

КРИТИЧКА АНАЛИЗА САВРЕМЕНИХ МОДЕЛА ЕРОЗИЈЕ И ТРАНСПОРТА НАНОСА СА ПОСЕБНИМ ОСВРТОМ НА ПРИМЕНУ У БУЈИЧНИМ СЛИВОВИМА

Весна Ђукић⁸

Универзитет у Београду, Шумарски факултет⁸

Апстракт: С обзиром да се у Србији пронос наноса осматра и мери само на малом броју већих водотока и то често применом неодговарајуће методологије, модели ерозије земљишта и транспорта наноса представљају све значајније средство помоћу кога је могуће проценити количину разореног земљишта на неком подручју или количину наноса која пристиже до неког водотока. Ерозиони и транспортни процеси у бујичним сливовима још увек нису у довољној мери изучени. У Србији се они често описују применом емпиријских израза, без значајнијих покушаја да се опишу физички процеси и механизми који доводе до ових процеса. Хидрауличко-хидролошки режим бујичних токова карактерише нагла појава и кратко трајање изузетно јаким бујичних таласа који са собом носе велике количине наноса. На основу спроведених анализа у овом раду закључено је да се брза динамика дешавања псамолошких процеса у бујичним сливовима може на адекватан начин приказати применом физички базираног дистрибутивног модела SHETRAN, који би се применио на појединачне интензивне епизоде падавина.

Кључне речи: ерозија, транспорт наноса, површински отицај, транспортни капацитет тока, слив

Abstract: Sediment yield in Serbia is measured only at a small number of larger streams, often using inappropriate methodology. Therefore, models of soil erosion and sediment transport become very important tool by which it is possible to estimate the amount of land destroyed in some area or the amount of sediment that arrives to a watercourse. Erosion and sediment transport processes in torrent catchments are still not sufficiently investigated. In Serbia, they are often described using the empirical expressions, with no significant attempts to describe the physical processes and mechanisms that lead to these processes. Hydraulic-hydrological regime of torrent streams is characterized by abrupt onset and short duration of extremely heavy torrential waves that carry large amounts of sediments. Based on the analyses in this paper it can be concluded that rapid dynamics of occurring of erosion and sediment transport processes in torrential catchments can be adequately described using physically based SHETRAN model, which would be applied to individual episodes of intense rainfall.

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

⁸ Кнеза Вишеслава 1, 11000 Београд, vesna.djukic@sfb.bg.ac.rs

1. УВОД

Ерозија земљишта и транспорт наноса доводе до великих еколошких и водопривредних проблема, који се манифестују како у зони ерозионих процеса, где долази до смањења продуктивности земљишта, тако и изван подручја ерозионе продукције наноса, где интензивни транспорт наноса доводи до исталожавања наноса и загађујућих материја у водним токовима, акумулацијама, резервоарима и другим хидротехничким објектима, што смањује капацитет ових објеката и негативно утиче на квалитет воде у водотоцима.

Процеси ерозије и транспорта наноса у бујичним сливовима још увек нису у довољној мери изучени. Специфичан хидрауличко-хидролошки режим бујичних токова испољава се у појави бујичних таласа, са врло брзим надоласком и кратким трајањем, при чему они тада транспортују велике количине чврсте материје.

У Србији се пронос наноса осматра и мери само на малом броју већих водотока, при чему је често методологија која се при томе примењује неадекватна, јер се примењују само дневна мерења. Оваква учесталост мерења често доводи до погрешних резултата о стварној величини проноса наноса, посебно, у случају бујичних водотока, јер се дешава да талас са великом концентрацијом наноса прође између два осматрања. При томе, код мањих водотока, таласи већих вода учествују са преко 80% у укупном годишњем транспорту наноса (Петковић, Костадинов, 1989).

Модел ерозије земљишта и транспорта наноса представљају један од начина помоћу кога је могуће проценити количину разореног земљишта на неком подручју или количину наноса која пристиже до неког водотока, што је важно при планирању мера за заштиту земљишта од ерозије, као и при пројектовању нових акумулација, јер може да дâ одговор на питање да ли ће доћи до засипања акумулације наносом, као и колики мртав простор треба одвојити за смештање наноса.

У раду је приказана критичка анализа савремених модела ерозије и транспорта наноса са циљем избора модела који би на најреалнији начин описивао ове процесе у брдско-планинским подручјима Србије. Да би се процеси ерозије и транспорта наноса у сливу могли приказати на реалан начин потребно је да модел омогући приказ развијености ових процеса у различитим деловима слива у току времена под утицајем појединачних кишних епизода, водећи рачуна о физичким законима и механизмима који утичу на овај процес.

2. ПРИКАЗ И АНАЛИЗА САВРЕМЕНИХ МОДЕЛА ЕРОЗИЈЕ И ТРАНСПОРТА

НАНОСА У СЛИВУ

Математички модели се могу поделити на различите начине, а врста модела која ће се применити зависи од конкретних услова који владају у сливу, од количине

распоживих података и од циљева који се желе постићи применом одговарајућег модела.

У зависности од тога који временски период се описује применом математичког модела, они могу бити: модели епизода и модели континуалних симулација. Применом модела епизода описује се тренутно стање у сливу у погледу ерозије и транспорта наноса услед једне кишне епизоде. Применом континуалних модела описују се промене у сливу настале у дужем временском периоду, у коме је било и кишних периода и периода без кише. Проблем са континуалним моделима симулације односи се на потребу за прикупљањем великог броја улазних података о климатским карактеристикама и коришћењу земљишта у току године. Њиховом применом могуће је анализирати одговор слива на велики број кишних епизода које доводе само до мале величине отицаја и деградације земљишта, због чега су непрактични при анализи ерозионих и транспортних процеса у сливовима у којима се највећа количина укупног годишњег транспорта наноса пронесе у току неколико бујичних таласа.

У зависности од тога да ли се узима у обзир просторна променљивост физичких карактеристика слива при анализи транспорта наноса, модели се могу поделити на глобалне и дистрибутивне. У глобалним моделима претпостављају се хомогени услови на површини слива и користе се јединствене вредности улазних параметара. У дистрибутивним моделима узима се у обзир просторна променљивост физичких карактеристика слива. Површина слива се дискретизује на одређени број елементарних делова, унутар којих се претпостављају униформне физичке карактеристике и, хомогени услови у погледу генезе и транспорта наноса. Применом дистрибутивних модела псамолошки процеси на сливу се реалније описују у односу на глобалне моделе.

У зависности од нивоа расположивог знања о појави која се описује, модели могу бити: емпиријски, концептуални и физички. Емпиријски модели не узимају у обзир физичке законе који утичу на њих. Они су релативно једноставни и захтевају мали број података. Заснивају се на дефинисању најзначајнијих параметара од којих ерозија земљишта и транспорт наноса зависе, и, затим се, на основу осматрања, експерименталних мерења и статистичких техника успоставља повезаност између дефинисаних улазних параметара и ерозије земљишта или проноса наноса. Концептуални модели представљају полуфизичке моделе, јер они узимају у обзир физичке законитости које утичу на неки процес, у овом случају на транспорт наноса, али уз знатна поједностављења. Овакав приступ се користи када су процеси који се описују јако сложени и не могу се у потпуности објаснити сви механизми који при томе делују. Процеси ерозије и транспорта наноса у сливу описују се на најреалнији начин анализом различитих процеса у сливу који доводе до ерозије и транспорта наноса, уз објашњење њихових међусобних веза и интеракција на основу физичких законитости. Овакви модели представљају "физички базиране" моделе, јер се у њима користе параметри који се или могу измерити или одредити применом одговарајућих једначина, при чему је број параметара које је потребно калибрисати код ових модела знатно мањи него у случају емпиријских модела.

У табели 1 приказана је категоризација модела ерозије и транспорта наноса, анализираних у овом раду, према разматраним критеријумима.

Табела 1. Категоризација модела ерозије и транспорта наноса

Назив модела	Критеријум поређења						
	Временски период симулације		Просторна променљивост физичких карактеристика слива		Ниво расположивог знања о појави која се описује		
	Модел епизода	Континуални модели	Глобални	Дистрибутивни	Емпиријски	Концептуални	Физички
USLE		X	X		X		
MUSLE	X		X		X		
RUSLE		X	X		X		
AGNPS		X		X	X		
ANSWERS		X		X			X
CREAMS	X			X			X
WEPP	X			X			X
KINEROS	X						X
EUROSEM	X						X
SHETRAN	X			X			X

2.1 Емпиријски модели

Једна од најпознатијих емпиријских метода за прорачун губитака земљишта деловањем ерозионих фактора је "Универзална једначина губитака земљишта" (USLE) (Wiscmeier, W. et al., 1978). Ова метода је развијена на основу велике базе експерименталних података добијене истраживањима на пољопривредним земљиштима у САД. Њеном применом одређује се годишња количина еродираног земљишта на појединачним обрадивим парцелама максималне површине до 1ha, множењем неколико различитих фактора којима се описује ерозиона снага кише, еродибилност земљишта, дужина падине, нагиб падине, биљни покривач и примењене противерозионе мере у сливу. Једна од предности ове једначине је њена релативна једноставност и мали број потребних улазних података у поређењу са другим сложенијим моделима. Међутим, проблем је што је процес ерозије земљишта представљен на поједностављени начин који не одговара реалности. Ова једначина је касније модификована и побољшана и настале су две једначине: MUSLE и RUSLE (Renard et al., 1991). Једначина MUSLE настала је са циљем да се одреди количина разореног земљишта у току једне кишне епизоде.

AGNPS (AGricultural Non-Point Source Pollution Model) (Heathman, G.C. et al., 2008) је дистрибутивни модел помоћу кога је могуће описати кретање воде, транспорт наноса по фракцијама и транспорт загађујућих материја са сливова намењених пољопривредној производњи. Процеси ерозије и транспорта наноса у

планинским деловима слива описани су применом једначине USLE, док је кретање наноса у сливу описано применом једначине континуитета за нанос, за устаљено кретање наноса.

2.2 Физички базирани модели

Физички модели, при описивању ерозионих и транспортних процеса на сливу, полазе од суштинске повезаности површинског отицаја и продукције и транспорта наноса. Због тога, модели којима се описују псамолошки процеси на сливовима, углавном, се ослањају и надовезују на хидролошке моделе и представљају њихову надоградњу. Применом хидролошког дела модела обично се прорачунавају инфилтрација, отицај, испаравање воде са земљишта, потрошња воде на транспирацију од стране биљке, задржавање воде у депресијама на површини терена и кретање воде кроз земљиште. Вредности отицаја и висине слоја воде на површини терена, добијене применом хидролошког дела модела, заједно са физичким карактеристикама слива, представљају улазне податке у моделу ерозије и транспорта наноса у сливу. Концептуалну основу модела CREAMS, ANSWERS, WEPP, KINEROS и SHETRAN чини алгоритам за симулирање ерозије земљишта и транспорта наноса који су формулисали Meyer и Wischmeier (L.D. Meyer, W.H. Wischmeier, 1978).

ANSWERS (the Areal Nonpoint Source Watershed Response Simulation) (Beasley i dr., 1980) је један од првих модела са основном наменом да опише хидролошко и псамолошко понашање равничарског слива. Применом псамолошког дела модела могуће је одредити количину разореног и акумулираног земљишта услед кише и површинског отицаја и приказати динамику ерозионих и транспортних процеса у времену и простору, чиме је овај модел значајно бољи у односу на раније емпиријске моделе. Применом модела добијају се вредности отицаја и ерозије.

CREAMS (The Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems model) (Knisel, 1980) модел је развијен са циљем да омогући процену утицаја загађујућих материја са пољопривредних парцела на квалитет воде у водотоцима. Његовом применом могуће је описати хидролошке, ерозионе и транспортне процесе у оквиру једне обрадиве парцеле, униформног начина коришћења земљишта и униформне топографије терена. У моделу су задржане емпиријске једначине у различитим алгоритмима при прорачуну отицаја и ерозије. Претпоставка о униформним педолошким карактеристикама и униформном начину коришћења земљишта не одговара реалним условима у сливу.

WEPP (The Watershed Erosion Prediction Project) (Nearing i dr, 1995) је формиран са циљем да се њиме опишу процеси ерозије земљишта, транспорта наноса и таложења наноса на појединим падинама слива, или на мањим сливовима, намењених пољопривредној производњи. Утицај различитих начина газдовања земљиштем на параметре отицаја и ерозије и транспорта наноса може се анализирати у делу модела у коме су описани процеси везани за земљиште.

Примена вегетационог дела модела омогућава приказ различитих фаза развоја биљке, продукцију биомасе за различите годишње и вишегодишње биљке.

Модел KINEROS (KINematic, EROsion Simulation) (Smith, 1995; Woolhiser et al., 1990) омогућава приказ и анализу хидролошких процеса и ерозионо-транспортних процеса на мањем урбаном сливу, или сливу који је намењен пољопривредној производњи.

EUROSEM (The EUROpean Soil Erosion Model) (Morgan i dr., 1998) је формиран са циљем да омогући приказ ерозионих и транспортних процеса у сливу под утицајем појединачних епизода интензивних падавина, и да буде применљив за Европске климатске услове. Његовом применом могуће је прорачунати: количину задржане воде на вегетационом покривачу, кинетичку енергију падавина које директно или са лишћа падају на површину земље, количину воде која се задржава у депресијама на површини терена, количину разореног земљишта под утицајем кише и отицаја, количину акумулираног земљишта и транспортни капацитет отицаја.

SHETRAN је настао проширењем првобитног SHE (Sytème Hydrologique Europeen) хидролошког модела, који је формиран у оквиру заједничког пројекта Института за хидрологију из Велике Британије (сада је то Центар за екологију и хидрологију), Данског Института за хидраулику и француске фирме SOGREAH (Abbott i dr, 1986). SHETRAN је настао у оквиру Универзитета из Newcastle-a. Применом овог модела могуће је на интегралан начин описати хидролошко и псамолошко понашање слива кроз међусобну интеракцију неколико различитих модула у којима су описани процеси евапотранспирације и интерцепције, модула у коме је описано кретање воде по површини терена и кроз хидрографску мрежу, модула у коме је описано кретање воде кроз незасићену средину и кроз засићену средину и модула у коме су описани ерозиони и транспортни процеси.

У наставку рада приказаће се једначине које се користе у разматраним моделима при описивању хидролошких и псамолошких процеса у сливу.

2.2.1 Приказ хидролошких процеса у физички базираним моделима

Квалитет модела ерозије и транспорта наноса, у значајној мери зависи од квалитета хидролошког дела модела, и с тим у вези од тачности предвиђања инфилтрације. У моделима ANSWERS и WEPP инфилтрација се прорачунава применом Green-Amptonove једначине (Mein i Larson, 1973). У моделу CREAMS површински отицај, а тиме и инфилтрација, одређују се применом SCS методе (USDA-SCS, 1985). Ова метода се веома много користи у инжењерској пракси због своје једноставности, и због тога што се у њој висина ефективних падавина изражава на основу врсте земљишта, врсте и густине вегетационог покривача, хидролошких услова на сливу и влажности земљишта на почетку кише. Међутим, један од главних недостатака везан за примену ове методе је у томе што се применом ове методе не

могу описати промене отицаја у току времена. У моделу KINEROS инфилтрација се прорачунава применом једначине Hillela (Hillel, 1971). У SHETRAN-у се користи Ричардсова једначина (Richards, 1931), која је базирана на физичким законима и помоћу које се могу пратити промене влажности земљишта у току времена.

Кретање воде низ падине слива и кроз хидрографску мрежу описано је применом упрошћења Сан-Венанових једначина у облику модела кинематског таласа и модела дифузионог таласа. С обзиром да модел дифузионог таласа чине једначина континуитета неустаљеног течења и једначина устаљеног, неједноликог течења, његовом применом је могуће на реалнији начин описати неустаљеност и неједноликоност течења бујичних таласа у односу на модел кинематског таласа, кога чине једначина континуитета неустаљеног течења и једначина устаљеног, једноликог течења. Модел дифузионог таласа је примењен само у моделу SHETRAN.

2.2.2 Приказ псамолошких процеса у физички базираним моделима

Ерозија земљишта услед кише. У моделима CREAMS, EUROSEM и WEPP посебно су анализирани процеси ерозије земљишта унутар бразди и на делу између бразди. Еродирајућа способност кише, која доводи до разарања земљишта на делу између бразди, квантитативно се изражава на основу кинетичке енергије кише, применом емпиријске једначине у којој фигуришу и параметри из једначине USLE. Параметри из ове једначине користе се и у моделу ANSWERS. С обзиром да се применом оригиналне једначине USLE не описују посебно ерозија земљишта унутар бразди и између бразди, њени параметри се користи у условима који не одговарају сасвим условима за које су добијени, што може довести до погрешних представа о стварним интензитетима ерозије.

Применом модела KINEROS одређује се јединична продукција наноса под утицајем кише претпостављајући да је она сразмерна квадрату интензитета падавина. У моделу SHETRAN интензитет ерозије земљишта под утицајем кише одређује се применом једначине у којој је успостављена повезаност између ерозије земљишта услед кише и суме квадрата импулса кише у току трајања те кише (Styczen и Hagh-Schmidt, 1988). У овој једначини узима се у обзир и заступљеност површинског и вегетационог прекривача на земљишту, као и отпорност земљишта на ерозију. Ово је један од најзначајнијих приступа при одређивању ерозије земљишта под утицајем кише, за који се сматра да на начин близак реалности описује овај процес (Bathurst, 1995).

Ерозија земљишта услед површинског отицаја. У моделима CREAMS, WEPP и EUROSEM претпоставља се да под утицајем површинског отицаја долази до разарања земљишта унутар бразди. Интензитети ерозије услед површинског отицаја у моделима CREAMS и ANSWERS одређују се применом емпиријске једначине у којој

фигуришу параметри K, C и P из једначине USLE, који се и у овом случају користе у другачијим условима у односу на оне за које су добијени. У моделима WEPP и SHETRAN претпоставља се да је интензитет ерозије земљишта под утицајем површинског отицаја сразмеран ефективном тангенцијалном напону на контакту земљишта и воде, односно вишку тангенцијалног напона у односу на његову критичну вредност, при којој долази до покретања делића наноса. Константа пропорционалности је коефицијент еродибилности који описује отпорност земљишта на ерозију и који се одређује калибрацијом модела. У моделу KINEROS претпоставља се да је јединична продукција наноса услед површинског отицаја сразмерна ефективној концентрацији наноса у току, односно разлици између концентрације наноса која одговара транспортном капацитету тока за нанос и стварне концентрације наноса у току. У моделу EUROSEM ерозија земљишта услед површинског отицаја описује се у контексту опште деформационе теорије, коју је предложио Smith (Smith, 1995). Према овој теорији, способност површинског отицаја да разори честице земљишта не зависи од количине материјала коју ток носи са собом, већ само од енергије коју ток поседује.

Транспортни капацитет површинског отицаја за нанос. Транспортни капацитет површинског тока на падинама слива зависи од нагиба падине, интензитета падавина, хидрауличких карактеристика тока и карактеристика наноса. Већина постојећих једначина су емпиријске и изведене су за равничарске речне токове у којима су дубине воде релативно велике, а нагиби терена мали, па се услови кретања наноса на падинама слива значајно разликују у односу на услове за које су једначине добијене.

У физички базираним модела транспортни капацитет површинског отицаја одређује се применом неке од једначина за прорачун транспортног капацитета отворених токова. У моделу EUROSEM, транспортни капацитет тока за нанос описује се преко концентрације наноса која одговара транспортном капацитету. У моделима CREAMS, ANSWERS и WEPP користи се Yalinova једначина. У моделима SHETRAN и KINEROS, у зависности од услова на сливу, могу се применити Yalinova једначина, једначина Engelund-а и Hansen-а (Engelund, Hansen, 1967) и једначина Akers-а и Vajt-а (Ackers, White, 1973).

У Yalin-овој једначини претпоставља се да је транспортни капацитет тока за нанос сразмеран вишку тангенцијалног напона у односу на његову критичну вредност, што се одређује анализом салтационог кретања делића наноса. Применом једначине Engelund-а и Hansen-а може се описати транспортни капацитет и вученог и суспендованог наноса, не улазећи посебно у различите механизме који доводе до њиховог кретања. Једначина Akers-а и Vajt-а изведена је груписањем физичких величина које утичу на транспорт наноса у одређени број бездимензионих бројева применом димензионе анализе. Метода се заснива на енергетском приступу Багнолда, и у њој се успоставља веза између концентрације наноса и параметара покретљивости зрна који зависе од брзине тока, брзине трења и висине воде на површини терена.

У циљу дефинисања опште релације помоћу које би се описао транспортни капацитет површинског отицаја, Julien i Simons (Julien i Simons, 1985) су извршили анализу резултата многобројних теоретских и експерименталних истраживања у овој области. На основу истраживања двофазног тока на нагнутим сливним падинама, полазећи од димензионалне анализе, успостављене су семиемпиријске релације између основних хидрауличких и геометријских параметара тока. Анализирано је 13 емпиријских релација за прорачун вученог или укупног наноса кроз алувијалне водотоке (међу којима су биле и једначине Yalin-a, Engelund-a и Hansen-a и Akers-a и Vajt-a) у смислу заступљености битних параметара за транспорт наноса падинама слива. Закључено је да су најзначајнији параметри од којих зависи транспортни капацитет површинског отицаја: нагиб терена (I_d) и отицај (q), као и да се транспортни капацитет површинског отицаја (g) може приказати у следећем облику:

$$g = \alpha I_d^\beta q^\gamma \quad (1)$$

Кроз анализу резултата многобројних теоријских и експерименталних истраживања других аутора, закључено је да се транспортни капацитет површинског отицаја може приказати на одговарајући начин уколико се вредности експонента β налазе у интервалу од 1.2 до 1.9, а вредности експонента γ у интервалу од 1.4 до 2.4. Вредности ових експонената налазиле су се у дозвољеним оквирима једино у случају једначине Engelunda и Hansena ($\beta=1.5$ и $\gamma=2.0$). Крајњи закључак њихових истраживања био је да је само применом једначине Engelunda и Hansena могуће на прави начин описати транспортни капацитет површинског отицаја за нанос. Једначина Engelund-a и Hansen-a користи се у SHETRAN моделу.

Кретање наноса низ падине слива и кроз хидрографску мрежу. Прорачун проноса наноса у сливу врши се заједно са прорачуном ерозионе продукције и акумулације наноса. Кретање наноса низ падине слива ка хидрографској мрежи слива и кроз водотоке у анализираним моделима описано је применом једначине континуитета за нанос. При томе, у моделима WEPP, ANSWERS и CREAMS претпостављено је устаљено кретање наноса у једном правцу, док је у моделима KINEROS и EUROSEM претпостављено неустаљено кретање наноса у једном правцу. У моделу SHETRAN користи се проширена једначина континуитета којом се описује кретање наноса у два правца, односно раванско кретање наноса.

2.3 Критичка анализа применљивости различитих модела ерозије и транспорта наноса у бујичним сливовима

На основу приказаних анализа у раду може се закључити да примена физички базираних дистрибутивних модела омогућава најреалнији приказ ерозионих и транспортних процеса у сливу. Зато је у табели 2 приказана анализа физички базираних модела на основу неколико важних критеријума који су формулисани у облику питања: Колика је максимална површина слива за коју се модел може применити? Који тип површинског отицаја је могуће описати применом модела? Које врсте ерозионих процеса се могу описати применом модела? Да ли је применом модела могуће приказати промене ерозионих и акумулационих процеса у сливу у току времена? Да ли је применом модела могуће анализирати ерозионе процесе у сливу са површина различитих намена ?

Табела 2. Поређење неколико физички базираних модела према различитим критеријумима

	Назив модела					
Карактеристике програмског пакета	ANSWERS	CREAMS	WEPP	KINEROS	EUROSEM	SHETRAN
Величина слива	<50км ²	<4км ²	<2.6км ²	<1км ²	мали слив	<2000км ²
Просторна дискретизација	грид	грид	грид	хомогене површине	хомогене површине	грид
Тип површинског отицаја						
Хортонов тип	да	да	да	да	да	да
Засићен тип	не	не	не	не	не	да
Ерозиони процеси						
Под утицајем кише и површинског отицаја	да	да	да	да	да	да
Појава бразди	не	да	да	не	да	не
Појава јаруга	не	да	не	не	не	не
Клизишта	не	не	не	не	не	не
Начин коришћења земљишта	Пољоприв земљиште	пољоприв земљиште	пољоприв земљиште	пољоприв земљиште	пољоприв земљиште	различите врсте вегетације
Резултати						

Псамограм	не	не	не	да	да	да
-----------	----	----	----	----	----	----

У табели 3 дат је преглед свих једначина које се користе у савременим физички базираним моделима ерозије и транспорта наноса у сливу.

Табела 3. Преглед једначина које се користе при описивању ерозије и транспорта наноса у сливу

ПРОЦЕС	Назив модела					
	ANSWERS	CREAMS	WEPP	KINEROS	EUROSEM	SHETRAN
Инфилтра-ција	Modif. Holtanova j-na	SCS metoda	Mein-Larsonova metoda	Hillelova j-na	Hillelova j-na	Ričardsova j-na
Кретање воде по површини терена	Кинематск и талас	Кинематск и талас	Кинематски талас	Кинематски талас	Кинематски талас	Дифузиони талас
Кретање наноса низ падине слива и кроз хидрогра фску мрежу:	Ј-на континуите та за устаљено кретање наноса	Ј-на континуите та за устаљено кретање наноса	Ј-на континуитета за устаљено кретање наноса	Ј-на континуитета за неустаљено кретање наноса	Ј-на континуите та за неустаљено кретање наноса	Ј-на континуитета за неустаљено кретање наноса
Трансп. капац. Површ. отицаја	Yalinova j-na	Yalinova j-na	Yalinova j-na	Yalinova j-na, Engelunda i Hansena, j-na Ackers-Vajt-a	j-na Goversa	Yalinova j-na, j-na Engelunda i Hansena, j-na Ackers-Vajt-a

На основу спроведених анализа може се закључити да је модел SHETRAN веома погодан за приказ псамолошких процеса у бујичним сливовима. У њему се на интегралан начин посматра кретање воде по површини терена, кроз незасићену средину и кроз засићену средину, због чега је могуће прецизније дефинисање услова влажности у земљишту на почетку кише, за коју је показано у оквиру (Авакумовић, 2000) да има значајан утицај на величину отицаја, а тиме и проноса наноса. Применом овог модела могу се анализирати ерозиони и транспортни процеси и у краћим и у дужим временским периодима, и то на сливу било које величине. Могу се узети у обзир различити начини коришћења земљишта у сливу. Успостављена просторна дискретизација на нивоу елемената грида у SHETRAN-у

омогућава да се успостави повезаност модела са ГИС-ом, при дефинсању просторно распоређених улазних параметара о карактеристикама слива и обради добијених резултата прорачуна. Применом модела дифузионог таласа при описивању кретања воде у сливу може се описати неустаљено и неједнолико кретање бујичних таласа. Ерозија земљишта услед кише је повезана са квадратом импулса кише у току трајања те кише, што је у складу са физичким законитостима овог процеса. Коефицијенти ерозије услед кише и услед површинског отицаја одређују се у току калибрације модела, што је по мишљењу аутора овог рада реалније него коришћење индекса еродибилности из једначине USLE у условима који се разликују у односу на оне услове за које је једначина добијена. Транспортни капацитет тока за површински отицај може се описати применом једначине Engelund-a i Hansena-a, за коју је показано да на одговарајући начин описује транспортни капацитет површинског отицаја.

3. ЗАКЉУЧАК

У раду је дат приказ карактеристика савремених модела ерозије и транспорта наноса у сливовима. Модели илуструју различите приступе који се примењују при описивању ерозије и транспорта наноса у сливу. Између њих постоје значајне разлике у процесима које они представљају и начинима на који су они представљени. Примена емиријских модела је знатно једноставнија и бржа у односу на физичке моделе. Физички модели су значајно бољи у односу на емперијске моделе, јер узимају у обзир суштинске процесе и механизме при продукцији и транспорту наноса. Већина физичких модела верификована је у равничарским сливовима, јер је постојала потреба да се одреди количина загађујућих материја, која заједно са наносом стиже у водотоке са пољопривредних парцела и доводи до великих еколошких проблема.

На основу спроведених анализа у овом раду закључено је да се изразито неустаљено кретање воде и великих количина наноса у бујичним таласима може на најреалнији начин описати применом модела SHETRAN, јер су у њему адекватно описани различити механизми који доводе до развоја ерозионих и транспортних процеса у бујичним сливовима.

4. НАПОМЕНА

Овај рад је реализован у оквиру пројекта „Истраживање климатских промена на животну средину: праћење утицаја, адаптација и ублажавање“ (III43007) који финансира Министарство за просвету и науку Републике Србије у оквиру програма Интегрисаних и интердисциплинарних истраживања за период 2011-2014. године.

5. ЛИТЕРАТУРА

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connel, P.E., Rasmussen, J.(1986): In introduction to the European Hydrological System- Systeme Hydrologique European, 'SHE', 1: history and philosophy of a physical-based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology* 87, 45-59.
- Ackers, P., White, W.R., (1973): Sediment transport: new approach and analysis ASCE *Journal of the Hydraulics Division* 99 (HY11), 2041-2060.
- Alonso, C.V., W.H.Neibling i G.R.Foster. (1981): Estimating sediment transport capacity in watershed modeling. *Transactions of the ASAE* 24(5): 1211-1220, 1226
- Avakumović, V. (2000): Analiza kretanja vode na površini i u zemljištu, magistarska teza, Građevinski fakultet, Beograd
- Bathurst, J.C. (2000): Physically-based erosion and sediment yield modelling: the SHETRAN concept. Water Resource Systems Research Laboratory, Department of Civil Engineering, University of Newcastle upon Tyne, Newcastle upon Tyne, UK.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F., Monke, E.J. (1980): ANSWERS: a model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, 938-944
- England, F., Hansen, E. (1967): A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknish Vorlag, Copenhagen.
- Flanagan, D.C., Nearing M.A. (1995): USDA – Water Erosion Prediction Project: Technical Documentation. NSERL Report No. 10, West Lafayette, Ind. USDA-ARS-NSERL
- Govers, G. (1991) Spatial and temporal variations in splash detachment: a field study. *Catena Supplement* 20, 15-24
- Heathman, G.C.; Flanagan, D.C.; Larose, M.; Zuercher, B.W. (2008): Application of the Soil At Water Assessment Tool and Annualized Agricultural Non-Point Source Models in the St. Joseph River Watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*. 63(6):552-568
- Hillel, D. (1971): Soil and water physical principles and processes. Academic Press, New York, NY. 288 pp.
- Holtan, H., (1961): A concept for infiltration estimates in watershed engineering. Report ARS-41-451, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture.
- Julien, P.Y. i D.B.Simons. (1985): Sediment transport capacity of overland flow. *Transactions of the ASAE* 28(3): 755-762.
- Knisel, W.G. (1980): CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. USDA Conserv. Res. Rep. 26. USDA-ARS, Washington, DC.
- Morgan R.P.C. (1990): Soil Erosion and Conservation, Silsoe College, Cranfield University, Silsoe, Bedford MK45 4DT, United Kingdom
- 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
- Muškatirović D. (1979) Regulacija reka, Građevinski fakultet, Beograd

- Mein, R.G., Larson, C.L. (1973): Modelling infiltration during a steady rain. *Water Resources research* 9 (2): 384-394.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswals, K., Chisci, G., Torri, D., Folly, A.J.V. (1998): The European soil erosion model (EUROSEM): Documentation and user guide. Silsoe College, Cranfield University.
- Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.I., Finkner, S.C., (1995): A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology. *Transactions of the ASAE* 32 (5), 1587-1593.
- Petković, S., Kostadinov, S. (1989): Studija antierozione zaštite akumulacije Selova, Šumarski fakultet, Beograd
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A. & McCool, D. K. (1991a) Predicting soil erosion by water—a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Report ARS-703, US Dept Agric, Agricultural Research Service
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A. & Porter, J. P. (1991b) RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation. *J. Soil Water Conserv.* 46(1), 30-33
- Russels S. Harmon, William W. Doe (editors) (2001), *Landscape Erosion and Evolution Modeling*, Kluwer Academic/ Plenum Publishers, New York
- Smith, R.E., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A., Unkrich, C.L. (1995): KINEROS – a kinematic runoff and erosion model. In: Singh, V.P.(Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Littleton, CO, pp. 697-732
- Smith, R.E., Goodrich, D., Quinton, J.N. (1995): Dynamic, distributed simulation of watershed erosion: the KINEROS 2 and EUROSEM models. *Journal of Soil and Water Conservation*
- Styczen, M. i Hogh-Schmidt, K. (1988): A new description of splash erosion in relation to rain drop sizes and vegetation. In: Morgan, R.P.C. i Rickson, R.J. (editors), *Agriculture: erosion assessment and modelling*. Commission of the European Communities, Proc Workshop, Rep. EUR 10860 EN, 147-184.
- USDA-SCS. (1985): *National Engineering Handbook, Section 4 - Hydrology*. Washington, D.C.USDA-SCS.
- Wischmeier W.H., Smith D.D (1978): *Predicting Rainfall Erosion Losses, A guide to conservation planning Agriculture Handbook No 537*, USDA, Washington D.C
- Woolhiser, D.A., Smith, R.E., Goodrich, D.C. (1990): *KINEROS, Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual*. USDA-ARS, No.7

CRITICAL ANALYSIS OF CONTEMPORARY MODELS OF EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT WITH A SPECIAL FOCUS ON APPLICATIONS IN TORRENTIAL CATCHMENTS

Vesna Đukić
Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet

SUMMARY

An overview of models of erosion and sediment transport was presented in this paper for the purpose of determination of the model, which could describe these processes in torrential catchments in a realistic way. The processes of erosion and sediment transport in torrential catchments are specific due to the sudden appearance of torrential waves of high intensity and short duration. Torrential waves can transport large amounts of sediments. Due to inadequate methodology of sediment transport measurement, which involves only daily measurements, it happens that a wave with a high concentration of sediment occurs between two observations and is not registered. Thus, the obtained results of sediment yields are often lower than their real values. The amount of sediment yield as well as the amount of degraded or accumulated soil can also be determined by applying erosion and sediment transport models.

The following models were described in this paper: USLE, MUSLE, RUSLE, AGNPS, ANSWERS, CREAMS, WEPP, KINEROS, EUROSEM and SHETRAN. The equations used to describe hydrological as well as erosion and sediment transport processes were analyzed. It was shown that the processes of erosion and sediment transport in torrential catchments can be described in a realistic way using distributed, physically-based models which could be applied to individual rain events.

On the basis of the analysis carried out in this paper it was concluded that SHETRAN is the best physically based distributed model which can be used to describe erosion, sediment transport and deposition processes in different parts of torrential catchments over time, for the following reasons: 1. It can be used for the modeling of coupled surface and subsurface water flow in river basins. In that way, the initial soil water content at the beginning of a rain could be described more precisely; 2. The processes of hydrological and erosion and sediment transport were described using physically-based equations (soil water movement is described using the Richards equation, the unsteady movement of torrential waves is described using diffusion approximation of Saint-Venant equations, erosion by raindrop and leaf drip impact is associated with momentum squared of raindrops and leaf drips reaching the ground, the soil erodibility coefficients of raindrop impact and overland flow are determined during the calibration phase, the transport capacity of both the overland flow and the streamflow are determined using the Engelund-Hansen equation); 3. SHETRAN gives a detailed description in time and space of the flow and transport in the basin, which can be visualized using animated graphical computer displays. This makes it a powerful tool

for use in studying the environmental impacts of land erosion and the effects of changes in land use and climate.