

## Моделирање ерозије земљишта примјеном рачунарско-графичких метода и географских информационих система

Велибор Спалевић, Милић Чуровић

**Сажетак.** *Површина земљишта, изложена гравитационим силама, дјеловању вјетра, воде и леда, континуирано се развија у оквиру просторних и временских размјера. Процеси ерозије који формирају површину копна изузетно су сложени и тешко их је квантитативно предвидјети на великим површинама. Даљинска детекција пружа важне податке који нам омогућавају да стекнемо увид у интеракције између физичких процеса и услова околине који контролишу ерозију и развој облика земљишних форми. Недавни напредак у технологијама мапирања, као што је употреба LIDAR-а (Light Detection and Ranging, LIDAR), хиперспектрално снимање и радар који продире под површину земљишта, значајно су повећали просторну и временску функцију анализе ових процеса. Нова истраживања указују на то да ће можда бити донесене темељне промјене код полазних теорија ерозионих процеса, како би се ускладиле са новим научним налазима. Анализа и моделирање засновано на науци о геопросторним информацијама односно ГИС технологији (Geographic information system, GIS) играју важну улогу код бољег схватања и могућности предвиђања ерозије земљишта усмјереног на минимизирање*

---

*Цитирање:* Спалевић В, Чуровић М (2023) Моделирање ерозије земљишта примјеном рачунарско-графичких метода и географских информационих система. У: Говедар З, Матаруга М, Пржуљ Н (уредници) Одрживи развој и управљање шумским екосистемима. Академија наука и умјетности Републике Српске, Бања Лука, Монографија LI:143–170

---

*Cite as:* Spalevic V, Curovic M (2023) Soil erosion modeling using computer-graphic methods and geographic information systems. In: Govedar Z, Mataruga M, Pržulj N (eds) Sustainable development and management of forest ecosystems. Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Banja Luka, Monograph LI:143–170

негативних утицаја и његове депозиције. У овом поглављу изнијели смо ставове који објашњавају теорију и методе моделирања ерозије земљишта, транспорта седимената и таложења у површинским водним токовима заснованих на примјени рачунарско-графичких метода и употреби географских информационих система. Математичке подлоге које стоје у алгоритамским позадинама модела за прорачун ерозије земљишта примјењују се за прорачун интензитета ерозије, те моделирања овог процеса деградиције земљишта. Представљене методе објашњавају покретање еродираниог материјала из сливова, његову депозицију низводно и утицаје ових процеса на еволуцију природних пејзажа проучаваних подручја. Дискутовани су поједини приступи који су користили примјене ГИС-а код једноставних и напредних модела, те представљени модели који се користе у свијету и у региону Западног Балкана.

*Кључне ријечи: Земљиште, ерозија земљишта, деградиција земљишта, модели, веб-платформе, географски информациони системи*

## **5.1. Увод**

Земљиште је један од најважнијих и најсложенијих природних ресурса, али актуелни процеси у природи (климатске промјене, ерозија земљишта) и урбанизација све више угрожавају овај драгоцен ресурс. Деградиција земљишта проузрокована ерозијом сврстана је међу најважније свјетске еколошке проблеме (Dimotta et al. 2016; Dimotta et al. 2017; Gudino-Elizondo et al. 2019). Ерозија је кључни покретач деградиције земљишта, који у великој мјери утиче на одрживо управљање земљиштем у различитим окружењима широм свијета (Chalise et al. 2019). Људске активности могу имати важан утицај на површинске процесе на Земљи и допринијети значајној промјени Земљине површине, с обзиром на то да се очекује да ће се у складу са тим промијенити и ерозија земљишта и динамика проноса ерозионих наноса.

Негативни ефекти ерозије земљишта готово су непримјетни што се тиче утицаја овог процеса на продуктивност и екосистем током краћег временског периода (Kisic et al. 2010; Dragičević et al. 2019). У нормалним условима, ерозија земљишта је сталан, постепено наступајући процес код кога, ако се не догоди убрзани процес деградиције земљишта попут јаружења или клизишта, обично бивамо свјесни посљедица само када то буде прекасно или прескупо за рјешавање проблема узрокованих овим процесом.

Услови појачаних процеса ерозије земљишта не утичу само на пољопривреду већ могу драматично смањити животни вијек резервоара воде (за пиће, пољопривреду, електропривреду, туризам). Дугорочно, такви процеси могу довести до промјена у пружању услуга екосистема и до исцрпљења основних природних ресурса.

Анализа овог специфичног процеса деградације земљишта, заснована на мјерним подацима, може допринијети идентификовању ефеката промјене намјене коришћења земљишта на динамику процеса ерозије земљишта. Међутим, ови подаци доступни су само за мали број великих до средње великих сливова, док је за мале сливове и издвојене површине ова врста информација недоступна. Стога се до одговора на питање квантификације интензитета ерозије земљишта и проноса наноса на варијације промјене начина коришћења земљишта, из практичних разлога, може доћи само нумеричком симулацијом процеса ерозије земљишта.

Компјутерска симулација идеално је средство за разумијевање сложених ефеката различитих физичких и геолошких процеса који међусобно утичу на развој различитих форми и облика земљишта током времена. Симулациони модели и визуелизација њихових резултата обично захтијевају специјализовани софтвер којем није лако приступити и који није лако користити без претходног доброг познавања проблематике.

С краја двадесетог и почетком овог вијека, бројни истраживачи радили су на примјени рачунарско-графичких метода код проучавања деградације земљишта, те развијали различите моделе који су описивали процесе ерозије земљишта водом и проноса наноса. Модели и приступи знатно су се разликовали у својим циљевима, временском и просторном опсегу, као и у својој концептуалној основи. Акцент је углавном био на развоју и проучавању концептуалних, емпиријских или регресионих модела. Већина модела које смо изучавали не спада строго у једну од ових категорија. Типично за већину ових модела јесте да су фокусирани на ограничени број процеса ерозије земљишта и транспорта наноса.

Модели који су били предмет наших истраживања фокусирани су на проучавање ерозионих процеса на нивоу сливова. Изазови код ових истраживања јесу комбинације природне сложености, просторне хетерогености и недостатка података потребних за анализе. Фактори, односно улазни подаци који се користе за описивање ерозије и транспорта који се у већини модела појављују, јесу земљиште, нагиб, количина и интензитет падавина, те отицај.

Проблем развоја модела заснованих на овим факторима јесте тај што је многе од ових фактора често тешко процијенити, а далеко од тога да су константни у

простору и времену. Ово указује на висок степен сложености и тешкоћу да се изрази физичким једначинама. Renschler и Harbor (2002) показали су да употреба уобичајено доступних података умјесто података добијених директним истраживањима може имати значајан утицај на резултате модела у моделима заснованим на физици. Стога су закључили да је важно развити и процијенити моделе имајући на уму стварну доступност података.

Merritt et al. (2003) закључују да модели засновани на физици, као и сложенији концептуални модели, иако имају пуно добрих страна, нису нарочито прикладни за процјену продукције наноса у сливу, јер се многи од ових модела фокусирају само на ограничени број процеса ерозије и транспорта наноса. Од оних модела који узимају у обзир већину процеса који се дешавају у сливу, велики број је са проблемом везаним са високим улазним захтјевима модела и потешкоћама у одабиру јединствених скупова параметара који најбоље описују динамику слива.

Perrin et al. (2001) показали су да су сложени хидролошки модели надмашили једноставне моделе у калибрацији, али не и код валидације због проблема процјене параметара. Lane et al. (1992) тврде да ограничење код моделирања на нивоу слива произлази из немогућности да се тачно симулирају брзине отицања и количине, тј. хидролошки одговор на нивоу ријечног слива.

Ипак, ограничења код моделирања ерозије земљишта у сливу дјелимично су резултат високих захтјева за подацима сваког појединачног модела и, што је можда још важније, често тешког разумијевања сложених интеракција између различитих процеса. Овај општи недостатак или потешкоћа редуccionистичких модела који укључују ерозију из слива, ерозију обала и пронос наноса у сливу, тражи алтернативне приступе за процјене седимената.

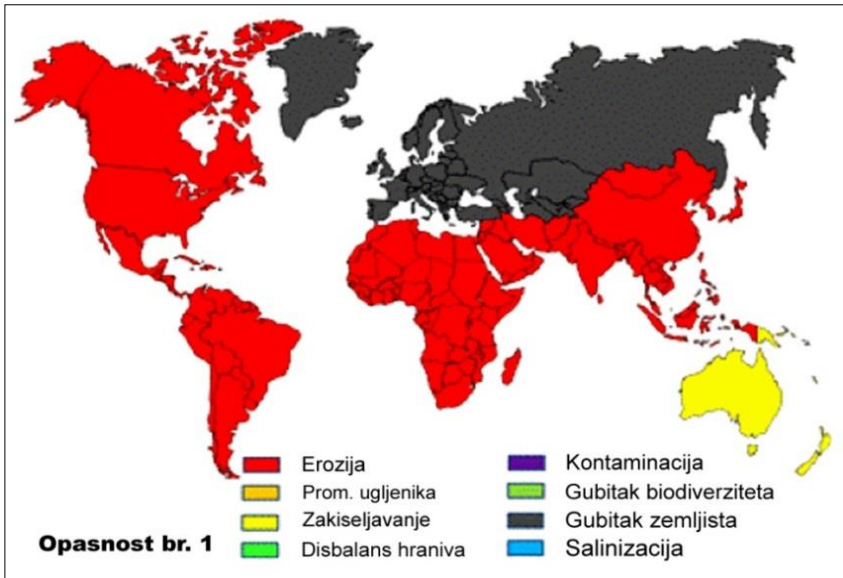
Овај научни прилог даје преглед неких тренутно највише коришћених модела у свијету и код нас, који приступају процјени интензитета ерозије и отицају из слива, који потенцијални корисници модела могу користити за сопствена истраживања и моделирање на нивоу слива. Дат је преглед одређеног броја постојећих модела, концепата који стоје иза ових модела и компромиса који могу утицати на перформансе модела и корисност модела у адресирању питања која поставља корисник модела.

Укључени су, дакле, модели који узимају у обзир сложеност система и интеракцију процеса. Посебан акценат дат је на сопствена искуства примјене метода потенцијала ерозије – ЕПМ (Гавриловић 1972), те модела изведених из ЕПМ: Сливови (Spalević 1999), IntErO (Spalevic 2011), те модела који су у развоју: WIntErO и Global IntErO.

## 5.2. Процеси ерозије земљишта

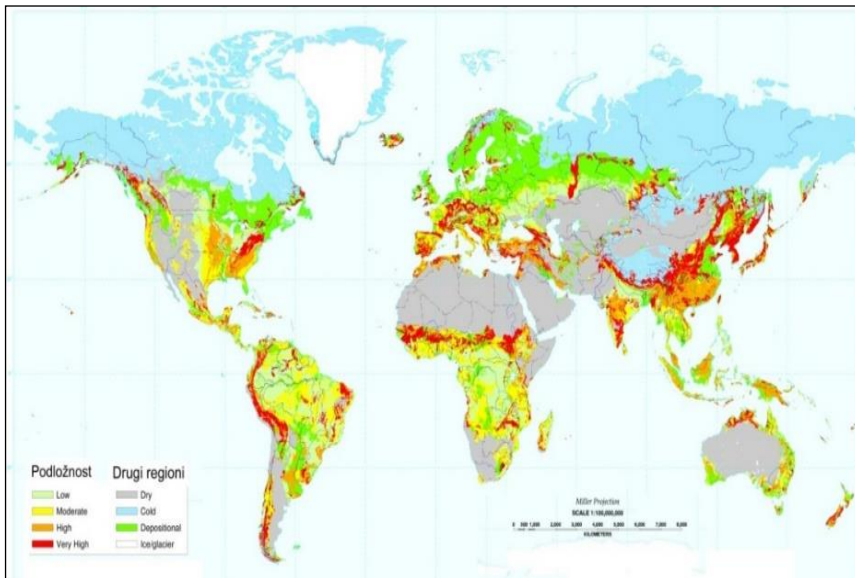
Процес ерозије земљишта природна је појава и стални процес који се постепено одиграва. Јавља се под утицајем воде и вјетра, када долази до одвајања честица земљишта, његовог транспорта и даљег таложења у акумулацијама. Тај процес је незнатан док постоји извјесна равнотежа између нападне снаге воде и разних фактора на површини земљишта који пружају отпор воденој снази (Spalevic 2011). Природа углавном ствара земљиште у оној мјери у којој га вода спира, односно природа обнавља земљиште. Ову равнотежу у природи најчешће ремети човјек. Он својим радом оштеђује биљни покривач и површински дио земљишта сјечом и крчењем шума, орањем искрченог земљишта и преоравањем ледина, чиме појачава рад нападне снаге воде и убрзава процес ерозије (Ванчетовић 1971). Ови процеси у појединим случајевима дају посебне облике пејзажа (Alewell et al. 2015), некада са негативним консеквенцама, а у појединим случајевима са позитивним утицајима на простор у којима се ови процеси одвијају. Ерозија земљишта је најраспрострањенији облик деградације земљишта широм свијета и један је од најштетнијих видова деградације земљишта. Представља велики глобални еколошки проблем, угрожавајући пољопривредну продуктивност, квалитет воде, инфраструктуру итд. (Efthimiou 2018). Велики политички одговори требало би да преокрену утицај ерозије земљишта у деградираним областима, узимајући у обзир повећање популације, трендове климатских промјена и кризу потреба за водом (Panagos et al. 2015). Глобална процјена четири главне пријетње земљиштима, према подацима Свјетске организације за храну и пољопривреду (*Food and agriculture organization, FAO*) представљена је на Сл. 5.1 (Panagos et al. 2015), а подложност процесима ерозије у свијету према USDA (Panagos et al. 2015) на Сл. 5.2.

Конвенција Уједињених нација за борбу против дезертификације препознала је ерозију земљишта водом и вјетром као главни узрок деградације земљишта на глобалном нивоу. Привредне активности које узрокују промјене начина коришћења земљишта примарни су узрок убрзане ерозије земљишта, која има значајне импликације на производњу хране која се добија из биљне производње, угљеник, продуктивност земљишта, мијењајући притом социоекономске услове широм свијета (Borrelli et al. 2017). Истраживачи указују на пораст глобалне ерозије земљишта усљед ширења обрадивих површина. Највећа повећања очекују се у потсахарској Африци, Јужној Америци и југоисточној Азији. Утврђено је да најниже развијене економије доживљавају највеће процјене стопа ерозије земљишта (Borrelli et al. 2017).



Сл. 5.1. Глобална процјена четири главне пријетње земљиштима према FAO (Panagos et al. 2015)

Fig. 5.1. Global assessment of the four main land threats according to FAO (Panagos et al. 2015)



Сл. 5.2. Подложност процесима ерозије у свијету (Panagos et al. 2015)

Fig. 5.2. Susceptibility to erosion processes in the world (Panagos et al. 2015)

Многе земље увеле су проблем ерозије земљишта вјетром и водом у своју законску регулативу. Посебни закони, подзаконска акта и правилници у употреби су у Албанији, Азербејџану, Гамбији, Гренади, Индији, Италији, Киргистану, Малезији, Непалу, Пакистану, Португалу, Русији, Танзанији, ради успостављања правила код контроле и превенције процеса ерозије земљишта (Spalevic 2011; Вујачић 2019; Spalevic et al. 2020). Основни легални елементи овдје укључују специфичне мјере за контролу и превенцију, као што су конзервација земљишта и вода, идентификација угрожених подручја, развој планова контроле, мјере поправке, лимита код коришћења земљишта (нагиб код култивације и сл.). Проблем ерозије земљишта није заобишао ни подручје Југоисточне Европе: Црну Гору, Србију, Македонију и Босну и Херцеговину. Према доступној литератури, Стеван Петровић, Ђурековић, Чмелик, Јовановић, потом Милан Мужинић, Љубивоје Малетић, Сретен Росић пионери су у борби са ерозијом и бујицама код нас (Kostadinov and Marković 1996).

Према Кадовићу (1999), на овим просторима, у бившој СФРЈ, процесима ерозије земљишта била је угрожена површина од преко 75% укупне површине, при чему је са површине земљишта одношено око 90 милиона метара кубних земљишта годишње, од чега је око 15% завршило у водним акумулацијама, носећи притом штете водопривреди и електропривреди, запуњавајући акумулације, притом им смањујући укупну корисну запремину, односно доступност количине вода. Исти аутор наводи да је у Југославији процесима ерозије различитог типа и интензитета захваћено 90% укупне површине (Кадовић 1999).

Забилежено је да противерозионе радове и уређење бујица међу првима изводи Ванчетовић (1951, 1954, 1966, 1971), а према суду стручњака из ове струке, најзначајнији допринос науци у овој области дао је Гавриловић (1960, 1961, 1964, 1965а, 1965б, 1965в, 1972).

### **5.3. Просторна промјенљивост**

*„Сви природни извори су изворни деривати земљишта. Фарме, расадници, усјеви и стока, шуме, наводњаване површине, водена снага – рјешавају се у питањима земљишта. Зато је земљиште основни извор живота.“*

Алдо Леополд (1924)

Земљиште је дефинисано као горњи слој Земљине коре и као природна супстанца састављена од честица стијена (минерала), органских материја, воде и ваздуха. Типичан узорак земљишта састоји се од 45% минерала, 25% воде, 25% ваздуха и 5% органске материје, али ове пропорције могу

варирати. Земљиште је станиште, служи као платформа за људске активности, пејзаж и наслеђе и дјелује као извор неопходних сировина. Здраво, плодно земљиште у средишту је збивања везано за сигурност хране.

Све наведено говори нам да су земљишта и те како вриједна заштите због свог социоекономског и еколошког значаја. Упркос важности овог природног ресурса, коју је Леополд истакао прије једног вијека, земљишта су прекомјерно експлоатисана, деградирана и неповратно изгубљена због непримјерених пракси управљања, индустријских активности и губитка земљишта због бројних негативних процеса деградације земљишта, међу којима посебно треба обратити пажњу на процесе ерозије земљишта, компакције (сабијања), загађења и салинизације.

Идентификација и развој одрживог управљања земљиштем хитно су потребни због раширене деградације овог ресурса усљед лоших пракси коришћења земљишта. Поред тога, свијет ће морати да повећа производњу хране како би удовољио прехрамбеним потребама растуће глобалне популације, притом водећи рачуна да не дође до даље деградације животне средине. Сталне климатске промјене и њихови утицаји на животну средину додатни су фактор који треба узети у обзир приликом идентификовања и развоја одрживих пракси коришћења земљишта.

Потребно је послати јасне поруке о потреби за одрживим управљањем земљиштем, идентификовати неке од његових главних компоненти и наметати добре примјере одрживих система управљања земљиштем који се практикују широм свијета. Неке уобичајене компоненте ове врсте управљања су:

- разумијевање екологије управљања земљиштем;
- одржавање или побољшање продуктивности земљишта;
- одржавање квалитета земљишта;
- повећана диверсификација производње, која води већој стабилности и еластичности овог ресурса;
- пружање економских и екосистемских услуга заједници и
- управљање земљиштем социјално прихватљивим.

Научници дискутују о примјерима одрживих система управљања земљиштем, укључујући ту и праксе агрошумарства, те такозване прецизне пољопривреде. Унапријеђене технологије омогућавају бољи приступ и размјену информација и пружају могућности за идентификовање и развој одрживијих пракси и система управљања земљиштем за будућност.

Климатске промјене, које су све актуелније као глобални проблем, даље ће погоршавати квалитет наших земљишта, изазивајући даље дезертификацију на глобалном плану. Модели јасно указују на то да постоје негативни утицаји глобалног загријавања на евапорацију. Подршка је могућа кроз даље



развијање научноистраживачких пројеката који би својим резултатима јасно указивали на економске, социјалне, те еколошке бенефите постигнуте у борби са деградацијом земљишта током времена. Иницијативе морају ићи код подизања свијести појединца и заједнице о вриједности и важности земљишта као ресурса, наступајући са хармонизованим приступима мониторинга земљишта и успостављањем програма прикупљања података о земљиштима.

Што се тиче модела управљања земљиштем као ресурсом, могуће је даље развијати моделе система за управљање, а један од приступа мора бити и одрживо газдовање земљиштем и водама у сливовима, које ће почивати на интегралном управљању уз помоћ примјене рачунарско-графичких метода. Примјена моделирања ерозије земљишта заснованог на употреби географских информационих система и примјене рачунарско-графичких метода један је од битних стратешких приступа.

Досадашња рјешења вези управљања земљиштем морају бити са значајно побољшаним карактеристикама. Потребно је дати јасну систематизацију сазнања о могућностима система за управљање овим природним ресурсима, о предностима и недостацима до сада коришћених система и указати на битне параметре система за управљање овим природним ресурсом. Посебно је важно успостављање нових, унапријеђених модела, које треба одмах примјењивати у посматраним системима.

Један од алата који пружају могућности постизања наведених циљева јесте и даљинска детекција, која је ефикасан алат за откривање и мапирање специфичних облика и процеса које су створиле различите погонске силе, укључујући:

- ерозију земљишта површинским отицајем;
- ерозију канала изазвану флувијалним процесима;
- гравитациону ерозију, клизишта;
- ерозију вјетром;
- ерозију обале таласима или абразиону ерозију; и
- глацијалну ерозију.

Основи ерозионих процеса и квантитативно моделирање обрађени су и представљени одговарајућим вриједностима серија података. Данас се углавном све врсте ерозионих процеса анализирају или моделирају помоћу алата за даљинску детекцију и уз помоћ алата географског информационог система (ГИС) (*Geographic information system, GIS*).

За потребе анализе промјене начина коришћења земљишта користе се и модели који се заснивају на комбиновању терестричких података,

сателитских снимака из различитих периода и употребе алата ГИС софтвера (Curovic et al. 2015).

У актуелним истраживањима код нас, фокус је на ерозији изазваној површинским отицајем, због њеног утицаја на пољопривредна и шумска земљишта те продуктивност ових земљишта, квалитет воде и одрживо управљање земљиштем и сливовима. Због тога је у нашим истраживањима нагласак стављен на ерозију, транспорт наноса и таложење узроковано утицајем површинских вода. ГИС моделирање ерозије земљишта уводи просторне обрасце одвајања честице земљишта, транспорта и таложења те њихов утицај на обликовање простора. За развој модела ерозионих процеса може се користити неколико приступа:

- емпиријски или статистички модели настали из праћења података или теренских експеримената, користећи притом статистичке методе, као што је регресија;
- модели засновани на правилима постављеним на општим запажањима која повезују комбинацију улазних података са резултатима имплементираним као логичке операције;
- модели засновани на физици, који користе једначине изведене из природних закона, попут континуитета очувања масе и енергије.

Хидролошке јединице обично се користе у моделима заснованим на правилима (индекси и условна покривност) или просторним моделима заснованим на процесима. Када моделирају ерозију код површинског отицаја, јединице су једноставне геометрије (нагнуте равни или полилиније) и представљају сегменте падина, канале и мреже токова. Процеси су затим описани правилима транспорта од јединице до јединице или обичним диференцијалним једначинама. Овај приступ веома је ефикасан за системе који укључују антропогене облике (нпр. ровови), али избор погодних просторних цјелина, њихова географија и мреже захтијевају велику стручност и могу значајно утицати на коначне резултате.

Код мало комплекснијих природних окружења, процеси се не могу лако описати једноставним геометријским карактеристикама, гдје просторни модели имају ограничене могућности да идентификују тачну локацију извора продукције и депозиције наноса те образац њиховог простирања. Смањивањем величине дискретних цјелина, посебно на локацијама са сложеном топографијом, просторни образац ерозије може се дефинисати на нивоу детаља. На примјер, комбиновани модели предвиђања водне ерозије (*Water Erosion Prediction Project*, WEPP, GeoWEPP) подржавају моделирање на три различита нивоа просторних детаља: слив, дефинисани сегменти падине и водоток (Renschler and Flanagan 2003).

Просторни модели представљају улазне промјенљиве и моделоване вриједности као поља, обично као правилне или неправилне мреже. За разлику од просторно просјечних модела, који предвиђају стопе ерозије за подручје дискретне просторне јединице, дистрибуирани модели предвиђају моделоване вриједности за било коју тачку у простору и пружају детаљне просторне обрасце извора и депозиције наноса.

Процес ерозије земљишта и пронос наноса обично захтијева моделовање у различитим просторним резолуцијама. У зависности од величине, мањи сливови моделирају се у резолуцијама од 1 до 10 метара, док је моделирање великих регионалних сливова (хиљаде квадратних километара) са резолуцијама од 30 до 100 метара. Једноставнији емпиријски модели ерозије земљишта претпостављају релативно стабилну стопу ерозије земљишта током времена и процјењују дугорочни, просјечни годишњи ниво стопе ерозије засноване на емпиријским факторима изведеним из дугорочних посматрања.

У стварности, стопе ерозије брзо се мијењају због изузетно динамичне природе покретачких сила, као што су кише и проток воде. Потпуну динамику ерозионих процеса тешко је обухватити због сложених интеракција размјера различитих улазних података. Због тога се моделирање обично изводи за случај стабилног стања повезаног са вршним протоцима током појединачних догађаја. Софистицирани системи за моделирање изводе континуиране временске симулације неколико интерактивних процеса који укључују стационарне ефекте падавина током неколико година. WEPP модел, на примјер, симулира дневне промјене на земљишту и вегетацији, а када се појаве кише, карактеристике биљака и земљишта користе се да би се утврдило да ли ће доћи до површинског отицаја или не. Ако је предвиђен отицај, израчунавају се продукција и таложење наноса, седимената у кориту. Модел, дакле, симулира утицаје:

- климе (киша, температура, инсолација);
- хидрологије (инфилтрација, задржавање и отицај);
- водног биланса (евапотранспирација);
- вегетације (усјеви, пашњаци и шуме);
- ерозија (процеси ерозије); и
- таложења (у јаругама, вододеринама, кориту и сливу).

Поред континуираних временских симулација, модел се може користити за процјену утицаја појединачног догађаја, као и просјечног дугорочног утицаја током неколико година.

#### 5.4. Моделирање ерозије засновано на примјени рачунарско-графичких модела

Моделирање ерозије засновано на ГИС-у подржава ефикасно управљање геореференцираним подацима, израчунавање улазних параметара за различите сценарије, просторну анализу резултата моделирања и ефикасну визуелизацију. ГИС укључује алате за статистичку анализу и моделирање ерозионих процеса забиљежених подацима на даљину.

Почетком 1990-их, Географски систем за анализу и подршку (*Geographic Resources Analysis Support System*, GRASS) пружио је основе за пионирски рад на интеграцији ГИС-а и хидролошких информација, као и моделирање ерозије (Mitchell et al. 1993). Већина апликација за моделирање геопросторне ерозије тада је била усмјерена на пољопривреду, очување земљишта, контролу загађења седиментом, одрживо управљање земљиштем (Gaffer et al. 2008) и шумарство, посебно у смислу утицаја на деградацију земљишта након пожара. Међу првим примјенама моделирања ерозије у оквиру ГИС-а било је израчунавање универзалне једначине губитка земљишта (*Universal Soil Loss Equation*, USLE) (Wischmeier and Smith 1978) и извођење њених топографских параметара из дигиталног елевационог модела (*Digital Elevation Model*, DEM). Moore и Burch (1986), као и Moore и Wilson (1992), утрли су пут апликацијама USLE за терене са сложеном топографијом. Иако су први кораци изазвали бурне реакције, подстакнут је развој у правцу који је резултирао бројним примјенама USLE-а са ГИС подршком за сложене топографске услове (Mitasova et al. 1996). Сада ГИС примјене USLE-а покривају широк спектар размјера, укључујући велика сливна подручја (Suri et al. 2002; Cebecauer and Hofierka 2008).

Универзална једначина губитка земљишта и пратеће ажуриране, побољшане верзије – ревидирана универзална једначина губитка земљишта (*Revised Universal Soil Loss Equation*, RUSLE, RUSLE 2) коришћене су за оцјењивање губитка земљишта из слива, које се фокусира на нетачкаста загађења у пољопривреди, животној средини и инжењерству, укључујући добро познате моделе као што су (Rewerts and Engel 1991; Mitchell et al. 1993; Lim et al. 2005):

- *Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation program*, ANSWERS;
- *Agricultural Non-Point Source pollution model*, AGNPS; и
- *Soil & Water Assessment Tool*, SWAT.

Ови модели повезани су са ГИС-ом за обраду и управљање улазима за моделирање и анализу резултата. Неколико система за моделирање сливова примијењено је као онлајн алат (Park et al. 2009). Иако је USLE развијен као једноставан алат у пољопривреди, са идејом да подстакне очување земљишта и тиме је његово представљање процеса ерозије у великој мјери поједностављено, потребе за моделирањем на нивоу истраживања подстакле су развој сложенијих модела и њихово повезивање са ГИС-ом. Полазећи од рада Foster (1982), развијен је WEPP модел (Flanagan et al. 2007). Прилагођавање WEPP-а ГИС-у, што је довело до развоја Geo WEPP-а (Renschler 2003), прати ток седимента дуж водних стаза на падинама генерисаних из DEM. Даљи развој модела ерозије воде и вјетра у оквиру WEPP моделирања представљао је важан корак ка разумијевању комбинованих утицаја ерозије воде и вјетра на очување земљишта и одрживост природних ресурса.

У Европи је развијено неколико система за моделирање ерозије са јаким геопросторним компонентама. Европски модел ерозије земљишта (*Soil The European erosion model*, EUROSEM) увео је динамичан приступ за предвиђање проноса наноса са малих сливова (Morgan et al. 1998). Модел ерозије земљишта (*Limburg Soil Erosion Model*, Limburg, LISEM) успостављен је за потребе истраживања, планирања и очувања земљишта као ресурса (De Roo et al. 1996; Sheikh et al. 2010). Симулира просторне ефекте кишних догађаја на малим сливовима и користи бесплатни ГИС PCRaster програм за заштиту животне средине (*GIS PCRaster Environmental Software*, GIS PCRaster) (Karssenbergh et al. 2001). Као један од најопсежнијих алата за моделирање геопросторне ерозије, LISEM укључује падавине, површинско задржавање у микродепресијама, инфилтрацију, вертикално кретање воде у профилу, површински отицај, проток у вјештачким каналима и јаругама. Укључен је и утицај збијања (компакције) земљишта на хидролошке процесе и процесе ерозије земљишта.

Модел симулације водене ерозије (*SIMulated Water Erosion*, SIMWE) (Mitas and Mitasova 1998; Mitasova et al. 2005) развијен је као биваријантна генерализација модела ерозије који WEPP користи код просторног обрасца ерозије, транспорта наноса и таложења под просторно разноликим условима. Његов робустни алгоритам узорковања путање и интеграција у ГИС подржава симулације образаца протока воде и седимента при високим просторним резолуцијама, укључујући утицаје малих варијација терена као што су удубљења, јарци или контролне бране. Поред модела усредсређених на појединачни догађај па до вишегодишњих појава, развијени су и модели који биљеже утицај ерозије на облике форми током стотина или хиљада година. Ови модели обично користе ГИС податке као улазне податке, али они су развијени и коришћени углавном изван ГИС-а.

Добро познати модели који се баве овом проблематиком су SIBERIA (*The SIBERIA landscape evolution model*) (Willgoose et al. 1991; Willgoose 2004), CHILD (*Channel-Hillslope Integrated Landscape Development Model*) (Tucker et al. 2001), као и тзв. ћелијски модели засновани на правилима за симулацију облика земљишта (Luo 2001) и пјешчаних дина (Pelletier et al. 2009). Модел еволуције облика WILSIM (*A web-based interactive landform simulation model*) (Luo et al. 2004) примијењен је као симулациони веб-алат.

## 5.5. Моделирања ерозије земљишта уз примјену локалних модела

Имплементација једноставних модела ерозије уз примјену ГИС система директно укључује обраду података, унос података, рачунање уз коришћење модела и анализу резултата. Токови рада могу се развити помоћу модела доступних у ГИС-у који подржавају потпуно аутоматизоване симулације. Модели се обично могу интегрисати помоћу ГИС-а, кориштењем геопросторних података.

Методе проучавања у конзервацији земљишта свде се на методе које прогнозирају површинско отицање са слива, методе прогнозирања интензитета ерозионог процеса и методе које проучавају саму појаву ерозионог процеса. Ерозиони утицаји се суперпонирају и јављају комплексно, али методе проучавања иду за тим да их изоловано одреде (Kostadinov and Marković 1996). Прорачун отицања и интензитета ерозије обавља се примјеном одговарајућих стандардних класичних метода, али се због брзине рада и прецизности значајан акценат даје различитим начинима рачунарско-графичке обраде података. Dragičević and Kostadinov (2007) у својим истраживањима презентују искуства коришћења дигиталног висинског модела (*Digital elevation model*) код анализе утицаја физичких и антропогених фактора на интензитет ерозије земљишта (морфологија, генеза, еволуција, заштита од ерозије земљишта) употребом сателитских снимака и праћења процеса ерозије уз анализу података и поређење резултата.

Постоји велики број математичких модела за прорачун количине наноса. За сливова нашег региона најприхватљивији је аналитички модел професора Гавриловића (1972) за одређивање интензитета ерозије: одређивање средњегодишњих запремина ерозионих наноса (укупни вучени и суспендовани наноси) за природни слив, дио слива или гравитационо подручје. Познат је и као метода потенцијала ерозије, а први пут представљен је научној јавности 1962. године. Базиран је на теренским истраживањима ерозије у горњем дијелу слива ријеке Мораве у Србији.

Полазне основе постављене су на методи за квантитативну класификацију ерозије (*Method for the Quantitative Classification of Erosion*, MQCE), која је развијена 1954. године (Dragičević et al. 2016). Гавриловићевом методом могу се процијенити различити типови ерозије, попут површинске, ријечне (флувијалне) и латералне ерозије.

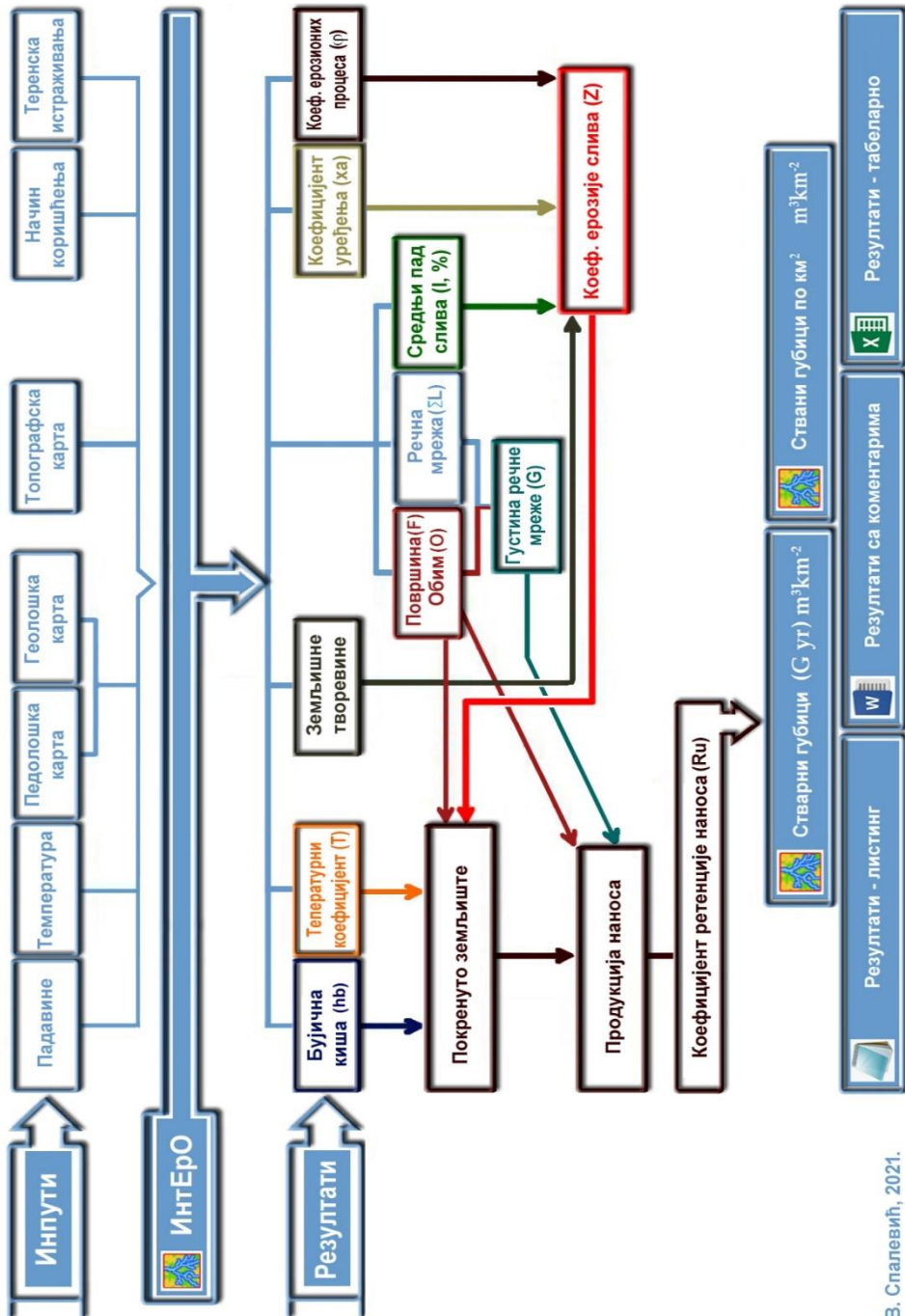
За потребе проучавања прорачуна интензитета ерозије земљишта у Црној Гори израђено је неколико програмских пакета базираних на методи потенцијала ерозије, односно на методи за квантитативну класификацију ерозије (*Method for the Quantitative Classification of Erosion*, MQCE). Тренутно су актуелни модели:

- WIntErO, који представља интегрисани, модернији програмски пакет треће генерације;
- програм IntErO (Spalevic 2011);
- *Surface and distance measuring* (Spalevic 1999) и програм *Сливови* (Spalevic 1999), у којем прорачун количине наноса, у основи, обрађује улазне податке по методи проф. Гавриловића (1972) за интензитет ерозије земљишта.

Коришћењем веб-базиране рачунарско-графичке методе програма WIntErO у проучавању интензитета ерозије, површинских вриједности (површина слива, површина између изохипси итд.) и дужине, тј. удаљености од карте (дужина главног водотока, дужина вододијелнице итд.) обрађује се врло прецизно, што раније није био случај са примјеном механичких инструмената (планиметара и курвиметара). Обрадом добијених физичко-географских инпута, након уноса података, добијени су коначни резултати. Циљ креирања веб-платформе је да омогући размјену података и бољу сарадњу између истраживача географа из нашег региона са истраживачима из других крајева свијета.

Десктоп базирано рјешење IntErO (Сл. 5.3), које је и даље у употреби, не може у потпуности одговорити садашњим захтјевима истраживача, који, између осталог, имају за циљ да обједине информације на једном мјесту и омогуће унос свих истраживачких прорачуна у отворену базу података и лакши увид у исте осталим истраживачима или заинтересованим појединцима, у сваком тренутку (Spalevic 2011).

Из наведених разлога, било је потребно креирати и осмислити веб-рјешење овог програма, које ће омогућити поменуте захтјеве, а и додатно створити пријатнију и ефикаснију платформу за будућа истраживања и информисање о истом.



В. Спалевић, 2021.

Сл. 5.3. Дијаграм тока IntErO модела  
Fig. 5.3. Flowchart of the IntErO model



Ефикасна комуникација између истраживача пресудна је за темпо развоја научног напретка. IntErO модел је до сада омогућавао упис прорачуна преко форме и чување тих уноса у сопствене датотеке (по једна тзв. датотека за сваки слив). Преглед и добијање резултата прорачуна извршава се тако што се учитава потребна датотека и потом се прегледају резултати и, по потреби, извозе у неки од понуђених формата у виду текста или табела.

Оваквим начином уноса прорачуна у датотеке и чувањем датотека на персоналним рачунарима, размјена међу истраживачима и публиковање мање су ефикасни него нови приступ, успостављањем WIntErO отворене веб-платформе. Веб-платформа WIntErO има за циљ да отвори приступе постојећем IntErO моделу и да на једноставнији начин пружи преглед података. Преглед прорачуна уписаних у бази података доступан је свим посјетиоцима веб-платформе, док је упис истих доступан само за регистроване кориснике. WIntErO омогућава једноставан упис прорачуна преко веб-форме и за упис је неопходна регистрација корисника. Регистрација је једноставна, а потребно је да корисник региструје кориснички профил. Упис података, као и регистрација профила, морају проћи верификацију. Веб-платформа садржи и опцију за преглед локација и података, а могуће је податке и експортирати у одређени фајл који се генерише након захтјева. Подаци о интензитету ерозије земљишта добијени коришћењем IntErO и WIntErO модела у нашем региону представљени су табеларно (Таб. 5.1).

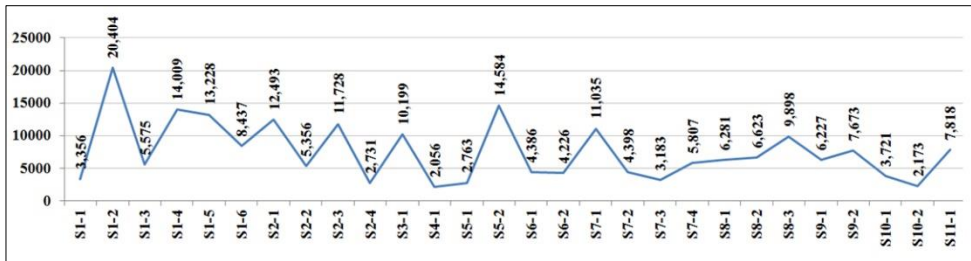
Таб. 5.1. Интензитет ерозије земљишта срачунат уз коришћење IntErO и WIntErO модела у нашем региону

Table 5.1. Soil erosion intensity calculated usin IntErO and WIntErO models in our region

Истраживање	Примјена IntErO и WIntErO модела	Обрачун	Јединица мјере
1. Spalevic et al. (2013a)	Ђуричка ријека	645,40	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
2. Spalevic (2011)	Комарачка р.	521,84	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
3. Spalevic et al. (2013ђ)	Бијели поток	104,31	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
4. Spalevic et al. (2016a)	Новшићки поток	288,97	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
5. Spalevic et al. (2017)	Величка ријека	562,60	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
6. Spalevic et al. (2015з)	Драгово врело	399,52	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
7. Spalevic (2011)	Пепићка ријека	328,96	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
8. Spalevic (2011)	Кривачки поток	180,22	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
9. Spalevic (2011)	Муринаска ријека	327,69	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
10. Spalevic (2011)	Шереметски поток	298,19	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
11. Spalevic (2011)	Зорин поток	417,68	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
12. Spalevic (2011)	Дубоки поток	278,33	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
13. Spalevic (2011)	Пишевска ријека	427,63	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>

14.	Spalevic et al. (2014a)	Зим поток	330,12	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
15.	Spalevic et al. (2015ж)	Провала	429,10	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
16.	Spalevic (2011)	Злоречица	403,46	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
17.	Spalevic (2011)	Краштица	370,61	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
18.	Spalevic (2011)	Малски поток	244,32	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
19.	Spalevic et al. (2014б)	Трепчанска ријека	219,39	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
20.	Spalevic (1997)	Шекуларска ријека	286,90	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
21.	Spalevic et al. (2013е)	Навотински поток	88,66	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
22.	Spalevic et al. (2001)	Виницка ријека	470,42	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
23.	Spalevic et al. (2012)	Ровачки поток	324,45	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
24.	Spalevic et al. (2013г)	Криваја	212,67	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
25.	Spalevic (2011)	Бистрица	385,41	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
26.	Spalevic et al. (1999)	Калударска ријека	492,68	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
27.	Spalevic (2011)	Маква	232,47	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
28.	Spalevic et al. (2015д)	Сушица	305,76	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
29.	Spalevic (2011)	Дапсићка ријека	268,09	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
30.	Spalevic et al. (2003)	Лучка ријека	266,21	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
31.	Spalevic et al. (2014в)	Бошњак	197,99	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
32.	Spalevic et al. (2013д)	Тифран	296,45	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
33.	Spalevic et al. (2016в)	Сеочки поток	255,60	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
34.	Spalevic (2011)	Љешница	325,19	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
35.	Spalevic et al. (2015а)	Карличића поток	195,47	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
36.	Spalevic (2011)	Биорицки поток	264,43	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
37.	Spalevic et al. (2015в)	Троноша	286,07	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
38.	Spalevic (2011)	Радулићка ријека	327,04	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
39.	Spalevic i Vujačić (2015ј)	Брзава	452,92	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
40.	Spalevic (2011)	Ракљанска ријека	210,32	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
41.	Spalevic (2011)	Дубоки поток	131,23	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
42.	Spalevic et al. (2015и)	Рамчина	122,48	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
43.	Spalevic (2011)	Ђурен поток	194,76	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
44.	Spalevic (2011)	Увезачки поток	198,08	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
45.	Spalevic (2011)	Љубовиђа	212,39	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
46.	Spalevic (2011)	Пепића ријека	254,63	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
47.	Spalevic (2011)	Николин поток	200,43	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
48.	Spalevic i Vujačić (2015г)	Расточки поток	514,60	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
49.	Spalevic et al. (2013б)	Љешница	200,56	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
50.	Spalevic et al. (2014г)	Липница	247,93	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
51.	Spalevic et al. (2015ђ)	Недакуси	140,64	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
52.	Spalevic et al. (2013в)	Бољанска ријека	315,28	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
53.	Spalevic et al. (2015е)	Кисјеле воде	216,30	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
54.	Spalevic (2011)	Сутиванска р.	250,39	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
55.	Spalevic (2011)	Ораховачка ријека	256,39	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
56.	Spalevic (2011)	Бистрица	269,25	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>
57.	Spalevic (2020)	Миочки поток	413,66	м <sup>3</sup> км <sup>-2</sup> год. <sup>-1</sup>

Као резултат ове анализе може се закључити да просјечна вриједност интензитета ерозије по квадратном километру износи  $331,78 \text{ м}^3 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ . Сличан закључак доносе и Бабић Младеновић и сар. (2003), износећи вриједност од  $350,0 \text{ м}^3 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ . Имплементација ових приступа забиљежена је и у другим земљама, код других аутора, ван нашег региона: Бразил, Италија, Иран, Мароко, Малави, Румунија, Македонија. Примјер примјене у Ирану представљен је графичким приказом (Граф. 5.1) вриједности резултата стварних губитака земљишта подсливова Шириндарех слива (Вујачић 2019).



Граф. 5.1. Стварни губици земљишта, подсливови Шириндарех слива ( $\text{м}^3 \text{ год}^{-1}$ )  
 Graph. 5.1. Actual land losses, sub-basins of Shirindah basin ( $\text{m}^3 \text{ year}^{-1}$ )

Највеће вриједности стварних губитака земљишта по километру квадратном ( $\text{м}^3 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ) подсливова Шириндарех слива, према прорачунима WIntErO модела, забиљежене су код сљедећих подсливова: C1-2 ( $364 \text{ м}^3 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ), C2-1 ( $267 \text{ м}^3 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ), C5-2 ( $242 \text{ м}^3 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ), C7-1 ( $242 \text{ м}^3 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ), C2-2 ( $240 \text{ м}^3 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ). Наредни корак је развијање Global WIntErO модела који би удружио ГИС системе на веб-платформи, који би у позадини имао динамичку табелу IntErO модела.

## 5.6. Закључак

У овом поглављу разматрана је проблематика ерозије земљишта те модели и њихове примјене прегледом искустава истраживања претходних радова на моделима ерозије земљишта. Закључено је да су аутори највише окренути коришћењу USLE као најједноставнијег модела за примјену те да WEPP модел има задовољавајући ниво тачности предвиђања, али се не може користити за предвиђање ерозије великих размјера. На основу прегледа и резултата ове студије, закључује се да је, с обзиром на ограничења постојећих модела ерозије земљишта и њихове примјене, потребно више истраживања како би се развили робустни модели који ће надопунити недостатке досад коришћених приступа. Поред тога,

управљање процесима деградације земљишта, а посебно ерозијом, треба да воде истраживачи који су способни да правилно идентификују ове процесе у раним фазама деградације. Када су повезани са ГИС-ом, модели који су већ успостављени као динамичке табеле, пружају велики потенцијал за употребу у једноставном планирању интегралног управљања у сливовима. За сливове региона Југоисточне Европе најприхватљивији је аналитички модел професора Гавриловића за одређивање интензитета ерозије: одређивање средњегодишњих запремина ерозионих наноса (укупни вучени и суспендовани наноси) за природни слив, дио слива или гравитационо подручје. За потребе проучавања прорачуна интензитета ерозије земљишта у Црној Гори израђено је неколико програмских пакета базираних на методи потенцијала ерозије. Тренутно су актуелни модели (1) WintErO, који представља интегрисани, модернији програмски пакет треће генерације програма; (2) IntErO; те програми (3) „Површине и растојања“ и „Сливови“. Прорачун количине наноса, у основи свих наведених неколико програма, наслања се на обраду улазних података по методи проф. Гавриловића за интензитет ерозије земљишта. Наредни корак је развијање Global IntErO модела, који би интегрисао ГИС системе на веб-платформи, а који би у позадини имао динамичку табелу IntErO модела. Притом је потребно водити рачуна о томе да дође до правилног разумијевања и концептуализације система који води до адаптивног менаџмента који ће довести до успостављања сталног праћења хидролошких процеса ријечних сливова.

*„Земља, ваздух и вода нису наслеђство које смо добили од наших предака, већ је то оно што је позајмљено од наше дјеце, тако да им то морамо предати онако како је остављено нама.“ (Ганди)*

## **Литература**

- Alewell C, Egli M, Meusburger K (2015) An attempt to estimate tolerable soil erosion rates by matching soil formation with denudation in Alpine grasslands. *Journal of Soils and Sediments* 15(6):1383–1399
- Бабић Младеновић М, Обушковић З, Кнежевић З (2003) Засипање акумулација у Србији – Проблеми и правци решавања. *Водопривреда* 35:387–393
- Borrelli P, Robinson DA, Fleischer LR, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, Panagos P (2017) An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications* 8:2013
- Ванчетовић Т (1951) Уређење бујица. Уџбеник за средње шумарске школе. Београд

- Ванчетовић Т (1954) Уређење бујица и заштита земљишта од ерозије у НР Србији. Београд
- Ванчетовић Т (1966) Ерозија земљишта и бујице у СР Србији. Београд
- Ванчетовић Т (1971) Радови на сузбијању ерозије земљишта и бујица у СР Србији изведени од 1955. до 1968. године и постигнути резултати. Београд
- Вујачић Д (2019) Прорачун интензитета ерозије земљишта у Полимљу (Црна Гора и Србија) и Шириндарех сливу (Иран) коришћењем WIntErO модела. Докторска дисертација. Природно-математички факултет, Универзитет у Новом Саду, стр 283
- Гавриловић С (1960) Кратки курс из заштите земљишта од ерозије и уређење бујичних токова. Београд
- Гавриловић С (1961) Прорачун средње годишње количине наноса према потенцијалу ерозије. Гласник Шумарског факултета. Београд
- Гавриловић С (1964) Наука о ерозији земљишта и бујичним токовима. Књига прва. Београд
- Гавриловић С (1965а) Бујичне поплаве и класификација токова. Издање документације за грађевинарство и архитектуру, св 88. Београд
- Гавриловић С (1965б) Одређивање максималних и годишњих протока вода у бујичним сливовима и ерозионим подручјима. Издање документације за грађевинарство и архитектуру, св 88. Београд
- Гавриловић С (1965в) Одређивање режима наноса бујичног подручја и израда карата ерозије. ДГА. Београд
- Гавриловић С (1972) Инжењеринг о бујичним токовима и ерозији. Изградња, Посебно издање, стр 292
- Gaffer R, Flanagan D, Denight M, Engel B (2008) Geographical information system erosion assessment at a military training site. *Journal of Soil and Water Conservation* 63(1):1
- Gudino-Elizondo N, Biggs TW, Bingner RL, Langendoen EJ, Kretschmar T, Taguas EV, Taniguchi-Quan KT, Liden D, Yuan Y (2019) Modelling Runoff and Sediment Loads in a Developing Coastal Watershed of the US-Mexico Border. *Water* 11:1024
- De Roo A, Jetten V, Wesseling C, Ritsema C (1996) LISEM: a physically based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS. IAHS Publication, 23:395–403
- Dimotta A, Cozzi M, Romano S, Lazzari M (2016) Soil Loss, Productivity and Cropland Values GIS-Based Analysis and Trends in the Basilicata Region (Southern Italy) from 1980 to 2013; ICCSA 2016, Part IV, Lecture Notes in Computer Science, 9789; Gervasi O (ed). Springer, Cham, Switzerland, pp 29–45
- Dimotta A, Lazzari M, Cozzi M, Romano S (2017) Soil Erosion Modelling on Arable Lands and Soil Types in Basilicata, Southern Italy; ICCSA 2017, Part V, Lecture Notes in Computer Science LNCS, 10408; Gervasi O (ed). Springer, Cham, Switzerland, pp 57–72

- Dragičević N, Karleuša B, Ožanić N (2016) A review of the Gavrilović method (erosion potential method) application, *Građevinar* 68(9):715–725
- Dragičević N, Karleuša B, Ožanić N (2019) Different Approaches to Estimation of Drainage Density and Their Effect on the Erosion Potential Method. *Water* 11:593
- Dragičević S, Kostadinov S (2007) Digital elevation model and satellite images an assessment of soil erosion potential in the Pcinja catchment. *Bulletin of the Serbian Geographical Society LXXXIV*(2)
- Efthimiou N (2018) The importance of soil data availability on erosion modelling. *Catena* 165:551–566
- Кадовић П (1999) Противерозиони агроекосистеми – Конзервација земљишта, Шумарски факултет, Београд
- Karszenberg D, Burrough P, Sluiter R, DeJong K (2001) The PC Raster software and course materials for teaching numerical modeling in the environmental sciences. *Transactions in GIS* 5(2):99–110
- Kisic I, Basic F, Nestroy O, Sabolic M (2010) Global Change-Challenges for soil management, *Advances in Geoecology*. In *Soil Erosion under Different Tillage and Cropping Systems in Central Croatia*; Catena Verlag GMBH: Reiskirchen, Germany, pp 141–150
- Kostadinov S, Marković S (1996) Soil erosion and effects of erosion control works in the torrential drainage basins of southeast Serbia. *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives (Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996)*. IAHS Publ. no. 236: 321
- Lane L, Renard K, Foster G, Laflen J (1992) Development and application of modern soil erosion prediction technology – the USDA experience. *Australian Journal of Soil Research* 30:893–912
- Lim K, Sagong M, Engel B, Tang Z, Choi J, Kim K (2005) GIS-based sediment assessment tool. *Catena* 64(1):61–80
- Luo W (2001) LANDSAP: a coupled surface and subsurface cellular automata model for land form simulation. *Computers and Geosciences* 27:363–367
- Luo W, Duffin K, Peronja E, Stravers J, Henryb G (2004) A web-based interactive landform simulation. *Computers & Geosciences* 30:215–220
- Merritt W, Letcher P, Jakeman A (2003) A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling and Software* 18(8-9):761–799. doi: 10.1016/S1364-8152(03)00078-1
- Mitasova H, Hofierka J, Zlocha M, Iverson L (1996) Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Science* 10(5):629–641
- Mitasova H, Mitas L, Harmon R (2005) Simultaneous spline interpolation and topographic analysis for LiDAR elevation data: methods for open source GIS. *IEEE GRSL* 2(4):375–379. GIS-based soil erosion modeling. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/249009078\\_GIS-based\\_soil\\_erosion\\_modeling](https://www.researchgate.net/publication/249009078_GIS-based_soil_erosion_modeling) [accessed Mar 13 2021].

- Mitchell J, Engel B, Srinivasan R, Wang S (1993) Validation of AGNPS for small watersheds using an integrated AGNPS/GIS system. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 29(5):833–842
- Moore I, Burch G (1986) Modeling erosion and deposition: topographic effects. *Transactions ASAE* 29:1624–1640
- Moore I, Wilson J (1992) Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation* 47:423–428
- Morgan R, Quinton J, Smith R (1998) The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23(6):527–544
- Panagos P, Borrelli P, Poesen J, Ballabio C, Lugato E, Meusburger K, Montanarella L, Alewell C (2015) The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy* 54:438–447
- Park Y, Kim J, Engel B (2009) Development of web-based SWAT System. *Proceedings of ASABE, Reno, Nevada, June 2009*
- Pelletier J, Mitasova H, Harmon R, Overton M (2009) The effects of interdune vegetation changes on eolian dune field evolution: a numerical-modeling case study at Jockey's Ridge, North Carolina, USA. *Earth Surface Processes and Landforms* 34(9):1245–1254
- Perrin C, Michel C, Andreassian V (2001) Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology* 242:275–301
- Renschler C, Flanagan D (2008) Site-Specific Decision-Making Based on GPS RTK Survey and Six Alternative Elevation Data Sources: Soil Erosion Prediction. *Transactions of the ASABE* 51(2):413–424
- Renschler C, Harbor J (2002) Soil erosion assessment tools from point to regional scales – The role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology* 47:189–209.
- Rewerts C, Engel B (1991) ANSWERS on GRASS: integrating a watershed simulation with a GIS. *ASAE paper*, pp 91–2621
- Sheikh V, van Loon E, Hessel R, Jetten V (2010) Sensitivity of LISEM predicted catchment discharge to initial soil moisture content of soil profile. *Journal of Hydrology* 393(3–4):174–185
- Spalević V (1997) *Rekultivacija zemljišta primjenom biološko-retencionih radova u slivu Šekularske rijeke*. Kongres JDPZ. Novi Sad
- Spalević V (1999) *Primjena računarsko-grafičkih metoda u proučavanju oticanja i intenziteta erozije zemljišta u Beranskoj kotlini*. Magistarska teza. Poljoprivredni fakultet Univerziteta u Beogradu, 130.
- Spalević V, Dubak D, Fustić B, Jovović Z, Ristić R (1999) The Estimate of the Maximum Outflow and Soil Erosion Intensity in the Kaludra River Basin. *Acta Agriculture Serbia* IV(8):79–89

- Spalevic V, Spalevic B, Fustic B, Popovic V, Jovovic Z, Curovic M (2000) Characteristics of Erosion Processes and Proposal of measures of Land Reclamation in Upper Part of the Sekularska River drainage basin. *Agriculture and Forestry* 46(3–4):15–28
- Spalevic V, Fustic B Soskic S, Ristic R (2001) The estimate of maximum outflow and soil erosion in the Vinicka riverbasin with the application of the computer-graphic methods. X congress of the Yugoslav soil society. Vrnjacka Banja, Serbia
- Spalevic V, Seker G, Fustic B, Sekularac, Ristic G (2003) Conditions of Erosion of Soil in the Drainage Basin of the Crepulja -Lucka River. International conference, „Natural and Socioeconomic effects of Erosion Control in Mountainous Regions“, Banja Vrujci, Faculty of Forestry, Belgrade University, World Association of S&W Conservation, pp 287–292
- Spalevic V (2011) Impact of land use on runoff and soil erosion in Polimlje. Doctoral thesis, University of Belgrade, Faculty of Agriculture, Serbia, p 1–260
- Spalevic V, Mahoney W, Djurović N, Uzen N and Curovic M (2012) Calculation of soil erosion intensity and maximum outflow from the Rovacki river basin, Montenegro. *Agriculture and Forestry* 58(3):7–21
- Spalevic V, Djurovic N, Mijovic S, Vukelic-Sutoska M, Curovic M (2013a) Soil Erosion Intensity and Runoff on the Djuricka River Basin (North of Montenegro). *Malaysian Journal of Soil Science* 17:49–68
- Spalevic V, Curovic M, Uzen N, Simunic I, Vukelic-Shutoska M (2013b) Calculation of soil erosion intensity and runoff in the river basin of Ljesnica, Northeast of Montenegro. In proceeding of the 24th International Scientific-Expert Conference on Agriculture and Food Industry, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina
- Spalevic V, Nyssen J, Curovic M, Lenaerts T, Kerckhof A, Annys K Van Den Branden J, Frankl A (2013b) The impact of land use on soil erosion in the river basin Boljanska Rijeka in Montenegro. In proceeding of the 4th International Symposium „Agrosym 2013“, 3–6 October, 2013, Jahorina, pp 54–63
- Spalevic V, Curovic M, Tanaskovic V, Oljaca M, Djurovic N (2013r) The impact of landuse on soil erosion and run-off in the Krivaja river basin in Montenegro. The First International Symposium on Agricultural Engineering, 4<sup>th</sup>–6<sup>th</sup> October 2013, Belgrade–Zemun, Serbia, VI:1–14
- Spalevic V, Grbovic K, Gligorevic K, Curovic M and Billi P (2013d) Calculation of runoff and soil erosion on the Tifran watershed, Polimlje, North-East of Montenegro. *Agriculture and Forestry* 59(4):5–17
- Spalevic V, Curovic M, Tanaskovic V, Pivic R, Djurovic N (2013f) Estimation of soil erosion intensity and runoff in the river basin of Bijeli Potok, Northeast of Montenegro. In proceeding of the 1st International Congress on Soil Science, XIII Congress of Serbian Soil Science Society „SOIL–WATER–PLANT“, October, 2013. Belgrade, Serbia
- Spalevic V, Simunic I, Vukelic-Sutoska M, Uzen N, Curovic M (2013e) Prediction of the soil erosion intensity from the river basin Navotinski, Polimlje (Northeast Montenegro). *Agriculture and Forestry* 59:9–20



- Spalevic V, Curovic M, Billi P, Fazzini M Frankl A Nyssen J (2014a) Soil erosion in the Zim Potok Watershed, Polimlje River Basin, Montenegro. The 5th International Symposium „Agrosym 2014“, Jahorina, 23–26 October 2014, Bosnia and Herzegovina, pp 739–747
- Spalevic V, Radanovic D, Behzadfar M, Djekovic V, Andjelkovic A, Milosevic N (2014b) Calculation of the sediment yield of the Trebacka Rijeka, Polimlje, Montenegro. *Agriculture and Forestry* 60(1):259–272
- Spalevic V, Hubl J, Hasenauer H and Curovic M (2014в) Calculation of soil erosion intensity in the Bosnjak Watershed, Polimlje River Basin, Montenegro. The 5th International Symposium „Agrosym 2014“, Jahorina, 23–26 October 2014, Bosnia and Herzegovina, pp 730–738
- Spalevic V, Tazioli A, Djekovic V, Andjelkovic A and Djurovic N (2014r) Assessment of soil erosion in the Lipnica Watershed, Polimlje, Montenegro. The 5th International Symposium „Agrosym 2014“, Jahorina, 23–26 October 2014, Bosnia and Herzegovina, pp 723–729
- Spalevic V, Barović G, Mitrović M, Hodžić R, Mihajlović G, Frankl A (2015a) Assessment of sediment yield using the Erosion Potential Method (EPM) in the Karlicica Watershed of Montenegro. International Conference on Soil, Tirana, Albania; 4–7 May, 2015
- Spalevic V, Frankl A, Nyssen J, Curovic M and Djurovic N (2015b) Calculation of soil erosion intensity in the Sutivanska Rijeka Watershed of Montenegro using the IntErO model. 2nd International Symposium for Agriculture and Food -ISAF 2015, Faculty of Agricultural Sciences and Food – Skopje, 7–9 October, 2015, Ohrid, Macedonia
- Spalevic V, Curovic M, Barovic G, Florijancic T, Boskovic I, Kistic I (2015в) Assessment of Sediment Yield in the Tronosa River Basin of Montenegro. The 9th International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH. October 18–23, 2015, Dubrovnik, Croatia
- Spalevic V, Vujacic D, Barovic G, Simunic I, Moteva M and Tanaskovik V (2015r) Soil erosion evaluation in the Rastocki Potok Watershed of Montenegro using the Erosion Potential Method. 2nd International Symposium for Agriculture and Food – 249ISAF 2015, Faculty of Agricultural Sciences and Food – Skopje, October, 2015, Ohrid, Macedonia
- Spalevic V, Barovic G, Vujačić D, Bozović P, Kalac I, Nyssen J (2015д) Assessment of soil erosion in the Susica River Basin, Berane Valley, Montenegro. International Conference on Soil, Tirana, Albania; 4–7 May, 2015
- Spalevic V, Curovic M, Andjelkovic A, Djekovic V, Ilic S (2015ђ) Calculation of soil erosion intensity in the Nedakusi watershed of the Polimlje Region, Montenegro. 2015; International scientific conference: Challenges in Modern Agricultural Production, December 11, 2014, Skopje, Macedonia. Book of Proceedings, pp 200-206

- Spalevic V, Curovic M, Barović G, Vujacic D, Djurovic N (2015e) Soil erosion in the River Basin of Kisleje Vode, Montenegro. The International conference: Land Quality and Landscape Processes, Keszthely, Hungary 12:1–446
- Spalevic V, Curovic M, Barovic G, Vujacic D, Tunguz V, Djurovic N (2015ж) Soil erosion in the River Basin of Provala, Montenegro. Agrosym 2015, Bosnia and Herzegovina; 10/2015
- Spalevic V, Curovic M, Tanaskovic V, Djurovic N, Lenaerts T and Nyssen J (2015з) Application of the IntErO model for the assessment of the soil erosion intensity and runoff of the river basin Dragovo Vrelo, Montenegro. Balkan Agriculture Congress, 8–10 September 2014. Edirne, Turkey. Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences, Special Issue 1(2014):1072–1079
- Spalevic V, Blinkov I, Trendafilov A, Mukaetov D, Djekovic V, Djurovic N (2015и) Soil erosion assessment using the EPM method: A case study of the Ramcina River Basin, Montenegro. International Conference on Soil, Tirana, Albania; May, 2015
- Spalevic V, Curovic M, Vujacic D, Barovic G, Frankl A and Nyssen J (2015j) Assessment of soil erosion at the Brzava small watershed of Montenegro using the IntErO model. Geophysical Research Abstracts. Vol. 17, EGU2015–15007, 2015. EGU General Assembly 2015
- Spalevic V, Al-Turki AM, Barovic G, Silva ML N, Djurovic N, Souza WS, Batista PVG, Curovic M (2016a) Modeling of Soil Erosion by IntErO model: The Case Study of the Novsicki Potok Watershed of the Prokletije high mountains of Montenegro. Geophysical Research Abstracts, 18, EGU2016–13864, EGU General Assembly 2016
- Spalevic V, Barovic G, Vujacic D, Mijanovic D, Curovic M, Tanaskovic V and Behzadfar M (2016б) Calculation of Sediment yield at the S 7-4 catchment of the Shirindareh Watershed of Iran using the River Basins model. Geophysical Research Abstracts, 18, EGU2016–6673, EGU General Assembly 2016
- Spalevic V, Barovic G, Fikfak A, Kosanovic S, Djurovic M, Popovic S (2016в): Sediment yield and Land use changes in the Northern Montenegrin Watersheds: Case study of Seocki Potok of the Polimlje Region. Journal of Environmental Protection and Ecology 17(3):990–1002
- Spalevic V, Lakicevic M, Radanovic D, Billi P, Barovic G, Vujacic D, Sestras P, Khaledi Darvishan A (2017) Ecological-Economic (Eco-Eco) modelling in the river basins of Mountainous regions: Impact of land cover changes on sediment yield in the Velicka Rijeka in Montenegro. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca: 45(2):602–610
- Spalevic V, Barovic G, Vujacic D, Curovic M, Behzadfar M, Djurovic N, Dudic B, Billi P (2020) The Impact of Land Use Changes on Soil Erosion in the River Basin of Miocki Potok, Montenegro. Water 12:2973
- Suri M, Cebecauer T, Hofierka J, Fulajtar E (2002) Erosion assessment of Slovakia at a regional scale using GIS. Ecology (Bratislava) 21(4):404–422

- Tucker G, Lancaster S, Gasparini N, Bras R (2001) The channel-hillslope integrated landscape development model (CHILD). In: Harmon RS, Doe WW (eds) Landscape Erosion and Evolution Modeling. Kluwer/Plenum Publishers, New York, pp 349–388
- Cebecauer T, Hofierka J (2008) The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. *Geomorphology* 98(3–4):187–198
- Chalise D, Kumar L, Spalevic V, Skataric G (2019) Estimation of Sediment Yield and Maximum Outflow Using the IntErO Model in the Sarada River Basin of Nepal. *Water* 11:952
- Curovic M, Medarevic M, Spalevic V, Borgorno E, Motta R (2015) Forest type classification in the National Park of Biogradska Gora by integrating satellite images, digital geographical data and field measurements. *Proceeding of the 5th International Conference on Environmental and Material Flow Management – EMFM 2015, 05–07 November 2015, Zenica, Bosnia and Herzegovina*, pp 116–123
- Flanagan D, Gilley J, Franti T (2007) Water erosion prediction project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements. *Transactions of the ASAE* 50(5):1603–1612
- Foster GR (1982) Modeling the Erosion Process. In: Haan CT, Johnson HP and Brakensiek DL, Eds. *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*, ASAE Monograph No. 5, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph:297–380
- Willgoose G (2004) Mathematical modeling of whole landscape evolution. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 33(1):443
- Willgoose G, Bras R, Rodriguez-Iturbe I (1991) A coupled channel network growth and hillslope evolution model: 2. Non dimensionalization and applications. *Water Resources Research* 27(7):1685–1696
- Wischmeier W, Smith D (1978) *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning United States*. Dept. of Agriculture. Agriculture Handbook, Washington, DC

## **Soil erosion modeling using computer-graphic methods and geographic information systems**

Velibor Spalevic, Milic Curovic

### **Summary**

The surface of the earth, exposed to gravitational forces, wind, water and ice, is continuously evolving within spatial and temporal proportions. The erosion processes that form the land surface are extremely complex and difficult to quantify over large areas. Remote sensing provides important data that allows us to gain insight into the interactions between physical processes and environmental conditions that control the erosion and development of landforms. Recent advances in mapping technologies, such as the use of LiDAR, hyperspectral imaging, and ground-penetrating radar, have significantly increased the spatial and temporal function of the analysis of these processes. New research suggests that fundamental changes in the initial theories of erosion processes may be made to align with new scientific findings. Analysis and modelling based on the science of geospatial information (GIS) play an important role in better understanding and predictability aimed at minimizing the negative impacts of soil erosion and its deposition. In this paper it is presented the views, theory and methods of modelling soil erosion, sediment transport and sedimentation in watercourses based on the application of computer graphics methods and the use of geographic information systems. The mathematical equations that stand in the algorithmic backgrounds of the models for the control of soil erosion are applied for the calculation of the intensity of erosion, and the modelling of this process of soil degradation. The presented methods explain the movement of eroded material from basins, its deposition downstream, and the influences of these processes on the evolution of natural landscapes of the studied areas. Some approaches that used GIS applications in simple and advanced models are discussed, and models used in the world and in the Western Balkans region are presented.

*Keywords:* Soil, soil erosion, soil degradation, models, web platforms, geographic information systems