I (mm/h)	a_1	b_1
0 – 10	$2.6893 \cdot 10^{-8}$	1.6896
10 – 50	$3.7514 \cdot 10^{-8}$	1.5545
50 – 100	$6.1192 \cdot 10^{-8}$	1.4242
≥ 100	$11.737 \cdot 10^{-8}$	1.2821

Energija udara kapi sa lišća se takođe obračunava empirijskim izrazom:

$$M_d = \frac{\pi}{6} V_d^2 \rho^2 d_1^3 L_d DRAIN A \quad (28)$$

gde je V_d brzina kapi koja pada sa lišća, ρ gustina vode, d_1 prečnik kapi koja pada sa lista, L_d procenat količine vode koja se sliva sa lišća i $DRAIN A$ intenzitet dotoka sa pokrivača.

$$V_d = \sqrt{\frac{M}{\beta} g \left(1 - e^{-\frac{2X\beta}{M}} \right)} \quad (29)$$

gde je M prosečna masa kapi sa lišća, β koeficijent trenja a X visina padanja. Odnos M/β se određuje iz relacije:

$$\frac{M}{\beta} = a_2 + b_2 d_1 \quad (30)$$

Tabela 2. Vrednosti koeficijenata a_2 i b_2

d_1 (m)	X (m)	a_2	b_2
< 0.0033	sve dužine	0	2200
≥ 0.0033	< 7.5	1.93	1640
≥ 0.0033	≥ 7.5	5.14	660

Površinska erozija usled tečenja vode po površini sliva, D_q , se obračunava preko sledećeg pristupa:

$$D_q = \begin{cases} k_f (1 - C_p) \left[\frac{\tau}{\tau_{ec}} - 1 \right] & \tau > \tau_{ec} \\ 0 & \tau \leq \tau_{ec} \end{cases} \quad (31)$$

gde je k_f koeficijent erodibilnosti površinskog tečenja, τ tangencijalni napon površinskog tečenja, τ_{ec} kritični tangencijalni napon.

Tangencijalni napon površinskog toka obračunava se iz relacije:

$$\tau = \rho ghS \quad (32)$$

a kritičan napon:

$$\tau_{ec} = (\rho_s - \rho) g D_{50} a_3 R_*^{b_3} \quad (33)$$

$$R_* = \max \left[0.03, \frac{D_{50} (\tau / \rho)^{0.5}}{\nu} \right] \quad (34)$$

gde je ρ_s gustina sedimenta, ρ gustina vode, g gravitaciono ubrzanje, D_{50} prosečan prečnik zrna nanosa a R_* Reynoldsov broj. Vrednost parametara a_3 i b_3 data je u tabeli 3.

Tabela 3. Vrednosti koeficijenata a_3 i b_3

R_*	a_3	b_3
0.03 – 1	0.1	-0.3
1 – 6	0.1	-0.62
6 – 30	0.033	0
30 – 135	0.013	0.28
135 – 400	0.03	0.1
>400	0.056	0

Transportni kapacitet površinskog toka se obračunava odabirom jednog od dva ponuđena metoda, pomoću formule Yalin-a:

$$G_{tot} = 0.635 \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} D_{50} \delta \left[1 - \frac{1}{a\delta} \ln(1 + a\delta) \right] \quad (35)$$

ili pomoću jednačine Engelund-Hansen-a:

$$G_{tot} = \begin{cases} \frac{0.05 Q^2 S^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{gh} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^2 D_{50} l} & h > 0 \\ 0 & h \leq 0 \end{cases} \quad (36)$$

gde je l širina toka a vrednosti a i δ se računaju preko izraza:

$$\delta = \max \left[0, \frac{\tau}{\tau_{ec}} - 1 \right] \quad (37)$$

$$a = 2.45 \sqrt{\frac{\tau_{ec}}{[(\rho_s - \rho)gD_{50}]}} \left(\frac{\rho_s}{\rho}\right)^{-0.4} \quad (38)$$

Gore navedene jednačine za proračun transportnog kapaciteta su razvijene za proračun transporta nanosa u kanalima i njihova upotreba za proračun površinske erozije nije u potpunosti ispitana. U programskom paketu je ostavljena mogućnost korisniku da samostalno odredi maksimalnu koncentraciju sedimenata.

2.4. ANSWERS-2000

ANSWERS-2000 (Areal Nonpoint Source Watershed Response Simulation) predstavlja fizički baziran model dugoročnih, kontinualnih simulacija za procenu uticaja efekata mera na zaštitu od erozije i nutrijenata sa poljoprivrednih zemljišta veličine do 2000 ha [15]. Model je baziran na konceptu da u svakoj tački sliva postoji zavisnost između oticaja i parametara koji ga izazivaju (intenziteta kiše, infiltracije, topografije, tipa zemljišta...). Površina sliva se predstavlja homogenim elementima u kojima su svi hidrološki parametri uniformni.

Model ima mogućnost proračuna evapotranspiracije pomoću jednačine Ričija (Ritchie) dok se infiltracija obračunava preko modela koji su predložili Green i Ampt.

Površinski oticaj, kao razlika padavina i isparavanja, modelira se numeričkim rešavanjem jednačina kinematskog talasa (izrazi 1 i 2), gde je veza između proticaja i dubine vode data Manning-ovom jednačinom [16] (izraz 3).

Proračun kretanja i transporta sedimenata sa sliva vrši se jednačinom kontinuiteta za ustaljeno kretanje nanosa [9].

Empirijskim relacijama određuje se erozija kišom:

$$DR = 0.027 * CDR * SKDR * Ai * R^2 \quad (39)$$

gde je DR erozija kišom, CDR faktor kulture i načina obrade iz modela USLE, $SKDR$ erozivnost zemljišta iz modela USLE, A površina i R intenzitet kiše.

Proračun erozije tečenjem vode po terenu se takođe određuje empirijskim izrazom:

$$DF = 0.018 * CDR * SKDR * Ai * SL * Q \quad (40)$$

gde je SL nagib sliva a Q površinski oticaj.

Transportni kapacitet površinskog toka obračunava Yalin-ovom jednačinom (izraz 22).

2.5. CREAMS

Model CREAMS (The Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) razvijen je sa ciljem da omogući procenu uticaja zagađujućih materija sa poljoprivrednih površina na vodotoke [17]. Model je namenjen za modelisanje

kontinualnih kišnih epizoda ali je, za razliku od modela ANSWERS-2000, predviđen za korišćenje na parcelama manjim od 4 km².

Evapotranspiracija se obračunava pomoću jednačine Ričija. Za obračun infiltracije model koristi SCS metodu ukoliko su padavine zadate kao dnevne, odnosno Green-Ampt metodu ukoliko postoje časovni podaci o padavinama [18]. Tečenje po površini terena se dobija rešavanjem jednačina kinematskog talasa (izrazi 1 i 2) uz korišćenje Chezy-jeve veze (izraz 4) između protoka i dubine vode.

Odvajanje sedimenata od osnovne mase tla se računa zasebno za eroziju kišom i eroziju površinskim tečenjem preko empirijskih relacija definisanih u modelu USLE. Transport sedimenata se računa preko jednačine kontinuiteta za ustaljen pronos nanosa. Transportni kapacitet toka obračunava se preko jednačine Yalin-a.

3. DISKUSIJA I ZAKLJUČCI

Iz priloženog pregleda nekoliko matematičkih modela oticaja i erozije može se zaključiti da postoje dva pristupa rešavanja problema procene količine erozije sa sliva. Sa jedne strane postoje modeli kontinualnih simulacija kojima se, osim oticaja i erozije tokom jedne kišne epizode, modelišu i događaji između kiša (CREAMS, WEPP, SHETRAN). Sa druge strane postoje i modeli kojima se modeliraju procesi od kišnih epizoda različitog trajanja (KINEROS2, ANSWERS). Svi modeli su predviđeni za procenu oticaja i erozije sa, uglavnom, poljoprivrednih površina veličine 1-2000 km². Modeli opisuju erozione procese pod uticajem kiše i površinskog oticaja dok modeli CREAMS i WEPP opisuju i eroziju u brazdama. Jedino model CREAMS računa i eroziju u jarugama.

Za opisivanje hidroloških i psamoloških procesa na slivu modeli koriste slične jednačine. Kretanje vode po površini terena se u modelima opisuje empirijskim i jednačinama kinematskog talasa, osim u modelu SHETRAN koji koristi jednačine difuzionog talasa. Kretanje nanosa niz padine sliva i kroz hidrografsku mrežu opisano je jednačinom kontinuiteta za ustaljeno (ANSWERS; CREAMS i WEPP), odnosno neustaljeno kretanje nanosa (KINEROS2, i WEPP). Transportni kapacitet površinskog i oticaja kroz reke modelira se upotrebom jednačina Yalin-a, Engelund-Hansena i Goversa.

Odluka o primeni određenih modela, empirijskih ili matematičkih, zavisi od stepena raspoloživih podataka merenja klimatskih, topografskih, pedoloških, geoloških i vegetacionih uslova na slivu. Iz priloženog pregleda matematičkih modela oticaja i erozije može se zaključiti da rade na vrlo sličnim principima.

LITERATURA

- [1] W. H. Wischmeier and D. D. Smith, "Predicting rainfall erosion losses. Agricultural Handbook 537," **1978**.
- [2] W. H. Wischmeier and D. D. Smith, "Agriculture Handbook 282," U.S. Department of Agriculture, **1965**.
- [3] H. Liu, "Bare soil erosion dependence on soil and rainfall properties," University of Houston, Houston, USA, **1999**.

- [4] X. C. Zhang, M. A. Nearing, L. D. Norton, W. P. Miller, and L. T. West, "Modeling Interrill Sediment Delivery," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 62, no. 2, p. 438, **1998**.
- [5] H. Wei, M. A. Nearing, J. J. Stone, D. P. Guertin, K. E. Spaeth, F. B. Pierson, M. H. Nichols, and C. A. Moffet, "A New Splash and Sheet Erosion Equation for Rangelands," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 73, no. 4, p. 1386, **2009**.
- [6] V. Đukić and S. Petković, "Review of soil erosion and sediment transport models in river basins," *Vodoprivreda*, vol. 41, no. 4–6, pp. 117–125.
- [7] V. Đukić, "Hidrauličko-hidrološki model geneze i transporta nanosa u slivu," Univerzitet uBeogradu, Građevinski fakultet, **2010**.
- [8] D. J. Semmens, D. C. Goodrich, C. L. Unkrich, R. E. Smith, D. A. Woolhiser, and S. N. Miller, "KINEROS2 and the AGWA modelling Framework," in *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*, Cambridge University Press, **2007**.
- [9] H. Aksoy and M. L. Kavvas, "A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models," *CATENA*, vol. 64, no. 2–3, pp. 247–271, Dec. **2005**.
- [10] D. C. Flanagan and M. A. Nearing, "USDA-Water Erosion Prediction Project Hillslope Profile and Watershed Model Documentation," NSERL Report 10.
- [11] C. T. Haan, B. J. Barfield, and J. C. Hayes, *Design hydrology and sedimentology for small catchments*. San Diego, Calif: Academic Press, **1994**.
- [12] J. C. Bathurst, "Physically-based erosion and sediment yield modelling: the SHETRAN concept," *Modelling erosion, sediment transport and sediment yield*, p. 47, **2002**.
- [13] School of Civil Engineering and Geosciences, "SHETRAN Water Flow Component, Equations and Algorithms," Newcastle, Newcastle University, **1995**.
- [14] B. T. Lukey, J. C. Bathurst, R. A. Hiley, and J. Ewen, "SHETRAN sediment transport component: equations and algorithms," WRSRU/TR/9510/60.0, Oct. **1995**.
- [15] S. Dabral and M. Cohen, "ANSWERS-2000 Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation with Questions Graphical User Interface," ABE6254—Simulation of Small Agricultural Watersheds, Project Report 1, Nov. **2011**.
- [16] D. E. Radcliffe and M. L. Cabrera, *Modeling Phosphorus in the Environment*. CRC Press, **2006**.
- [17] W. S. Merritt, R. A. Letcher, and A. J. Jakeman, "A review of erosion and sediment transport models," *Environmental Modelling & Software*, vol. 18, no. 8–9, pp. 761–799, Oct. **2003**.
- [18] W. G. Knisel and others, "CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems.," *USDA Conservation Research Report*, no. 26, **1980**.

SHORT REVIEW OF RUNOFF AND EROSION PHYSICALLY BASED MODELS

Summary: Processes of runoff and erosion are one of the main research subjects in hydrological science. Based on the field and laboratory measurements, and analogous with

development of computational techniques, runoff and erosion models based on equations which describe the physics of the process are also developed. Several models of runoff and erosion which describes entire process of genesis and sediment transport on the catchment are described and compared.

Keywords: *erosion, model, runoff*