

MOGUĆNOSTI MODELIRANJA EROZIONIH I TRANSPORTNIH PROCESA U REČNIM SLIVOVIMA

Mr Vesna ĐUKIĆ, asistent, dipl. građ. inž.
Dr Slobodan PETKOVIĆ, red. prof., dipl. građ. inž.
Šumarski fakultet, ul. Kneza Višeslava 1, Beograd

REZIME

Intenziteti erozije na obradivom zemljištu u brdsko-planinskim područjima Srbije znatno su veći u odnosu na maksimalno dozvoljene, za koje se smatra da neće dovesti do negativnih ekoloških posledica po zemljište i okolinu. S obzirom da se u Srbiji pronos nanosa osmatra i meri samo na malom broju većih vodotoka i to često primenom neodgovarajuće metodologije, modeli geneze i transporta nanosa predstavljaju sve značajnije sredstvo pomoću koga je moguće dobiti sve informacije neophodne za antieroziono uređenje sliva. Pored toga, primenom modela moguće je analizirati efekat izvedenih radova na antierozionom uređenju slivova na veličinu erozije. U radu je dat pregled značajnijih modela, koji se danas, uglavnom, koriste pri analizi erozionih i transportnih procesa u slivovima. Ukazano je na njihove prednosti i nedostatke, što olakšava izbor odgovarajućeg modela, kojim se opisuju erozioni i transportni procesi u rečnim slivovima.

Ključne reči: erozija, transport nanosa, površinski oticaj, transportni kapacitet toka, sliv

1. UVOD

Erozija zemljišta i produkcija nanosa predstavljaju prirodne fenomene koji se nikakvim tehničkim ni biološkim merama ne mogu u potpunosti eliminisati. Pod uticajem erozionih procesa u toku dugog niza godina menjaju se morfološki oblici na zemlji u smeru ublažavanja reljefa, na taj način što dolazi do erozije viših delova i prenošenja i akumuliranja nanosa u nižim delovima. Intenzitet erozije na obradivom zemljištu u brdsko – planinskim područjima Srbije iznosi oko 10 - 100 t/ha godišnje. Usled ovako velikih intenziteta erozije javljaju se veliki ekološki i vodoprivredni problemi, koji se manifestuju kako u zoni erozionih

procesa ("on-site effects"), tako i izvan područja erozione produkcije nanosa ("off-site effects").

Usled velikih intenziteta erozije dolazi do brzog odnošenja zemljišta, čime se smanjuje plodnost zemljišta. Izvan područja erozione produkcije nanosa, intenzivni transport nanosa dovodi do istaložavanja nanosa u vodnim tokovima, akumulacijama, rezervoarima i drugim hidrotehničkim objektima, što smanjuje kapacitet ovih objekata čime se odražava negativna uloga nanosa u vodoprivredi. Pored toga, nanos ugrožava i naselja, saobraćajnu infrastrukturu (puteve, pruge, mostove, propuste i dr.). Transport nanosa prouzrokuje mnogobrojne ekološke probleme, jer u vodotoke, zajedno sa nanosom dolaze i hemijske zagađujuće materije koje negativno utiču na kvalitet vode u vodotocima za vodoprivredno korišćenje i na pogoršanje uslova opstanka biocenoza u rečnim tokovima.

U Srbiji se pronos nanosa osmatra i meri samo na malom broju većih vodotoka, pri čemu je često metodologija koja se pri tome primenjuje neadekvatna, jer se primenjuju samo dnevna merenja. Ovakva učestalost merenja često dovodi do pogrešnih rezultata o stvarnoj veličini pronosa nanosa, posebno, u slučaju bujičnih vodotoka. Pojava bujičnih talasa je nagla i kratkotrajna, tako da talas sa velikom koncentracijom nanosa može proći između dva osmatranja. S druge strane, kod manjih vodotoka, talasi većih voda učestvuju sa preko 80% u ukupnom godišnjem transportu nanosa. Precizna direktna merenja erozione produkcije nanosa na površini nekog sliva se retko izvode i kod nas i u svetu. Promene na površini zemljišta pod uticajem erozionih i psamoloških procesa u slivovima su blage i spore, tako da je samo primenom veoma preciznih merenja u dužem vremenskom periodu moguće dobiti značajnije rezultate.

Procesi geneze i transporta nanosa u okviru sliva kod nas još nisu u dovoljnoj meri izučeni. Štaviše, problematici erozije zemljišta i transporta nanosa kroz vodotoke se često pristupa odvojeno i njome se bave stručnjaci različitih profila između kojih nema prave koordinacije istraživanja i kompleksnog integralnog sagledavanja cele problematike. Erozijska zemljišta i transport nanosa kroz vodotoke često se opisuju primenom empirijskih izraza, bez značajnijih pokušaja da se opišu fizički procesi i mehanizmi koji dovode do ovih procesa. Analizom transporta nanosa kroz reke dobijamo samo grube procene o tome šta se dešava u slivu.

Modeli erozije zemljišta i transporta nanosa predstavljaju alternativno sredstvo pomoću koga je moguće proceniti količinu razorenog zemljišta na nekom području ili količinu nanosa koja pristigne do nekog vodotoka. Ova informacija je važna pri planiranju mera za zaštitu zemljišta od erozije. Primenom modela simuliraju se i analiziraju kako kratkoročne tako i dugoročne posledice različitih upravljačkih aktivnosti ljudi na zemljištu: upoređuju se različiti alternativni načini gazdovanja zemljištem ili efekti primene različitih protiverozionih mera, pre njihove konačne primene na slivu. Takođe, modeli pružaju informacije o tome kako će se promene u jednom delu sliva odraziti na preostali deo sliva. Modeli omogućavaju sagledavanje međusobne povezanosti različitih fizičko-geografskih činilaca sliva koji utiču na veličinu erozije ili količinu nanosa.

U ovom radu prikazaće se modeli geneze i transporta nanosa, koji se danas, uglavnom, koriste u svetu. Prikazaće se oni modeli pomoću kojih je moguće opisati procese u gornjim delovima sliva. U gornjim delovima slivova voda, uglavnom, otiče slivajući se niz nagnute padine po površini terena. U ovim delovima nalaze se izvorišni delovi potoka i reka, a hidrografska mreža tek počinje da se stvara. U ukupnom oticaju dominira površinski oticaj, dok se oticaj kroz reke i potociće može zanemariti. Površinski oticaj i transport nanosa u rečnim slivovima, u velikoj meri, se razlikuju od tečenja vode u prirodnim rečnim koritima. Površinski oticaj karakteriše se velikom širinom i vrlo malom dubinom vode.

2. MODELIRANJE GENEZE I TRANSPORTA NANOSA U SLIVOVIMA

Pod matematičkim modeliranjem erozionih i transportnih procesa podrazumeva se opisivanje ovih

procesa u jednačinama i/ili njihovo povezivanje u integrisane modele koji opisuju celokupnu dinamiku geneze i transporta nanosa u slivu. Erozijska i transport nanosa se u modelima opisuju kao rezultat odgovora sliva na određeni broj značajnih fizičkih karakteristika sliva koji utiču na veličinu erozije. Hidrološki i psamološki procesi u slivovima veoma su složeni i zavisni od velikog broja fizičko-geografskih činilaca, i ne mogu se potpuno realno opisati modelima. Međutim, modeli predstavljaju korisno sredstvo, čijom primenom je moguće predvideti kako će se, pod određenim okolnostima, ti procesi odvijati, ili kako će se promena neke karakteristike sliva odraziti na veličinu oticaja ili pronosa nanosa. Primenom modela uspostavlja se funkcionalna povezanost između nekog nepoznatog parametra sliva i poznatih parametara. Na taj način, promena neke nepoznate veličine posmatra se u svetlu promena karakteristika ulaznih parametara, tako da je posmatranu nepoznatu veličinu moguće jasnije definisati. Primenom modela moguće je ustanoviti kako će se promene nastale u gornjim delovima sliva odraziti na nizvodne delove. U stvari, modeli kroz mnogobrojne "simulacije" prirodnih procesa, pružaju odgovore na razna pitanja o hidrološkom i psamološkom ponašanju sliva, na koja je nemoguće dobiti odgovore na drugi način. Matematički modeli se mogu podeliti na različite načine, a koja vrsta modela će se primeniti zavisi od konkretnih uslova koji vladaju u slivu, od količine raspoloživih podataka i od ciljeva koji se žele postići primenom odgovarajućeg modela.

U zavisnosti od toga koji vremenski period se opisuje primenom matematičkog modela, oni mogu biti: trenutni ili kontinualni. Primenom trenutnih modela se opisuje trenutno stanje u slivu u pogledu geneze i transporta nanosa, usled kiše koja je padala u kraćem vremenskom periodu, npr. usled jedne kišne epizode. Primenom kontinualnih modela opisuju se promene u slivu nastale u dužem vremenskom periodu, dakle u toku perioda u kome je bilo i kišnih perioda i perioda bez kiše. Kod kontinualnih modela, pri proračunu i oceni kvantitativnih parametara erozije i nanosa, uzima se u obzir i uticaj ranijih procesa i ranijih stanja u slivu na ove parametre. Na taj način, kod kontinualnih modela je uključena određena "istorija" procesa kretanja vode i nanosa na slivu, što omogućava da se dovoljno pouzdano predvide uslovi na početku svake kiše. Za razliku od kontinualnih modela, kod primene trenutnih modela potrebno je pretpostaviti stanje vlažnosti u zemljištu na početku svake kišne epizode, zbog čega ovi modeli sadrže izvesnu dozu neizvesnosti. Problem sa kontinualnim modelima simulacije odnosi se na potrebu

za prikupljanjem velikog broja ulaznih podataka o klimatskim karakteristikama i korišćenju zemljišta u toku godine. Pored toga, ovi modeli veoma zavise od tačnosti modeliranja evapotranspiracije i dinamičkih osobina zemljišta. Njihovom primenom analizira se odgovor sliva na veliki broj kišnih epizoda koje dovode samo do male količine oticaja i degradacije zemljišta.

U zavisnosti od nivoa raspoloživog znanja o pojavi koja se opisuje, i koje će se ugraditi u matematički model, modeli mogu biti: empirijski, konceptualni i fizički. Empirijski modeli pri transformaciji ulaznih podataka u rezultate modela, ne uzimaju u obzir fizičke zakone koji utiču na njih. Ovi modeli su relativno jednostavni i zahtevaju mali broj podataka. Zasnivaju se na definisanju najznačajnijih parametara pomoću kojih se erozija zemljišta, odnosno transport nanosa mogu opisati, i, zatim se, na osnovu osmatranja, eksperimentalnih merenja i statističkih tehnika uspostavlja povezanost između definisanih ulaznih parametara i erozije zemljišta ili pronosa nanosa. Konceptualni modeli predstavljaju polufizičke modele, jer oni uzimaju u obzir fizičke zakonitosti koje utiču na neki proces, u ovom slučaju na transport nanosa, ali uz znatna pojednostavljenja. Ovakav pristup se koristi kada su procesi koji se opisuju jako složeni i ne mogu se u potpunosti objasniti svi mehanizmi koji pri tome deluju. Pri simulaciji geneze i transporta nanosa primenom fizičkih modela analiziraju se različiti procesi koji dovode do erozije produkcije i transporta nanosa, pri čemu se uzimaju u obzir fizičke zakonitosti i unutrašnji mehanizmi koji upravljaju njima. U ovim modelima koriste se fizički parametri koji se ili mogu izmeriti ili odrediti primenom odgovarajućih jednačina, pri čemu je broj parametara koje je potrebno kalibrisati kod ovih modela znatno manji nego u slučaju empirijskih modela.

U zavisnosti od toga da li se uzima u obzir prostorna promenljivost fizičkih karakteristika sliva pri analizi transporta nanosa, modeli se mogu podeliti na globalne i distributivne. Pri modeliranju procesa na slivu primenom globalnih modela pretpostavlja se da na površini sliva vladaju homogeni uslovi i koriste se jedinstvene vrednosti ulaznih parametara. Stepentčnosti ovakvih modela zavisi od stepena nehomogenosti sliva. U ovakvim modelima se obično koriste empirijske jednačine koje je potrebno kalibrisati. U distributivnim modelima uzima se u obzir prostorna promenljivost fizičkih karakteristika sliva. U ovom slučaju površina sliva se diskretizuje na određeni broj elementarnih delova, unutar kojih se pretpostavljaju uniformne fizičko-geografske karakteristike (klimatske,

pedološke, geološke, vegetacione) i, s tim u vezi, homogeni uslovi u pogledu geneze i transporta nanosa. U ovom slučaju, dinamika geneze i transporta nanosa se opisuje za svaki elementarni deo sliva, a sumiranjem vrednosti koje važe za elementarne delove dobijaju se rezultati za ceo sliv. Primenom distributivnih modela psamološki procesi na slivu se realnije opisuju u odnosu na globalne modele, pri čemu je moguće simulirati uslove u pogledu oticaja i nanosa u svakom delu sliva, ali je problem u njihovoj primeni zbog potrebe prikupljanja i obrade velikog broja podataka, što zahteva dosta vremena kao i korišćenje kompjutera velike memorije.

3. PRIKAZ ZNAČAJNIJIH MODELA POMOĆU KOJIH SE OPISUJU PROCESI GENEZE I TRANSPORTA NANOSA U SLIVU

3.1 Empirijski modeli

U toku poslednjih nekoliko decenija razvijeno je više metoda za proračun erozije produkcije nanosa i pronosa nanosa. Jedna od najpoznatijih empirijskih metoda za proračun gubitaka zemljišta delovanjem erozionih faktora je "Univezalna jednačina gubitaka zemljišta" (USLE) [7]. Ova metoda je razvijena na osnovu velike baze eksperimentalnih podataka dobijene istraživanjima na poljoprivrednim zemljištima u SAD. Primenom ove jednačine određuje se godišnja količina erodiranog zemljišta na pojedinačnim obradivim parcelama maksimalne površine do 1ha, na osnovu sledećeg izraza:

$$A=0,224 \cdot R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

gde je:

- A – gubitak zemljišta po jedinici površine ($\text{kgm}^{-2}\text{god}^{-1}$)
- R – faktor erozije snage kiše, koji predstavlja broj erozionih indeksa ($\text{KE}_{\text{max}I_{30}}$ – mera erozionih sila za određenu kišu) u periodu razmatranja
- K – faktor erodibilnosti zemljišta
- L – faktor dužine padine
- S – faktor nagiba
- C – faktor biljnog pokrivača
- P – faktor protiverozionih mera

Jedna od prednosti ove jednačine je njena relativna jednostavnost i mali broj potrebnih ulaznih podataka u poređenju sa drugim složenijim modelima. Međutim, problem je u tome što nije realno da se proces erozije zemljišta predstavi na ovako pojednostavljeni način, tj. množenjem različitih parametara kojima se predstavlja uticaj padavina, vrste zemljišta, reljefa, biljnog pokrivača i antierozionih mera na zemljištu.

Osnovni cilj empirijskih modela bio je određivanje intenziteta erozije na eksperimentalnim parcelama ("on site" problemi). Sedamdesetih godina prošlog veka počeli su da se zaoštravaju ekološki problemi vezani za transport raznih zagađujućih materija kroz vodotoke, čime je počeo znatno da se narušava kvalitet vode u vodotocima [6]. To je uticalo na potrebu za definisanjem glavnih izvorišta nanosa u slivu, i određivanjem dinamike transporta nanosa ka rekama. Odgovore na ova pitanja mogli su da daju samo modeli koji opisuju fizičke mehanizme između različitih procesa pri genezi i transportu nanosa.

3.2 Fizički modeli

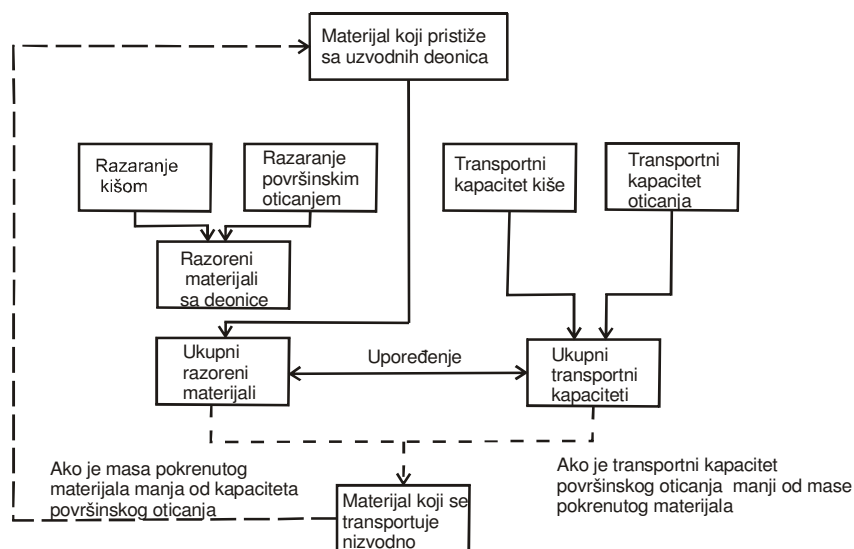
Osnovni cilj razvoja fizičkih modela je formiranje univerzalnog modela koji bi bio primenljiv u svim uslovima, bez potrebe za kalibracijom određenih parametara modela. Kalibracija bi se izbegla tako što bi se vrednosti svih parametara modela dobili ili merenjima na terenu, ili bi se izrazili u funkciji nekih drugih merljivih parametara. U nastavku rada prikazaće se karakteristike značajnijih fizičkih modela pomoću kojih je moguće opisati procese erozije i transporta nanosa u slivu: WEPP [1], KINEROS [8] i EUROSEM [4].

U ovim fizičkim modelima procesi erozije zemljišta i transporta nanosa na slivu opisuju se kao rezultat odgovora sliva na određene klimatske, pedološke, geološke i vegetacione uslove u slivu. To je omogućeno zahvaljujući njihovoj distributivnoj prirodi, koja pruža mogućnost opisivanja hidroloških, erozionih i transportnih procesa u svakom delu sliva i sagledavanje vremenske i prostorne dinamike ovih procesa. Osnovna ideja ovih modela jeste, da se, na osnovu topografskih, pedoloških, geoloških i vegetacionih karakteristika, sliv može podeliti na određeni broj manje-više homogenih oblasti. Homogena oblast obuhvata površinu na kojoj prevladuje jedna vrsta zemljišta, ispod koje se nalazi jedna vrsta geološke podloge i na kojoj se gaji jedna vrsta vegetacije. Prema tome, u okviru jedne homogene oblasti vladaju i uniformni uslovi u pogledu oticaja i geneze i transporta nanosa. Homogene oblasti sliva predstavljaju delove padine brda i mogu biti različite veličine, zavisno od stepena nehomogenosti sliva i potrebnog nivoa detaljnosti pri sagledavanju ove nehomogenosti. Unutar svake homogene oblasti nalazi se određeni broj elementarnih deonica. Dinamika geneze i transporta nanosa opisuje se za svaku elementarnu deonicu, a sumiranjem vrednosti koje važe za elementarne delove dobijaju se, najpre rezultati za homogene oblasti, a zatim i za ceo sliv. Distributivna

priroda modela predstavlja, u isto vreme, i njihovu prednost i njihovu slabost. Prednost ovakvih modela ogleda se u obuhvatanju velikog broja fizičko-geografskih činioca sliva, što doprinosi realnijem prikazu psamoloških procesa na slivu. Nedostatak je u tome što je potrebno prikupiti veliki broj podataka o karakteristikama sliva, što iziskuje dosta vremena i ne predstavlja ni malo lak zadatak.

Fizički modeli, pri opisivanju procesa geneze i transporta nanosa na slivu, polaze od suštinske povezanosti površinskog oticaja i geneze i transporta nanosa na slivu. Zbog toga, modeli kojima se opisuju psamološki procesi na slivovima, uglavnom, se oslanjaju i nadovezuju na hidrološke modele i predstavljaju njihovu nadogradnju. Primenom hidrološkog modela opisuje se transformacija padavina u oticaj i proračunavaju se vrednosti različitih komponenti hidrološkog ciklusa: infiltracije, evapotranspiracije, intercepcije, količine zadržane vode u depresijama na površini terena i oticaja. Dobijene vrednosti oticaja i visine sloja vode na površini terena, zajedno sa fizičkim karakteristikama sliva, predstavljaju ulazne podatke u modelu geneze i transporta nanosa u slivu.

Pomenuti fizički modeli konceptualno se oslanjaju na model Meyer-a i Wischmeier-a [5] u smislu da se proces geneze i transporta nanosa u gornjim delovima sliva može podeliti na nekoliko različitih, ali povezanih, sub-procesa, od kojih svaki u određenoj meri utiče na genezu i transport nanosa: razaranje zemljišta padavinama, transport razorenog materijala padavinama, razaranje zemljišta posredstvom oticaja i transport razorenog materijala u procesu oticanja. Međutim, pomenuti modeli se razlikuju u načinu na koji se svaka od ovih komponenti opisuje. U tom smislu razliku se dva pristupa. Prema prvom pristupu, koji je ugrađen u modelu WEPP, pretpostavlja se da do erozije dolazi samo ukoliko je količina nanosa u toku manja u odnosu na transportni kapacitet toka za nanos, što je u saglasnosti sa modelom Meyer-a i Wischmeier-a. Ukoliko je transportni kapacitet toka manji u odnosu na raspoloživu količinu zemljišta, tada je količina nanosa koja će zajedno sa vodom napustiti posmatranu deonicu sliva jednaka transportnom kapacitetu toka za nanos. Višak nanosa će se taložiti unutar posmatrane deonice. Količina razorenog, odnosno akumuliranog zemljišta jednaka je razlici između količine nanosa koja dotiče u segment i količine nanosa koja otiče iz segmenta. Algoritam za simuliranje procesa erozije zemljišta pod dejstvom vode prema modelu Meyer-a i Wischmeier-a je prikazan na sl.1.



Slika 1. Algoritam za simuliranje procesa erozije zemljišta pod dejstvom vode prema modelu Meyer-a i Wischmeier-a.

Prema drugom pristupu, na kome se zasnivaju modeli KINEROS i EUROSEM, pretpostavlja se da deformacija neke padine sliva, u smislu erozije ili taloženja nanosa, ne zavisi od količine materijala koju tok nosi sa sobom, već od energije toka, koja se izražava proizvodom tangencijalnog napona na kontaktu između zemljišta i vode i srednje brzine toka.

Glavne razlike između fizičkih modela geneze i transporta nanosa mogu se sagledati detaljnijom analizom jednačina koje se u njima koriste pri opisivanju erozije zemljišta usled površinskog oticaja i transportnog kapaciteta toka za nanos.

3.3 Modeliranje erozije zemljišta usled površinskog oticaja

Erozija zemljišta pod uticajem površinskog oticaja u jednačinama se opisuje uspostavljanjem povezanosti između nekoliko značajnijih parametara od kojih zavisi intenzitet erozije usled površinskog oticaja. Jednačine obično sadrže parametre pomoću kojih se opisuje erodibilnost zemljišta usled površinskog oticaja i parametre pomoću kojih se opisuje erozivnost površinskog oticaja.

U modelu WEPP, intenzitet erozije zemljišta unutar brazdi (D_b) zavisi od snage površinskog oticaja u odnosu na razaranje, transportnog kapaciteta toka za nanos i stvarne količine nanosa u toku i može se izraziti pomoću sledećeg izraza:

$$D_b = K_{bk} (\tau - \tau_{ck}) [1 - (G/T_c)] \quad (2)$$

gde je:

G – količina nanosa u toku

K_{bk} – kalibrisana vrednost erodibilnosti zemljišta unutar brazdi (s/m)

τ – stvarni tangencijalni napon toka (Pa)

τ_{ck} – kritična vrednost tangencijalnog napona toka (Pa)

T_c – transportni kapacitet toka za nanos (kg/sm)

Vrednost kritičnog tangencijalnog napona trenja predstavlja njenu graničnu vrednost iznad koje dalje povećanje tangencijalnog napona znatno ubrzava razaranje zemljišta. Vrednost kritičnog tangencijalnog napona obično se određuje na osnovu eksperimentalno dobijenih relacija, u kojima se uspostavlja veza između kritičnog tangencijalnog napona i prosečne veličine zrna nanosa, ili zastupljenosti glinovite frakcije nanosa. Takođe, vrednost kritičnog tangencijalnog napona može se odrediti na osnovu Šildsovog dijagrama [5], iako se on, prvenstveno, koristi pri definisanju uslova pokretanja čestica nanosa sa rečnog dna. Ponekad se može pretpostaviti da je njegova vrednost jednaka nuli, ili se može odrediti kalibracijom.

Intenzitet taloženja nanosa, do koga dolazi pri količini nanosa u toku (G) većoj u odnosu na transportni kapacitet toka za nanos (T_c), određuje se primenom sledeće jednačine:

$$D_b = \beta v_{eff}(T_c - G) / q \quad (3)$$

gde je :

β – faktor turbulencije usled kiše ($\beta = 0,5$ kada do oticaja dolazi usled kiše, a u slučaju kada do oticaja dolazi usled otapanja snežnog pokrivača, ili usled primene melioracionih mera vrednost koeficijenta je $\beta = 1$)

v_{eff} – efektivna brzina tonjenja čestica nanosa (m/s)

q – intenzitet oticaja po jedinici širine toka (m²/s)

U modelu KINEROS erozija zemljišta usled površinskog oticaja (hidraulička erozija) opisuje intenzitet razmene nanosa između površinskog toka vode i zemljišta. Pretpostavlja se da je intenzitet erozije srazmeran efektivnoj koncentraciji nanosa u toku, odnosno razlici između stvarne koncentracije nanosa u toku i neke kritične koncentracije pri kojoj dolazi do kretanja nanosa, što se može prikazati na sledeći način:

$$e_h = c_g (C_m - C_s) A \quad (4)$$

gde je:

e_h – hidraulička erozija

C_m – koncentracija nanosa u toku u uslovima ravnotežnog transportnog kapaciteta toka za nanos

$C_s = C_s(x, t)$ – stvarna koncentracija nanosa u toku

c_g – koeficijent intenziteta prenosa [T^{-1}]

Pri tome, intenzitet ove vrste erozije zavisi od međusobnog odnosa između tangencijalne sile vode, koja teži da deliče zemljišta uvuče u tok, i sile gravitacije, koja teži da deliče zemljišta zadrži na površini terena. Na osnovu jednačine (4) vidi se da veličina hidrauličke erozije, u značajnoj meri, zavisi od transportnog kapaciteta toka i vrednosti koeficijenta intenziteta prenosa.

U modelu EUROSEM erozija zemljišta usled površinskog oticaja, koja, zapravo, predstavlja ukupnu eroziju zemljišta unutar brazdi, opisuje se u kontekstu opšte deformacione teorije, koju je predložio Smith [4]. Prema ovoj teoriji, procesi erozije zemljišta i taloženja nanosa predstavljaju samo dva vida u kojima se ispoljava deformacija padine pod uticajem površinskog slivanja vode. Oni odražavaju poremećaj ravnoteže hidrauličko-psamološkog režima površinskog oticaja. Koncentracija nanosa koja odgovara transportnom kapacitetu oticaja odražava ravnotežu između dva kontinualna međusobno suprotstavljena procesa erozije i taloženja. Kada dođe do poremećaja hidrauličko-psamološkog režima toka, eroziju zemljišta, koja se odigrava intenzitetom E_q , prati taloženje nanosa, intenzitetom wCv_s , koji je jednak proizvodu širine toka (w), koncentracije nanosa u toku (C) i brzine taloženja

delića nanosa (v_s). Ukupni bilans između intenziteta erozije zemljišta i intenziteta taloženja nanosa pod uticajem površinskog oticaja može se opisati na sledeći način:

$$DF = E_q - wCv_s \quad (5)$$

Prema opštoj teoriji Smitha, koncentracija nanosa koja odgovara transportnom kapacitetu toka za nanos (TC), predstavlja onu koncentraciju nanosa pri kojoj su intenzitet erozije zemljišta usled toka i intenzitet taloženja u ravnoteži. Znači, u uslovima ravnoteže, važi sledeća relacija:

$$DF = 0 \Rightarrow E_q = wCv_s \quad (6)$$

Na taj način, ukupni bilans između erozije i taloženja pod uticajem površinskog toka vode, može se predstaviti na sledeći način:

$$DF = wv_s(TC - C) \quad (7)$$

Na osnovu ovog izraza vidi se da, ukoliko je koncentracija nanosa u toku koja odgovara transportnom kapacitetu toka za nanos (TC) veća od stvarne koncentracije nanosa u toku (C), tj. ukoliko je $TC > C$, proces deformacije zemljišta odvijaće se u smeru erozije i, obratno, ukoliko je ispunjeno $TC < C$, deformacija će se odvijati u smeru taloženja nanosa.

Pri izvođenju relacije (7) pretpostavljeno je da su deliči zemljišta slobodni. Međutim, u realnim uslovima, erozija zemljišta je ograničena kohezijom zemljišnog materijala, tako da je stvarni intenzitet erozije manji u odnosu na onaj koji se dobija primenom jednačine (7). Uticaj kohezije na smanjenje maksimalnog intenziteta erozije izražava se uvođenjem koeficijenta β u jednačinu (7), tako da se ona može izraziti na sledeći način:

$$DF = \beta wv_s(TC - C) \quad (8)$$

gde je:

β – koeficijent efikasnosti erozije.

Prema definiciji, pri taloženju nanosa, tj. pri uslovu $DF < 0$ ($TC < C$), vrednost koeficijenta je $\beta = 1$, dok pri eroziji zemljišta, tj. pri uslovu $DF > 0$ ($TC > C$), vrednost koeficijenta $\beta < 1$.

Može se primetiti da se pri opisivanju erozije zemljišta pod uticajem površinskog oticaja ne uzima u obzir veličina delića nanosa. Uticaj veličine delića na intenzitet erozije izražen je posredno, preko vrednosti koeficijenta erodibilnosti zemljišta. Zbog toga, ni jedan od opisanih modela ne omogućava opisivanje

selektivnog razaranja zemljišta prema granulometrijskom sastavu.

3.4 Modeliranje transportnog kapaciteta površinskog oticaja za nanos

Transportni kapacitet toka predstavlja maksimalnu količinu nanosa koju tok može da nosi, a da ne dođe do taloženja. Transportni kapacitet površinskog oticaja zavisi od karakteristika padavina i intenziteta oticaja, od veličine delića nanosa, njihove gustine i raspoloživosti u slivu. U literaturi ne postoji veliki broj jednačina kojima se opisuje transportni kapacitet površinskog oticaja. Često se koriste regresione jednačine dobijene na osnovu laboratorijskih i eksperimentalnih istraživanja, i jednačine kojima se opisuje transportni kapacitet aluvijalnih vodotoka.

Transportni kapacitet toka za nanos u modelu WEPP određuje se u funkciji tangencijalnog napona toka (τ):

$$T_c = k_t \tau^{3/2} \quad (9)$$

gde je:

k_t – transportni koeficijent.

U modelu KINEROS transportni kapacitet površinskog oticaja opisuje se na osnovu koncentracije nanosa koja odgovara transportnom kapacitetu toka. Dakle, transportni kapacitet toka za nanos predstavlja maksimalnu koncentraciju nanosa u toku, pri kojoj ne dolazi ni do erozije zemljišta, ni do taloženja nanosa. U toku eksperimentalnih istraživanja kretanja plitkog sloja vode po površini zemljišta, Govers [2] je ustanovio da je transportni kapacitet površinskog oticaja srazmeran raspoloživoj snazi površinskog toka za održavanje čestica nanosa u pokretu, odnosno razlici između stvarne snage toka (ω) i njene kritične vrednosti (ω_{cr}), što se može prikazati sledećom relacijom:

$$TC = c(\omega - \omega_{cr})^\eta \quad (10)$$

gde su:

c , η – koeficijenti, dobijeni eksperimentalnim putem, čije vrednosti zavise od veličine delića nanosa.

Snaga toka je, prema definiciji, jednaka proizvodu brzine toka (u) i nagiba površine terena (I), tj.

$$\omega = u I \quad (11)$$

Kritična vrednost snage toka predstavlja snagu toka po jedinici površine koja je potrebna za pokretanje razorenih delića zemljišta, i, prema Goversu, njena

vrednost je $\omega_{cr} = 0,4$ cm/s. Efektivna snaga površinskog toka $\omega - \omega_{cr}$ predstavlja raspoloživu energiju toka u jedinici vremena koja se utroši na održavanje čestica nanosa u pokretu. Pri izvođenju izraza (10), Govers je koristio zrna zemljišta veličine od 50 do 150 μ m.

I u modelu EUROSEM, transportni kapacitet toka za nanos opisuje se preko koncentracije nanosa koja odgovara uslovima transportnog kapaciteta. Međutim, za razliku od modela KINEROS, u ovom modelu se posebno definiše transportni kapacitet toka za nanos unutar brazdi i transportni kapacitet toka za nanos između brazdi. Transportni kapacitet toka za nanos unutar brazdi opisuje se primenom relacije (10), koja se koristi i u modelu KINEROS.

Na delu između brazdi, transportni kapacitet toka se opisuje na osnovu modifikovane snage toka (Ω), dobijene prema eksperimentalnim istraživanjima Everaerta [4]:

$$TC = \frac{b}{\rho_s q} ((\Omega - \Omega_c)^{0,7/n} - 1)^n \quad (12)$$

pri čemu je:

n , b – koeficijenti dobijeni eksperimentalnim putem ($n = 5$, dok vrednost koeficijenta b zavisi od veličine zrna nanosa: $b = (19 - d_{50}/30)/10^4$)

Ω_c – kritična Bagnoldova snaga toka, koja se definiše na sledeći način:

$$\Omega_c = \frac{(0,5u_{*c}^2 u)^{3/2}}{h^{2/3}} \quad (13)$$

gde je:

u_{*c} – kritična brzina toka, koja se definiše na sledeći način:

$$u_{*c} = \sqrt{\theta(\rho_s - 1)gd_{50}} \quad (14)$$

pri čemu je:

θ – bezdimenzionalni tangencijalni napon ("Šildsov broj")

Pojam modifikovane snage toka (Ω) prvi je uveo Bagnold (1966) i izrazio ju je na sledeći način:

$$\Omega = \omega^{1,5} / h^{2/3} \quad (15)$$

Iako se u svakom od pomenutih modela transportni kapacitet toka za nanos opisuje primenom različitih jednačina, u osnovi su u njima korišćena dva osnovna

pristupa: pristup na bazi kritičnog tangencijalnog napona (WEPP), prema kome je transportni kapacitet toka srazmeran razlici između stvarnog i kritičnog tangencijalnog napona, i energetski pristup (KINEROS i EUROSEM), prema kome je transportni kapacitet toka srazmeran raspoloživoj snazi toka za održavanje čestica nanosa u pokretu. Pri tome, u modelu WEPP transportni kapacitet toka za nanos definiše se na osnovu količine nanosa pri kojoj ne dolazi ni do erozije ni do taloženja nanosa, dok se u modelima KINEROS i EUROSEM transportni kapacitet toka za nanos definiše na osnovu koncentracije nanosa.

4. ZAKLJUČAK

U radu je dat pregled i prikaz osnovnih karakteristika nekoliko modela koji se danas u svetu koriste pri opisivanju erozije i transporta nanosa u slivovima. Modeli ilustruju različite pristupe koji se primenjuju pri opisivanju geneze i transporta nanosa u slivovima. Između njih postoje značajne razlike u procesima koje oni predstavljaju i načinima na koji se oni predstavljaju. Fizički modeli su značajno bolji u odnosu na empirijske modele, jer uzimaju u obzir suštinske procese i mehanizme pri genezi i transportu nanosa. Međutim, na sadašnjem nivou razvoja nauke, još uvek ne postoje u potpunosti fizički modeli. Može se reći, da većina modela predstavlja mešavinu empirijskih, konceptualnih i fizičkih modela. U svim, do sada poznatim modelima, u pojedinim njihovim segmentima, nalazi se po neka empirijska jednačina i po neki parametar koji je potrebno kalibrirati. Zapravo, kalibracioni parametri odražavaju određeni stepen neizvesnosti svakog takvog modela.

U cilju što realnijeg prikaza procesa na slivu potrebno je da se modeli geneze i transporta nanosa nadovezuju na hidrološke modele, kojima se opisuje transformacija padavina u oticaj.

Problem većine fizičkih modela je potreba za velikim brojem ulaznih parametara sliva. To ograničava njihovu primenu samo na one slivove na kojima su preuzeta sva potrebna merenja i za koje postoje razvijene baze podataka o svim neophodnim karakteristikama sliva. Verifikacija ovih modela uopšte ne predstavlja lak zadatak, zbog čega je teško proveriti njihovu efikasnost. Svaki od pomenutih modela verifikovan je samo na malom broju slivova. U cilju provere efikasnosti modela neophodni su čitavi timovi stručnjaka različitih profila koji bi radili na pripremi svih potrebnih baza podataka o

traženim karakteristikama sliva. Sve to iziskuje i veliki broj merenja i značajna finansijska ulaganja.

Modeli prikazani u radu mogu se svrstati u jednu od dve grupe. Na jednoj strani se nalaze složeni konceptualni i modeli zasnovani na fizičkim zakonima u kojima su na veoma detaljan način prikazani svi procesi koji se modeliraju, a na drugoj strani se nalaze modeli u kojima su značajno pojednostavljeni procesi. Ova druga grupa modela sadrži uglavnom empirijske jednačine. Pri izboru odgovarajućeg modela pomoću koga bi se analizirali procesi geneze i transporta nanosa u slivu, korisnici modela treba da se odluče između ova dva ekstremna slučaja. Pri tome, izbor odgovarajućeg modela zavisi i od cilja koji se njime želi postići. Ukoliko su korisnici modela stručnjaci koji se bave korišćenjem i zaštitom zemljišta i voda na nacionalnom ili regionalnom nivou, pa stoga, nemaju vremena ni interesa da se fokusiraju na jedan određeni sliv, tada bi oni trebalo da koriste empirijske modele. Primena empirijskih modela je znatno jednostavnija i brža u odnosu na fizičke modele. S druge strane, ukoliko korisnici modela žele da, na što realniji način, opišu procese geneze i transporta nanosa u okviru jednog sliva, bez obzira na vreme i količinu informacija koja je za to potrebna, onda, svakako, treba da se odluče na primenu fizičkih modela.

LITERATURA

- [1] Flanagan, D.C., Nearing M.A. (1995): *USDA – Water Erosion Prediction Project: Technical Documentation*. NSERL Report No. 10, West Lafayette, Ind. USDA-ARS-NSERL
- [2] Govers, G. (1991) *Spatial and temporal variations in splash detachment: a field study*. Catena Supplement 20, 15-24
- [3] Morgan R.P.C. (1990) *Soil Erosion and Conservation*, Silsoe College, Cranfield University, Silsoe, Bedford MK45 4DT, United Kingdom
- [4] Morgan R.P.C., Quinton J.N., Smith R.E., Govers G., i dr. (1998): *EUROSEM, European Soil Erosion Model: Documentation and User Guide*, Silsoe College, Cranfield University, Silsoe, Bedford MK45 4DT, United Kingdom
- [5] Muškatirović D. (1979) *Regulacija reka*, Građevinski fakultet, Beograd

- [6] Russels S. Harmon, William W. Doe (editors) (2001), *Landscape Erosion and Evolution Modeling*, Kluwer Academic/ Plenum Publishers, New York
- [7] Wischmeier W.H., Smith D.D (1978): *Predicting Rainfall Erosion Losses, A guide to conservation planning Agriculture Handbook No 537*, USDA, Washington D.C
- [8] Woolhiser et al., 1990; D.A. Woolhiser, R.E. Smith and D.C. Goodrich, 1990. *KINEROS, Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual*. USDA-ARS, No.7 (1990).

REVIEW OF SOIL EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT MODELS IN RIVER BASINS

by

Mr Vesna ĐUKIĆ, asistent, dipl. građ. inž.
Dr Slobodan PETKOVIĆ, red. prof., dipl. građ. inž.
Faculty of Forestry, Kneza Višeslava 1, Belgrade

Summary

In mountainous regions of Serbia soil erosion is of critical concern to many land management agencies because owing to current land use activities, its intensity considerably exceeds the allowable rates which would not have negative ecological consequences on agricultural land. Taking into consideration that sediment yield is measured only at a small number of larger watercourses, and often even by applying inadequate methodologies, the application of soil erosion and sediment transport models appears as a feasible alternative to simulate and study the consequences of land-use activities on the nature.

Hence, erosion and sediment transport models provide the necessary information for organizing the best management practices on a watershed scale, aimed to minimize or mitigate the detrimental effects of land uses. The paper reviews soil erosion and sediment transport models actually used at watershed scale, pointing out their advantages and shortcomings, thus helping to make the right choice when selecting the model to be used.

Key words: soil erosion, sediment transport, overland flow, transport capacity, basin

Redigovano 25.11.2009.