

Универзитет у Београду
Шумарски факултет



Мастер рад
Идентификација и значај критеријума за процену ризика од
ерозије земљишта

Професор: др Тијана Вулевић

Студент: Тихомир Шошкић 7/2021

Београд, 2022. год.

Апстракт

У овом раду је указано на значај изучавања ерозије земљишта као најзаступљенијег вида деградације у нашој земљи, а посебно је истакнут значај моделирања ерозије земљишта као приступа који омогућује процену ерозије земљишта и проноса наноса у различитим условима. Ерозиони модели се могу поделити на емпиријске, концептуалне и физички засноване моделе, од којих је свака група представљена, а фокус је стављен на емпиријски засноване моделе. У емпиријске моделе спадају Метод потенцијала ерозије (МПЕ) који је развијен код нас и модели развијени у другим земљама као што су Universal Soil Loss Equation (USLE), Pacific Southwest Agency Committee (PSIAC), Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Soil Loss Estimation Model for Southern Africa (SLEMSA), Sediment Delivery Distributed (SEDD) и Geoland2 (G2). Модели су развијени за одређена подручја и разликују се по комплексности и захтевима за улазним параметрима. У раду су анализирани улазни параметри емпиријских модела и идентификовани су најзначајнији фактори који доприносе појави и развоју ерозионих процеса. У те факторе се убрајају: топографија, педологија, геологија, структура земљишног покривача, клима и антропогене активности. Применом Best Worst методе вишекритеријумског одлучивања одређене су тежине (значај) ових критеријума на основу преференција једног експерата из области заштите од ерозије и уређења бујица. Према резултатима, највећу тежину има структура земљишног покривача, па антропогене активности, еродибилност земљишта, топографија, клима и најмањег значаја су геолошке карактеристике терена. Од посебног значаја би била имплементација овог модела у интеграцији са ГИС-ом у циљу просторног приказа површина угрожених ерозијом и дефинисања мера и радова у превенцији ерозије. У раду је дата шема примене метода вишекритеријумске анализе и ГИС-а разматрајући предложене критеријуме.

Кључне речи: ерозиони модели, критеријуми за процену ерозије, вишекритеријумско одлучивање, Best Worst метода

Abstract

In this paper, the importance of studying soil erosion as the most common form of degradation in our country is pointed out, and the importance of soil erosion modeling as an approach that enables the assessment of soil erosion and sediment transport in different conditions is highlighted. Erosion models can be divided into empirical, conceptual and physically based models, of which each group is presented, and the focus is placed on empirically based models. Empirical models include the Erosion Potential Method (MPE) developed here and models developed in other countries such as Universal Soil Loss Equation (USLE), Pacific Southwest Agency Committee (PSIAC), Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Soil Loss Estimation Model for Southern Africa (SLEMSA), Sediment Delivery Distributed (SEDD) and Geoland2 (G2). Models are developed for specific areas and differ in complexity and requirements for input parameters. The paper analyzed the input parameters of empirical models and identified the most significant factors that contribute to the emergence and development of erosion processes. These factors include: topography, pedology, geology, land cover structure, climate and anthropogenic activities. By applying the Best Worst multi-criteria decision-making method, the weights (importance) of these criteria were determined based on the preferences of one experts in the field of soil erosion protection and flood management. According to the results, land cover has the greatest weight, followed by the anthropogenic factor, soil erodibility, topography, climate, and with the least importance is geology. Of particular importance would be the implementation of this model in integration with GIS in order to spatially display surfaces threatened by erosion and define measures and works in the prevention of erosion. The paper presents a flowchart of multi-criteria analysis and GIS methodology application considering the proposed criteria.

Key words: soil erosion models, criteria for erosion assessment, multicriteria decision analysis, Best Worst method

Резиме

Деградација земљишта је све присутнији проблем који утиче на прехранбену индустрију, биодиверзитет и климатске промене, чиме се доводи у питање и опстанак људи. Најзаступљенији облик деградације земљишта је ерозија земљишта. Ерозија представља глобални проблем проузрокован природним факторима и дејством човека. Водна и еолска ерозија земљишта су најзаступљенији облици деградације у овом делу Европе, а поред ова два типа ерозије, све заступљенији постаје утицај антропогеног фактора који се огледа кроз процесе урбанизације и неадекватног коришћења дате површине и то најчешће конверзијом пољопривредног земљишта у грађевинско, неконтролисано испашом и неодговарајућим техникама обраде.

Боље разумевање самог процеса ерозије у протеклих неколико деценија довело је до развоја модела који обједињују математичке једначине које описују процесе одвајања честице земљишта, њиховог даљег транспорта и одлагања. Модели се могу класификовати на емпиријске, физичке, концептуалне и хибридне и имају различите улазне параметре који се користе за процену ризика од ерозије земљишта.

У овом раду су анализирани улазни подаци емпиријских модела у циљу идентификације критеријума који су присутни код већине ових модела и који имају захтеве за улазним подацима до којих се може лако доћи у нашим условима. Издвојени су улазни параметри: Методе Потенцијала Ерозије (МПЕ), Universal Soil Loss Equation (USLE), Pacific Southwest Agency Committee (PSIAC), Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Soil Loss Estimation Model for Southern Africa (SLEMSA), Sediment Delivery Distributed (SEDD) и Geoland2 (G2) модела. На основу проучене литературе, издвојено је шест критеријума: топографија, педологија, геологија, структура земљишног покривача, клима и антропогене активности. Топографија је критеријум који представља утицај рељефа на појаву ерозионих процеса. Један од примарних топографских карактеристика је нагиб и дужина падине, а у разматрање се могу узети и надморска висина, експозиција и закривљеност терена. Геолошке карактеристике подручја се огледају у геолошкој грађи у којој учествују стене различите старости. Стене имају утицај на генезу земљишта, а касније и на његове особине, које су значајне за појаву и развој ерозионих процеса. Еродибилност земљишта је осетљивост земљишта на ерозију и може се проценити анализом различитих параметара као што су текстура, структура, порозност, дубина земљишта, садржај органске материје и др. Структура земљишног покривача се односи на покривеност површине земљишта вегетацијом, водом, голим земљиштем, урбаном инфраструктуром, што утиче на угроженост земљишта ерозијом.. Од климатски фактора за процес ерозије су најзначајнији падавине и температура ваздуха. Антропогене активности се односе на негативан утицај човека (кроз неконтролисану урбанизацију, интензивну пољопривредну производњу,

крчење шума и др.) као и позитиван утицај човека (извођење противерозионих радова и мера).

У раду је предложено да се одабрани критеријуми отежају јер немају подједнак значај на појаву и развој ерозионих процеса. У ту сврху се могу корисити методе вишекритеријумске анализе, које разматрају више критеријума приликом одлучивања. Указано је на примену ових метода у процени ерозије земљишта, за шта су највише коришћене АНР (Analytic Hierarchy Process), ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality), PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHOD for Enrichment Evaluation) и WSM (Weighted Sum Method) и др.

АНР метода је један од највише коришћених метода, али је за потребе овог рада коришћена Best Worst метода вишекритеријумског одлучивања, која такође прорачун тежина критеријума врши на основу поређења критеријума у паровима, који је он овде значајно редукован.

Дата је шематски приказ структуре модела који би се могао применити интеграцијом једне методе вишекритеријумске анализе (методе једноставних адитивних тежина - SAW) и географских информационих система. Указано је на нека побољшања које је потребно урадити убудуће, а која се односе на укључење већег броја доносиоца одлука и примену групног одлучивања у циљу одређивања тежина.

Садржај

1. Увод.....	1
1.1 Еолска ерозија.....	1
1.2 Водна ерозија.....	2
1.3 Моделирање.....	4
2. Модели за процену ризика од ерозије земљишта.....	4
2.1 Метод потенцијала ерозије (ЕРМ).....	6
2.2 Модел G2 (Geoland2).....	8
2.3 USLE модел.....	9
2.4 RUSLE модел.....	10
2.5 PSIAC модел.....	11
2.6 SEDD модел.....	12
2.7 SLEMSA модел.....	13
3. Вишекритеријумско одлучивање.....	13
3.1. Методе вишекритеријумске анализе и њихова примена.....	14
3.1.1. Best-Worst меотода.....	15
4. Резултати и дискусија.....	17
4.1. Идентификација критеријума за процену ризика од ерозије земљишта.....	17
4.2. Одређивање значаја критеријума за процену ризика од ерозије земљишта.....	19
5. Закључак.....	22
6. Референце.....	24

1. Увод

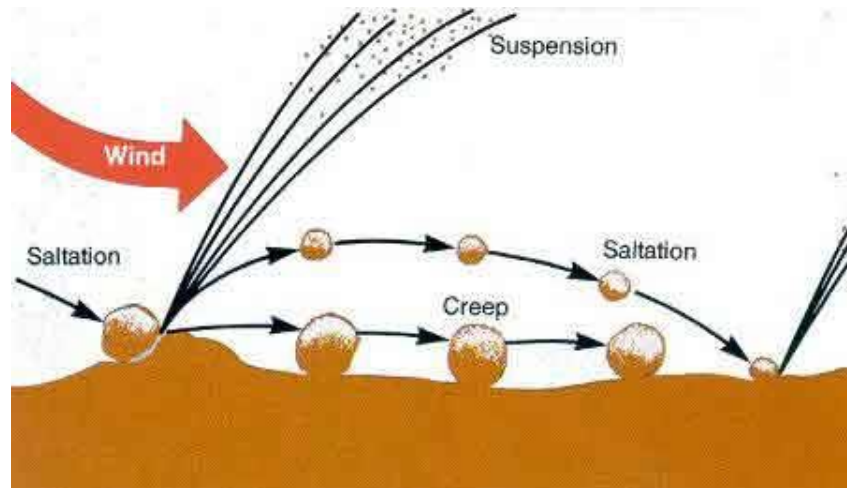
Земљиште је необновљив ресурс, који је у већој или мањој мери изложен деградационим процесима. Велики проблем представља и његово обнављање који у условима наше земље износи 0,1 mm годишње (Ristić et al., 2012). Деградација земљишта је све учестлији проблем и веома важна ставка у савременом свету (Белановић – Симић, 2022). Деградација директно утиче на прехранбену индустрију, биодиверзитет и климатске промене са чиме се доводи у питање опстанак и постојање људи на нашој планети (Белановић–Симић, 2022). Ерозија се истиче као један од најважнијих проблема деградације земљишта (Jain, Das, 2010).

Ерозија је природни процес који представља разарање постојећег терена услед дејства одређених сила (Белановић-Симић, 2022). Разни параметри (променљиви и непроменљиви) имају утицај како на саму ерозију тако и на продукцију ерозионог материјала. Неки од најзначајнијих параметара су: рељеф, клима, хидролошки услови средине, осцилације подземних вода, геолошке и педолошке карактеристике подручја итд. (Половина, 2022). Поред набројаних природних фактора велики утицај има и антропогени фактор. Утицај антропогеног фактора на земљиште огледа се кроз процесе урбанизације и неадекватног коришћења дате површине и то најчешће конверзијом пољопривредног земљишта у грађевинско, неконтролисано испашом и неодговарајућим техникама обраде. Овим процесима долази до интензивирања ерозије на читавој планети (Половина, 2022).

1.1 Еолска ерозија

У прошлости се еолској ерозији није придавао велики значај све док није утврђено да еолска ерозија у великом делу доводи до појаве наглог смањења плодности земљишта и све већег атмосферског загађења (Funk and Reuter, 2006). Ефекти деловања ове врсте ерозије су присутни како на самом месту процеса дефлације тј. *on site effects* и на осталим локацијама када их називамо *off site effects* (Белановић-Симић, 2022). Присутност овог типа ерозије је најчешћи на аридним, семиаридним и равничарским подручјима. Еолска ерозија представља процес у коме се откидају и премештају честице земљишта под дејством ветра. Честице земљишта ће се покренути када је кинетичка енергија ветра довољно јака да покрене честице земљишта, када је земљиште подобно ерозији због својих физичких и хемијских својстава и услед неких других врло битних недостатака попут изостанка вегетације, нееродибилног материјала или снега (Белановић-Симић, 2022). Процес саме ерозије се састоји од два основна процеса а то су дефлација и абразија (Laity, 2016), док су три основна интерактивна процеса откидање, транспорт и депоновање материјала. Откидање представља примаран процес ерозије ветра, када брзина ветра достигне и прекорачи степен брзине покретања честица. Чим се честица земљишта откине тада почиње

транспорт. Транспорт се може вршити на три начина, а то су котрљање (кретање по површини земље), салтација (кретање у скоковима на висини од 15-30cm) и суспензија (лебдећи начин) (Белановић-Симић, 2022). Највећи проценат честица земљишта се транспортује салтацијом и то чак 50-70% честица покренутих ерозијом ветра, нешто мањи проценат честица се креће суспензијом 30-40%, а најмањи број честица се котрља по површини 5-25% (White, 1997). Како би се измерио интензитет ерозивних процеса насталих ерозијом ветра дизајниран је велики број хватача еолског наноса, који „хватају“ покренуте честице земљишта (Fryrear et al., 1991).



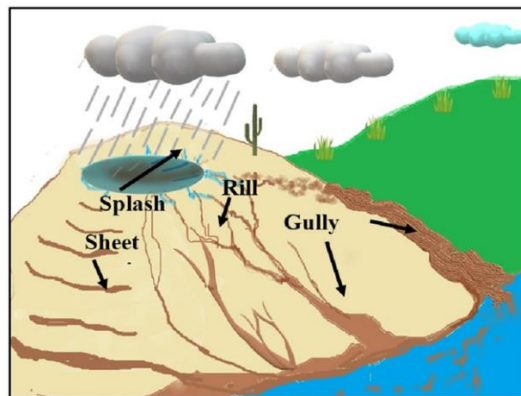
Слика 1. Начин кретања честица земљишта

(https://webapp.agron.ksu.edu/agr_social/m_eu_article.throck?article_id=139)

1.2 Водна ерозија

Водна ерозија започиње ударом киших капи о површину тла чиме се откидају честице земљишта и даље транспортују површинским отицајем што за последицу има одношење земљишта и формирање бразда, јаруга и других облика ерозије (Белановић-Симић, 2022). Када вода изгуби своју енергију настаје и завршна фаза водне ерозије, а то је фаза таложења где се сав материјал покупљен из горњег дела слива спушта и сакупља углавном у дну неког нагиба (Kostadinov, 2008). Цео процес кретања падавинске воде настаје кондензацијом водене паре у атмосфери где се формирају кишне капи чије димензије и брзина, а самим тим и кинетичка енергија зависе од интензитета кише (што је интензитет кише јачи појачава се и удар капи о тло) (Белановић-Симић, 2022). У случају да земљиште има веома лоше карактеристике и да је вегетација слабо изражена губици у првој фази могу износити и до 260 t/ha (Gavrilović, 1972). У почетку се откидају честице које су најслабије везане, а онда када остану тврде честице које ток не може да помери долази до растварања и одношења тог дела честица (Zachar, 1982). Кишне капи које са порастом висине делују све интензивније, воде главну улогу у откидању честица док на другој страни површински отицај доминира у процесу покретања и самог транспорта честица (Zachar, 1982). Сигурно

најважнији фактор који утиче на водну ерозију јесте влажност земљишта у тренутку падавина, односно степен засићења влагом земљишних шупљина и пора. Овај фактор је веома битан због самог процеса инфилтрације воде који искључује површинско отицање (Kostadinov, 2008). Количина воде која ће се инфилтрирати у одређено земљиште зависи од: интензитета падавина, претходног садржаја воде у земљишту, гранулометријског састава, садржаја органске материје, карактеристика матичног супстрата, земљишног покривача и присутности вегетације као и њеног квалитета (Morgan, 2005). С обзиром да инфилтрација расте са већином шупљина и пора највећи капацитет поседују песковита земљишта, док најмањи имају глиновита (Белановић-Симић, 2022). Како се површински отицај креће низ падину силом земљине теже, велику улогу на брзину кретања имају нагиб и морфологија падина, са већом брзином повећавају се и транспортоване честице (Белановић-Симић, 2022). У нашој земљи постоји око 11.500 бујичних водотокова на сликовима разних величина (Ристић и сар., 2016). Бујични водотоци се углавном налазе јужно од Саве и Дунава, али има их и на простору Војводине (Фрушка гора, Вршачки и Тителски брег) (Ристић и сар., 2016). Према Карти ерозије Србије из 1983. године (Lazarević, 1983), утврђено је да ерозиони процеси делују на 86,39% укупне територије и то: врло слаба ерозије обухвата 41,19%; слаба ерозија 18,16%; осредња ерозија 12,67%; јака ерозија 13,21%; експесивна ерозија 1,16%. „Лична карта“ бујичних поплава је брза појава плавног таласа са великим учешћем чврсте материје и израженом деструктивношћу. У периоду од 1950-2018. ове поплаве су однеле око 130 људских живота и материјалну штету у износу од око 12.000.000.000 евра (Ристић, 2016). Бујичне поплаве представљају сталну претњу са озбиљним социоекономским последицама. У последњих неколико година бујичне поплаве су постале све израженији проблем услед деградације шумских површина, неконтролисана урбанизације и неконтролисаних пољопривредних мера (Ристић и сар., 2016). Бујични ток са собом може понети и разне полутанте који се налазе у земљишту који су се ту нашли услед коришћења разних врста ђубрива ради повећања приноса одређених биљака, ова средства представљају сталан извор загађења који се површинским или подземним токовима преносе кроз земљиште (Белановић-Симић, 2022).



Слика 2. Шематски приказ деловања водне ерозије

(https://www.researchgate.net/figure/The-types-of-soil-erosion-by-water_fig1_346958188)

Као резултат ових процеса настаје неколико милиона тона ерозионог материјала, од чега највећи проценат (56%) настаје деловањем плувијалне ерозије (Elirehema, 2001). Један од најважнијих проблема који се провлачи кроз људску историју јесте смањење обрадивих површина које су основ за производњу хране, а самим тим и опстанак људске популације. Према истраживањима 450.000.000 ha обрадивог земљишта је било непродуктивно до средине 1990-их, а такође се процењује да 10.000.0000 ha обрадивог земљишта нестане због ерозије земљишта (Белановић-Симић, 2022). На 75% укупне површине наше земље делује неки облик ерозије (Ристић, Никић, 2007), а просечна годишња продукција ерозионог материјала износи близу 30 милиона m^3 , од чега око 8 милиона m^3 доспева у корита река и потока, што је узроковало појаву велике количине блата и камена са катастрофалним епилогом у поплавленим местима Србије током маја 2014. године (Ристић, 2016).

1.3 Моделирање

Моделирање представља веома важну научну методу, која подразумева примену аналогije (Иконовић, 2007). Модел је систем уређених структура и односа аналогних предмету истраживања и представља везу између апстрактно-теоретског мишљења и објективне стварности (Adamović et al., 2017).

Основ ерозионог моделирања је разумевање физичких закона и процеса који се одвијају у природи (Половина, 2022). Модели омогућавају да се природни процеси опишу математичким формулацијама (Harmon, Doo, 2001). Ерозионим моделима се упрошћавају процеси у реалном времену, а је један од циљева модела је одређивање најважнијих фактора тих процеса (Половина, 2022). Боље разумевање самог процеса ерозије у протеклих неколико деценија довело је до развоја модела који се заснивају на примени физичких закона и анализи природних процеса. Модели обједињују математичке једначине које описују процесе одвајања честице земљишта, транспорта и одлагања (Haile, Feten, 2010).

Процена губитка земљишта услед ерозије ветром поред директног мерења може се измерити и коришћењем WEQ, RWEQ и WEPS модела.

Процена губитка земљишта услед ерозије водом може се извршити применом различитих модела, а неки од њих су: МПЕ (метод потенцијала ерозије), USLE, RUSLE, SEDD, G2 и др. Моделирање водене ерозије пружа велику помоћ и даје кључне информације о појави и врсти ерозије као и о могућем сценарију у случају појаве поплавног таласа (Christos et al., 2014).

2. Модели за процену ризика од ерозије земљишта

Са развојем ерозионих модела започело се 1930-их година 20. века како би се развио концепт заштите пољопривредног земљишта (Zingg, 1940). Прва истраживања су обављена

на нивоу парцела са покушајима примене различитих конзервационих мера. Касније су уведени параметри који узимају у обзир структуру земљишног покривача (Smith, 1941), специфичне начине коришћења земљишта, потенцијалну еродибилност (Musgrave, 1947) и утицај кинетичке енергије кишних капи (Ellison, 1947), што је довело до развоја Универзалне једначине за процену губитака земљишта (енг. Universal Soil Loss Equation-USLE) (Wischmeier, Smith, 1978). Модели се могу поделити на емпиријске, концептуалне и физички засноване моделе (De Vente, 2009). Научници на челу са Hajjgholizadeh (2018) су предложили и формирање тзв. „хибридних“ модела који обједињују све наведене концепте. Одабир оптималног модела за конкретну намену подразумева разматрање следећих фактора (Hajjgholizadeh et al., 2018):

1. Потребан број улазних параметара,
2. Концептуални оквир применљивости модела,
3. Тачност и валидност модела,
4. Употребљивост и осетљивост модела,
5. Компоненте модела,
6. Оперативност (енг. „user-friendliness“),
7. Циљеви модела,
8. Распон излазних резултата,
9. Хардверски захтеви.

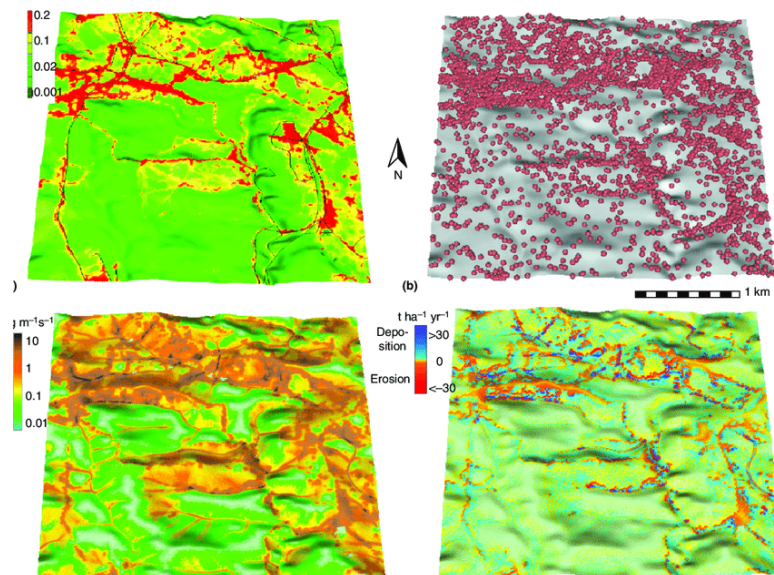
Три основна модела за процену ризика од ерозије земљишта су:

- емпиријски
 - физички и
 - концептуални.
1. Емпиријски модели представљају симулацију природних процеса, претежно заснованих на експерименталним истраживањима и мерењима, након чега следи статистичка обрада добијених резултата (Половина, 2022). Ови модели се могу применити за прорачун ерозионе продукције и проноса наноса било на нивоу слива, локалне самоуправе, региона, државе или континента (Prosser et al., 2001). Њихова предност је то што захтевају мали број улазних параметара, а недостатак тај што се могу применити на подручју где су развијени (Половина, 2022).
 2. Физички засновани модели се заснивају на мерењима и анализом локалних услова, и опису појединих процеса помоћу математичких израза у циљу добијања излаза - отицаја, продукције ерозионог материјала и проноса наноса на неком сливу (Kandel, et al., 2004, Pandey et al, 2016). Физички засновани модели захтевају велики број улазних параметара (Pandey et al., 2016) и не препоручује се њихова примена на површинама веће размере због великог броја хетерогених улазних података (Половина, 2022). Примери физичких модела су ANSWERS (Areal Nonpoint Source

Watershed Environment Response Simulation), WEPP (Watershed Erosion Prediction Project), KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion Model), PESERA (Pan-European Soil Erosion Risk Assessment model) и др.

3. Концептуални модели представљају комбинацију емпиријских и физичких заснованих модела који су развијени на основу једначина континуитета за протицај воде и пронос наноса (Lal, 1994, Copeland, 2003). Вредности појединих параметара који се користе у концептуалним моделима се добијају калибрацијом у односу на мерене податке (Abbott et al., 1986). Пример концептуалног модела су EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) и SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

Данас се ерозионо моделирање врши применом ГИС технологије (Слика 3).



Слика 3. Ерозионо моделирање базирано на ГИС-у

(https://www.researchgate.net/figure/GIS-based-erosion-modeling-using-path-sampling-method-a-C-factor-at-the-study-site_fig10_249009078)

Према GASEMT бази подата, највећу примену од ерозионих модела имају: RUSLE, USLE, WEPP, SWAT, WATEM/SEDEM, RUSLE-SDR, USLE-SDR (Borrelli et al., 2021). На тој листи је и метод потенцијала ерозије (EPM).

2.1 Метод потенцијала ерозије (EPM)

Метод потенцијала ерозије (EPM - Erosion Potential Method) или још називан Метод професора Гавриловића, представља емпиријску методу за процену губитка земљишта, ерозиону продукцију и пронос наноса у сливу. Метод је развијен на основу дугогодишњих

теренских истраживања, осматрања и мерења, на бујичним сливовима Јужне, Западне и Велике Мораве, Ибра, Тимока и Вардара (Gavrilović, 1972).

У Србији, Метод потенцијала ерозије је у примени више од педесет година и поред тога метод се и даље усавршава према савременим сазнањима, а нарочито са експанзијом примене географских информационих система (Половина 2022). Иако се на првом месту овај метод бави прорачуном продукције и проноса наноса, метод је исто тако створен и за потребе картирања ерозионих процеса, ерозионих подручја и квантитативну класификацију бујичних токова (Gavrilović, 1972; Костадинов, 2008). У Србији и у бившим земљама СФРЈ овај метод је неизоставан сегмент за инжењерске проблеме који се односе на превенцију појаве ерозије земљишта и бујичних поплава у области водопривреде, за потребе израде водопривредних основа, студија и пројеката (Половина, 2022). Такође Метод потенцијала ерозије је нашао примену и у другим земљама.

Метод користи следеће квантитативне факторе животне средине: геолошке и педолошке карактеристике, земљишни покривач, коефицијент видљивих трагова ерозије, климатске чиноце (средња годишња температура и средње годишње падавине) и топографске факторе. На основу ових фактора, прорачунава се коефицијент ерозије (Z), укупна и средња годишња продукција ерозионог материјала (W_{god}), као и средња годишња запремина укупних количина вученог и суспендованог наноса (G_{god}). Метод потенцијала ерозије се показао као најквалитетнији и најпрецизнији, у поређењу са мереним подацима (Половина, 2022).

$$W_{god} = T * H_{god} * \pi * \sqrt{Z^3} * A$$

Где је:

W_{god} – Укупна продукција ерозионог материјала на сливу

H_{god} – средња годишња количина падавина

T - Температурни коефицијент подручја: $T = \sqrt{((t/10)+0,1)}$

Z – коефицијент ерозије $Z = Y * X * a * (\varphi + \sqrt{Jsr})$

A – површина сливног подручја

Коефицијент ерозије (Z)

Како је ерозија земљишта просторна појава, у дводимензионалном референтном систему се према класификацији на основну аналитички израчунатог коефицијента ерозије. Коефицијент није у зависности од климатских карактеристика, већ искључиво од карактеристика педолошких и/или геолошких формација, вегетационог покривача, рељефа и видљиве заступљености ерозионих процеса (Половина 2022).

Коефицијент ерозије се рачуна применом следећег математичког израза:

$$Z = Y * X * a * (\varphi + \sqrt{Jsr})$$

Где је:

Y – реципрочна вредност коефицијента отпора земљишта на ерозију

X*a – коефицијент уређења слива или подручја

Isg – средњи пад слива

Ф – бројни еквивалент видљивих и јасно изражених процеса ерозије на сливу

Табела 1. Вредности коефицијента ерозије (Z)

Категорија разорности	Јачина ерозионих процеса у сливу и кориту	Тип владајуће ерозије	Коефицијент ерозије (Z)	Средња вредност коефицијента ерозије (Z)
I	Експесивна ерозија	дубиснка мешовита површинска	>1,51 1,21-1,50 1,01-1,20	1,25
II	Јака ерозија	дубиснка мешовита површинска	0,91-1,00 0,81-0,90 0,71-0,80	0,85
III	Осредња ерозија	дубиснка мешовита површинска	0,61-0,70 0,51-0,60 0,41-0,50	0,55
IV	Слаба ерозија	дубиснка мешовита површинска	0,31-0,40 0,25-0,30 0,20-0,24	0,30
V	Врло слаба ерозија	трагови ерозије	0,01-0,019 и мање	0,01

2.2 Модел G2 (Geoland2)

Модел G2 припада групи емпиријских модела и настао је после MPE и RUSLE, кроз пројекат Geoland2 (Panagos et al., 2012), у сарадњи Обједињеног истраживачког центра (JRC-Joint Research Centre) и Лабораторије за управљање шумама и примену даљинске детекције на Аристотеловом универзитету у Солуну. Модел омогућава процену губитака земљишта који се изражавају у тонама по хектару, на месечном или годишњем нивоу. Структура улазних података је веома слична моделу (R)USLE (Wischmeier, Smith, 1978; Renard et al., 1997) и Методи Потенцијала ерозије (Gavrilović, 1972). G2 модел се састоји од два главна подмодела: један служи за прорачун ерозионе продукције материјала (G2los), а други за прорачун проноса наноса (G2sed). Модел G2los обухвата прорачун улазних параметара према моделу RUSLE и Методи Потенцијала ерозије. Модел G2sed се ослања на прорачун проноса наноса по Методи Потенцијала ерозије уз коришћење коефицијента ретенције Ru (Половина 2022).

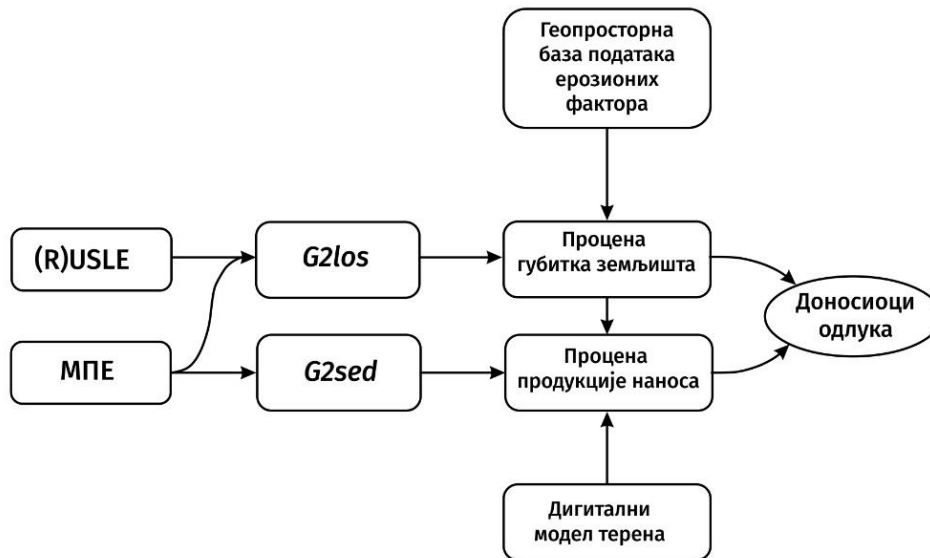
Сама структура модела и примена улазних параметара је прошла разне модификације и даље се развија. Месечни или просечни годишњи губици земљишта одређују се на основу 5 ерозионих фактора, према формули:

$$E = R/V * S * T/L$$

Где је:

E – средњи годишњи губитак земљишта T - фактор топографског утицаја
 R – фактор ерозионе снаге кише L - фактор ефекта предеоног обрасца
 V – вегетациони фактор ретенције
 S – фактор еродибилности земљишта

Према формули ерозиони фактори се могу поделити на природне и антропогене чиниоце. Фактори као што су R, S и T су природни чиниоци настанка ерозије, док су фактори V и L антропогени чиниоци, односно одражавају утицај начина коришћења земљишта (Karudas, Panagos, 2018). У погледу сталних и варијабилних параметара од значаја за настанак ерозије земљишта, фактори R и V се третирају као променљиви током године. Фактори ерозионе снаге кише R, представља кумулативни утицај свих падавина током одређених месеци, док вегетациони фактор ретенције одражава заштитну улогу, која зависи од степена покривности вегетације и начина управљања земљиштем током посматраног периода. Фактори S, L и T се могу сматрати и сталним и статичним факторима (Половина 2022).



Слика 4. Дијаграм тока примене и доприноса модела (R)USLE и МПЕ у моделу G2 и њихов однос са улазним и излазним подацима (Половина, 2022)

2.3 USLE модел

Универзална једначина губитка земљишта (USLE-Universal Soil Loss Equation) је широко коришћен математички модел који описује процесе ерозије земљишта. Савремена анализа и примена овог модела је данас практично незамислива без примене ГИС технологија, која

је веома битна нарочито са аспекта прецизности али и утрошка времена (Белановић-Симић, 2022). Овај модел у теорији пружа најбољу заштиту на земљиштима средње текстурне класе, на нагибима 3-18% и дужинама падина мањим од 120 метара (Kadović, 1999).

USLE модел је резултат великог истраживачког подухвата који је спроведен у природним и симулативним условима на 49 огледних поља у 37 држава САД и на бази 10.000 огледних поља и прорачунатог еквивалента са 2.000 поља (Белановић-Симић, 2022). У овој методи имамо 6 главних фактора који утичу на процес ерозије земљишта, њихов продукт је губитак земљишта (Белановић-Симић, 2022). Овај модел се деценијама користио како у САД-у тако и у осталим деловима света, ревидирана универзална једначина губитка тла (RUSLE) и модификована универзална једначина губитка тла (MUSLE) и даље се користе у сличне сврхе.

Једначина има једноставан облик производа:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

A – средња годишња вредност ерозионих губитака земљишта

R – фактор ерозивности кише

K – фактор еродибилности земљишта

LS – топографски фактор

C – фактор вегетације и начина коришћења земљишта

P – фактор конзервационих мера

Међу наведеним факторима, K и LS представљају статичне параметре који се веома споро и неприметно мењају током времена. Док су са друге стране ту C и P фактори који су показатељи заштите земљишта и у великој мери зависе од антропогеног фактора (Белановић-Симић, 2022). За разлику од горе наведених R фактор се може назвати активним ерозионим показатељем, са малим антропогеним утицајем (Nearing et al., 2017).

2.4 RUSLE модел

Дакле, како је већ речено 1930-их година почело је испитивање и стварање USLE модела који је претеча и основа већини данашњих модела: RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard et al., 1991); MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) (Williams, 1975); ANSWERS, AGNPS и SWAT (Половина, 2022). Од свих модификованих облика, RUSLE модел је модел који је најближи оригиналном моделу и има најширу примену у поређењу са осталим модификацијама. Настао је као софтвер са прилагођеним улазним параметрима како би се прорачунао губитак земљишта не само на падинама, него и на комплекснијим топографским формама (Foster et al., 2003). На подручју земаља које су чланице Европске Уније, Panagos и сарадници (2015) су применили модел RUSLE користећи квантификоване и верификоване улазне податке високе резолуције, уз мање модификације, на основу чега је настао модел RUSLE2015 (Panagos et al., 2015). Моделом

RUSLE се може прорачунати средњи годишњи губитак земљишта по јединици површине, као производ пет ерозионих фактора према формули:

$$A = R * K * LS * C * P$$

A – средња годишња вредност ерозионих губитака земљишта;

R – фактор ерозионе снаге кише;

K – фактор еродибилности земљишта;

LS – топографски фактор;

C – фактор вегетације и начина коришћења земљишта и

P – фактор вегетације и начина коришћења земљишта.

Како би се прорачунао губитак земљишта према моделу RUSLE, потребно је да се сваки ерозиони фактор појединачно генерише на основу сложених формула. Излазни резултат сваког ерозионог фактора у ГИС окружењу је у форми растерске базе података као посебан слој (Половина, 2022).

2.5 PSIAC модел

PSIAC (Pacific Southwest Inter-Agency Committee) се предлаже за коришћење у процени приноса седимената на југозападу Пацифика. Ове класификације су намењене у широком плану а не за специфичне пројекте, где би била потребна детаљнија истраживања приноса наноса (PSIAC, 1968). Приноси седимента у подручју Пацифичког јужног обода су подељени у пет класа просечног годишњег приноса који се изражава у акра стопама по квадратној миљи:

Табела 2: Просечни годишњи принос и мерење

1	>3,0	acre-feet/square mile
2	1,0-3,0	acre-feet/square mile
3	0,5-1,0	acre-feet/square mile
4	0,2-0,5	acre-feet/square mile
5	<0,2	acre-feet/square mile

Препоручено је девет фактора за разматрање при одређивању класификације седимената, то су: геологија, земљиште, клима, отицање, топографија, коришћење земљишта, фактор покривености тла, ерозија земљишта на нагибу, ерозија канала и транспорт земљишта (PSIAC, 1968). Карактеристике сваког од девет фактора који тај фактор чине високим, умереним или ниским нивоом издашности седимента који су приказани у Табели 4. Карактеристика приноса седимената за сваки фактор је нумерисана вредност која представља њен релативни значај у оцењивању приноса. Оцена приноса је збир вредности одговарајућих карактеристике за сваки од девет фактора (PSIAC, 1968).

Табела 3. Оцена и класа приноса седимената.

Оцена:	Класа:
>100	1
75-100	2
50-75	3
25-50	4
0-25	5

Фактори су оквирно описани, у сврху избегавања сложености и они независно утичу на количину приноса наноса. Променљив утицај било ког фактора је настао као резултат варијабилности осталих. Рачунање овог променљивог фактора у било којој другој области захтевало би много више истраживања која нису доступна за сврхе широког планирања (PSIAC, 1968). Сваки од девет фактора је упарен са неким другим утицајем са изузетком утицаја топографије. То јест, геологија и тло су директно повезани; клима и отицање; покривач тла и коришћење земљишта као и ерозија планинских канала (PSIAC, 1968).

2.6 SEDD модел

Овај модел је заснован на Универзалној једначини губитка земљишта (USLE), у којој се разматрају различити изрази ерозивности и топографски фактори заједно са односом за процењујућу испоруку седимента сваке морфолошке јединице. Затим се SEDD модел калибрише помоћу мерења приноса наноса, падавина и отицања на годишњим и догађајним скалама, у три мала Калабријска експериментална основа (Ferro, Porto, 2001). На нивоу догађаја, анализа је показала добро слагање између истражених и израчунатих приноса сливних седимената који се могу добити коришћењем једноставног фактора ерозивности падавина (Ferro, Porto, 2001). Анализа развијена на годишњем нивоу показала је да се поузданост модела повећава са скале догађаја на годишњу скалу. Коначно, на крају је коришћена Монте Карло техника за процену ефеката несигурности параметара модела на израчунати принос седимента (Ferro, Porto, 2001). На нивоу слива, предвиђање приноса седимента, односно количина седимената који се приноси у датом временском интервалу од еродирајућих извора кроз каналску мрежу до испуста из слива, може се извести спајањем модела ерозије тла са математичким функцијама којим се изражава ефикасност транспорта седимента на падинама и мрежи канала (Ferro, Porto, 2001). Модели ерозије тла генерално предвиђају ерозију између бушилица, стога, процеси јаруга и канала треба да буду одвојено моделирани да би се добио укупан буџет седимента у сливу (Ferro, Porto, 2001). Производња седимента (Y), сваке морфолошке јединице на које је слив подељен, једноставно се израчунава помоћу следеће једначине:

$$Y = SDR * A * SU$$

Где је:

SDR – однос количине транспортованог наноса и укупне ерозије

A – губитак земљишта: дефинише USLE једначином (Wischmeier, Smith, 1965)
SU – површина морфолошке јединице

2.7 SLEMSA модел

Ерозија тла – одвајање и транспорт честица из земљишних агрегата ерозивним агенсима сматра се једним од најзначајнијих еколошких проблема Јужне Африке (Meadows, 2003). У Јужној Африци, отприлике 6 милиона домаћинстава има велики део прихода од пољопривредне производње (South African Department of Agriculture, 2007). Отприлике 25% становништва директно зависи од пољопривредне делатности која користи око 80% укупне површине земље (Breetzke, Koomen, Critchley, 2014). Кључна ствар у борби против пошасте ерозије тла у Јужној Африци је процена количине и стопе губитка земљишта у земљи на различитим нивоима (Breetzke, Koomen, Critchley, 2014). Ово ће олакшати покретање регионалне стратегије планирања коришћења земљишта и примену одговарајућих пракси при развоју и неги самог земљишта. За процену губитка земљишта у Јужној Африци развијен је и користи се SLEMSA модел.

GIS, програм без којег би коришћење модела било незамисливо и овде игра велику улогу, он се користи за израчунавање појединачних фактора SLEMSA (Soil Loss Estimation Model for Southern Africa) које, након множења, обезбеђују укупан потенцијални губитак земљишта унутар слива. Фактори који SLEMSA користи су: фактор дужине нагиба, фактор еродибилности и фактор исцрпљености земљишта.

Стопе губитка земљишта су класификоване у пет категорија у распону од веома ниске, када се вредности губитка земљишта крећу између 0-1 t/ha/god, до веома високих када вредности губитка земљишта прелазе 25 t/ha/god. Вредности губитка земљишта су класификоване према типовима коришћења земљишта јер то омогућава ефикасну поделу улазних параметара сваког модела тла, чиме се пружа користан увид у компоненте које доприносе израчунатим стопама губитка земљишта.

3. Вишекритеријумско одлучивање

Вишекритеријумским одлучивањем (ВКО) (енг. Multi criteria decision making - MCDM) се називају ситуације одлучивања када је потребно размотрити више критеријума, углавном конфликтне природе, чије вредности представљају полазне информације за избор најбоље акције из датог скупа акција (Вулевић, 2017). Проблеми вишекритеријумског одлучивања се генерално деле у две класе с обзиром на простор решења проблема: континуални и дискретни. За решавање континуалних проблема, користе се методе вишециљног одлучивања, док се дискретни проблеми, с друге стране, решавају коришћењем метода вишеатрибутивног одлучивања (Rezaei, 2014). Проблеми вишекритеријумског одлучивања се такође сматрају „лоше дефинисаним“ проблемима код којих не постоји „оптимално“ решење. Одлуку доноси један или група доносилаца одлука који представљају експерте из

дате области, уз помоћ аналитичара, одговорног за избор и примену методе (Вулевић, 2017). Основни кораци метода ВКО су: 1) идентификација проблема, 2) структурирање проблема, 3) изградња модела, 4) примена модела и 5) коначан избор, односно доношење одлуке на основу резултата модела (Belton, Stewart, 2002).

Идентификација проблема је први корак и она подразумева јасан увид у расположиве информације које ће послужити за дефинисање елемената одлучивања: циљева који се желе постићи, могућих алтернативних решења и критеријума одлучивања који описују карактеристике алтернатива (Howard, 2007). Структурирање проблема одлучивања је један од најзначајних и најтежих корака који за циљ има да омогући превођење лоше дефинисаних проблема у „скуп добро дефинисаних елемената, релација, и операција” (von Winterfeldt, 1980) користећи један формалан и апстрактан језик (Tsoukiàs, 2008). Наредни кораци су изградња и примена модела, и на крају коначна препорука доносилаца одлука на основу резултата модела. Избор методе која ће се користити је такође јако значајан и зависи од карактеристика самог проблема одлучивања.

3.1. Методе вишекритеријумске анализе и њихова примена

Методе вишекритеријумске анализе се примењују у процени ерозије земљишта, доста коришћене методе су: АНП (Analytic Hierarchy Process), ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality), PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation) и WSM (Weighted Sum Method) (Вулевић, 2017).

Најпримењиванија међу методама је АНП метода, која је коришћена за избор најпожељније стратегије управљања шумама (Kangas, 1994), за рангирање површина према опасности од сушења шума у зависности од нивоа воде (Nikolić Jokanović et al. 2020), за оцену погодности земљишта за инсталацију иригационих система (Blagojević et al. 2016), идентификацију ерозијом угрожених површина (Vulević et al. 2015) и др.

Методе вишекритеријумске анализе су нашле већу примену у области управљања водним ресурсима (Hajkowicz, Higgins, 2008). Методе, пре свега АНП, TOPSIS, WSM, ELECTRE, PROMETHEE и VIKOR су највише коришћене за рангирање алтернатива у области прављања ризиком од поплава.

Преглед примене метода вишекритеријумске анализе у области коришћења и управљања земљиштем, као и процене његове деградације у последњих 15 година дати код Вулевић и Драговић (2022). PROMETHEE метода има широку примену у различитим областима (Behzadian et al., 2010), која је у области заштите од ерозије коришћена за рангирање подсливова према угрожености ерозијом (Vulevic, Dragovic, 2017), за избор најбоље алтернативе заштите слива угроженог ерозијом (Grau et al., 2010). ELECTRE метода је примењивана за планирање начина коришћења земљишта, процену ризика од ерозије земљишта на нивоу парцеле, (критеријуми: нагиб, конекција парцеле са путем или речном мрежом, постојање насипа, начин коришћења земљишта) (Macary et al., 2010).

3.1.1. Best-Worst метода

Поступак доласка до решења применом Best-Worst методе (BWM) може се поделити на пет корака:

- 1) Одредити скуп критеријума;
- 2) Дефинисати најбољи и најлошији критеријум;
- 3) Упоредити најбољи критеријум са осталим критеријумима;
- 4) Упоредити најлошији критеријум са осталим критеријумима и
- 5) Израчунати тежине критеријума помоћу оптимизационог модела.

Ако је дефинисан скуп од n критеријума, доносилац одлука се прво изјашњава који је критеријум из групе најбољи, а који је најлошији (Rezaei J, 2014). Затим помоћу скале у Табели 4 врши поређење најбољег и најлошијег критеријума са свим осталим критеријумима.

Табела 4. Сатијева скала за поређење у паровима (Saaty, 1980)

Нумерички еквиваленти	Дефиниција
1	Исти значај
3	Слаба доминантност
5	Јака доминантност
7	Врло јака доминантност
9	Апс. доминантност
2,4,6,8	Међувредности

Оригинални BWM гласи (Srdjević et al. 2019):

$$\min \max_j \{ |w_B/w_j - a_{Bj}|, |w_j/w_W - a_{jW}| \}$$

уз ограничења:

$$w_j = 1, \text{ за свако } j$$

$$w_j \geq 0 \text{ за свако } j$$

где су w_B , w_W и w_j непознате тежине, редом, најбољег, најлошијег и j -тог критеријума. Оцена значајности најбољег критеријума у односу на j -ти критеријум је означена са a_{Bj} , а j -тог критеријума у односу на најлошији са a_{jW} . Оцене a_{Bj} и a_{jW} се добијају поређењем у паровима на основу Сатијеве скале исто као у АНР методи (Srđević i sar., 2019).

Претходни модел се затим трансформише у модел 2 (Srdjević i sar., 2019):

$$\min \theta$$

уз ограничења:

$$|wB/wj - aBj| \leq \theta, \text{ za svako } j$$

$$|wj/wW - ajW| \leq \theta, \text{ za svako } j$$

$$wj = 1, \text{ za svako } j$$

$$wj \geq 0 \text{ za svako } j$$

У оба модела ‘за свако j ’ значи ‘за све критеријуме који се пореде’ у скупу критеријума. На пример, ако постоји n критеријума, ‘за свако j ’ значи за $j = 1, 2, \dots, n$. (Srđević i sar. 2019).

Решавањем модела 2 добијају се оптималне тежине, w_j за свако j и optimalna vrednost θ (Rezaei J, 2014).

Решења оба горња нелинеарна модела могу бити вишеструка што је уобичајено за нелинеарну оптимизацију (Rezaei J, 2014).

Линеарна верзија модела (1), подразумева минимизацију максимума у скупу $\{|wB - aBjwB|, |wj - ajWwW|\}$, и модел гласи:

$$\min \max_j \{|wB - aBjwB|, |wj - ajWwW|\}$$

уз ограничења:

$$wj = 1, \text{ za svako } j$$

$$wj \geq 0 \text{ za svako } j$$

Линеарна верзија модела (2) гласи:

$$\min \varepsilon$$

уз ограничења:

$$|wB - aBjwB| \leq \varepsilon, \text{ za svako } j$$

$$|wj - ajWwW| \leq \varepsilon, \text{ za svako } j$$

$$wj = 1, \text{ za svako } j$$

$$wj \geq 0 \text{ za svako } j$$

4. Резултати и дискусија

Резултати и дискусија се односе на два битна сегмента рада, а то су идентификација критеријума за процену ризика од ерозије земљишта и одређивање значаја критеријума за процену ризика од ерозије земљишта.

4.1. Идентификација критеријума за процену ризика од ерозије земљишта

Дефинисање критеријума за процену ризика од ерозије земљишта је извршено анализом најзначајнијих емпиријских модела које се користе за процену ризика од ерозије (Табела 5). Одабране су емпиријски модели јер имају мање захтева за улазним подацима у односу на физичке и концептуалне моделе, као и због широке примене у свету и код нас.

Табела 5. Емпиријски модели за процену ризика од ерозије земљишта

Име модела	Акроним	Улазни параметри (критеријуми)	Референце
Universal Soil Loss Equation	USLE	<ul style="list-style-type: none">- фактор еродибилности земљишта- фактор ерозивности падавина- топографски фактори- фактори управљања усевима	Wishmeier, Smith, 1978
Pacific Southwest Agency Committee	PSIAC	<ul style="list-style-type: none">- геолошки фактор- климатски фактор- фактор коришћења земљишта- топографски фактор- фактор отицања- фактор покривености тла- фактор ерозије земљишта на нагибу- фактор ерозије канала и транспорт земљишта	PSIAC, 1968
Revised Universal Soil Loss Equation	RUSLE	<ul style="list-style-type: none">- фактор ерозивне снаге кише- фактор еродибилности земљишта- топографски фактор- фактор вегетације и начина коришћења земљишта	Renard et al., 1991, 1994
Soil Loss Estimation Model for Southern Africa	SLEMSA	<ul style="list-style-type: none">- фактор дужине нагиба- фактор еродибилности- фактор исцрпљености земљишта	Stocking, 1981

Метод потенцијала ерозије	ЕРМ	<ul style="list-style-type: none"> - климатски фактор (падавине и температура) - геолошки фактор - педолошки фактор - топографски фактор - земљишни покривач - трагови ерозије 	Gavrilović, 1972
Sediment Delivery Distributed	SEDD	<ul style="list-style-type: none"> - фактор коришћења земљишта - топографски фактор - фактор карактеристике тла - климатски фактор 	Ferro, Porto, 2000
Geoland2	G2	<ul style="list-style-type: none"> - средњи годишњи губитак земљишта - топографски фактор - фактор ерозионе снаге кише - вегетациони фактор ретенције - фактор еродибилности земљишта - фактор ефекта предеоног обрасца 	Karydas et al., 2012

Анализом модела и њихових улазних параметара, детерминисани су критеријуми који се могу користити за идентификацију и издвајање ерозијом угрожених подручја, и то:

- 1) топографија
- 2) еродибилност земљишта
- 3) геолошке карактеристике подручја
- 4) структура земљишног покривача
- 5) клима и
- 6) антропогене активности.

Топографија је критеријум који представља утицај рељефа на појаву ерозионих процеса. Један од примарних топографских карактеристика је нагиб и дужина падине, који утичу на брзину површинског отицања воде и еродираног материјала. Остале значајне карактеристике су надморска висина, експозиција и закривљеност терена.

Геолошке карактеристике подручја се огледају у геолошкој грађи у којој учествују стене различите старости. Бројне врсте стена имају различит утицај пре свега на генезу земљишта, а касније и на његове особине, које су значајне за појаву и развој ерозионих процеса.

Еродибилност земљишта је осетљивост земљишта на ерозију и може се проценити анализом различитих параметара. Особине земљишта које имају највећи утицај на еродибилност су: текстура, структура, порозност, дубина земљишта, садржај органске материје и др. Земљишта која су грубље текстуре (нпр. песковита земљишта) су еродибилнија од земљишта финије текстуре (глиновито-иловаста земљишта).

Структура земљишног покривача (енг. land cover) се односи на покривеност површине земљишта вегетацијом, водом, голим земљиштем, урбаном инфраструктуром,. Земљиште које је прекривено вегетацијом је много мање изложено ерозионим процесима него оно које је без вегетације (голо).

Клима је скуп метеоролошких утицаја који делују у одређено време на одређеном простору на Земљи. Најбитнији климатски фактори за процес ерозије су температура ваздуха и падавине. Падавине у виду кише и снега првенствено ударом о површину земљишта, а касније и оним делом који се не инфилтрира у земљиште представљају агенс који еродира дату површину. Температура ваздуха зависи углавном од надморске висине места.

Антропогене активности се односе на утицај човека кроз неконтролисану урбанизацију, интензивну пољопривредну производњу, крчење шума и др. што има негативан утицај на појаву и развој ерозионих процеса. Поред негативног утицаја, човек извођењем противерозионих радова и мера, поготово по принципу интегралног уређења слива, доприноси редукацији ерозионих процеса и бујичних поплава. Метода потенцијала ерозије је пример методе која узима у обзир примену противерозионих радова.

4.2. Одређивање значаја критеријума за процену ризика од ерозије земљишта

Значај критеријума за процену ризика од ерозије земљишта је одређен применом Best Worst методе вишекритеријумског одлучивања применом excel солвера (BWM Solvers - Best Worst Method). Коришћена је линеарна верзија методе. Ова метода је изабрана јер број поређења у паровима знатно редукован у односу на АНР методу.

Изабрана су 6 критеријума за процену ризика од ерозије земљишта. У следећем кораку је одређен најбољи критеријум и најлошији критеријум. Најбољи критеријум је онај који има највећи утицај на појаву и развој ерозионих процеса, и за тај критеријум је изабрана структура начина коришћења земљишта. За најлошији критеријум, који има најмањи утицај на ерозионе процесе, изабране су геолошке карактеристике посматраног подручја, даље назване геологија.

У наредном кораку је извршено поређење најбољег и најлошијег критеријума са осталим критеријума уношењем преференција доносиоца одлука (Табела 6) које су дефинисане коришћењем Saaty-јеве скале дате у Табели 4.

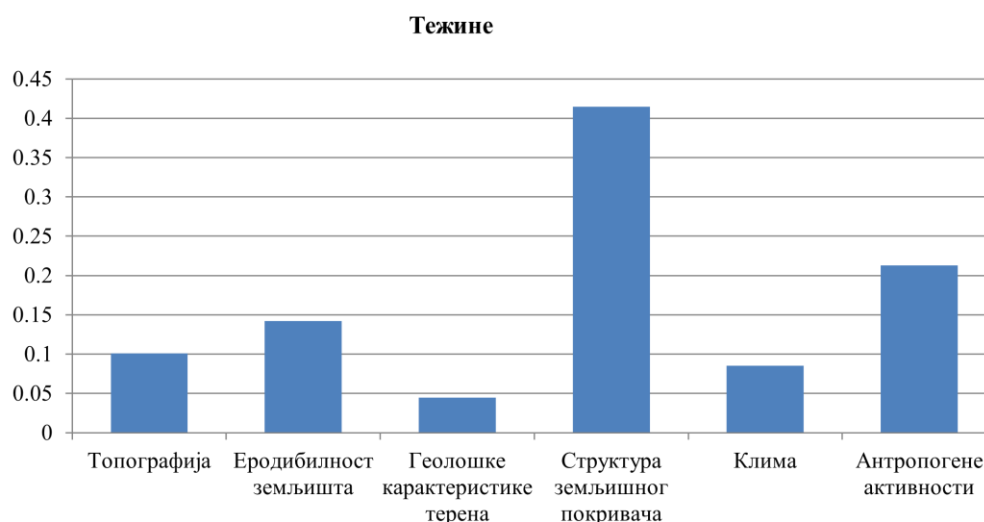
На основу података из Табеле, 6 може се закључити да је доносилац одлуке дао предност критеријуму структура земљишног покривача (C1), односно проценио га као најзначајнији, док је према његовом мишљењу најмање значајан критеријум педолошке карактеристике подручја (C3).

Тежине критеријума су добијене на основу методологије описане у Поглављу 3.1.1., помоћу солвера у excelу ([BWM Solvers | Best Worst Method](#)) и приказане су на Слици 5.

Табела 6. Поређење најбољег и најлошијег критеријума са осталим критеријумима

Поређење најбољег критеријума са осталима		Поређење најлошијег критеријума са осталима	
Најбољи критеријум: C1	Преференција	Најлошији критеријум: C3	Преференција
C1	5	C1	2
C2	4	C2	2
C3	9	C3	1
C4	1	C4	9
C5	3	C5	3
C6	2	C6	5

C1 – топографија; C2- еродибилност земљишта; C3- геолошке карактеристике подручја; C4- структура земљишног покривача; C5- клима и C6- антропогене активности



Слика 5. Тежине критеријума

Анализом преференција доносиоца одлука (Табела 6) највећу тежину има структура земљишног покривача (0,414), затим следе антропогене активности (0,213), еродибилност земљишта (0,142), клима (0,085), топографија (0,1000) и са најмањим значајем су геолошке карактеристике терена (0,045). Променом преференција, која би уследила променом доносиоца одлука, промениле би се и тежине критеријума. Из тог разлога је значајно добро проучити конкретно подручје истраживања и за поређења у паровима затражити мишљене већег броја експерата из области заштите од ерозије.

У раду Vulević et al. (2015) разматрана су три критеријума и њихов утицај на ерозију земљишта, где је начин коришћења земљишта такође најзначајнији критеријум (0,714),

након чега следе тип земљишта и нагиб терена који су подједнаког значаја (0,143). Геолошке карактеристике терена су критеријум који и у другим радовима има најмањи значај (Aslam et al. 2021).

Оно што је предност Best Worst методе је мањи број поређења у паровима у односу на АНР методу, али је недостатак то што не дозвољава да се два или већи број критеријума извоје као најбољи или најгори. Односно, метода не дозвољава да два или више критеријума имају исту тежину. Такође, примењена верзија методе није применљива за групно одлучивање разматрањем преференција већег броја доносиоца одлука. За то је развијена посебна верзија методе.

Препорука је да се овако дефинисани и отежани критеријуми (уз проверу тежина критеријума укључењем већег броја доносилаца одлука) примене за идентификацију ерозијом угрожених површина применом неке од метода вишекритеријумске анализе у ГИС окружењу. За то је дат и шематски приказ који укључује примену методе једноставних адитивних тежина (Simple Additive Weighting - SAW) (Слика 6).



Слика 6. Шематски приказ израде карте угрожености ерозијом применом метода ВКА и ГИС-а

5. Закључак

Водна ерозија је најзаступљенији вид деградације у нашој земљи. За идентификацију ерозијом угрожених површина и процену губитака земљишта могу се користити бројни емпиријски, физички и концептуални модели. Модели су развијени за одређена подручја и разликују се по комплексности и захтевима за улазним параметрима. Једна од најчешће коришћених емиријских метода код нас је метода Потенцијала ерозије. Поред наведених модела, на располагању су статистичке методе и методе вишекритеријумског одлучивања.

У раду су идентификовани улазни параметри приказаних емпиријских модела и одређене су њихове тежине применом Best Worst методе вишекритеријумског одлучивања. Предност метода вишекритеријумског одлучивања је управо у дефинисању тежина, односно значаја који поједини критеријуми имају на појаву и развој ерозионих процеса. Оно што је предност Best Worst методе је мањи број поређења у паровима у односу на АНР методу, али је недостатак то што не дозвољава да се два или већи број критеријума извоје као најбољи или најлошији. Односно, метода не дозвољава да два или више критеријума имају исту тежину.

У овом раду су разматран следећи критеријуми: топографија, еродибилност земљишта, геолошке карактеристике терена, структура земљишног покривача, клима и антропогене активности.

Топографија је битан критеријум јер пре свега величином нагиба утиче на брзину брзину површинског отицања воде и еродираниог материјала (наноса). Еродибилност земљишта је отпорност земљишта на ерозију која зависи од текстурних карактеристика земљишта, садржаја органске материје и др. Структура земљишног покривача утиче на појаву и развој ерозионих процеса, и може доста допринети њеној редукацији јер је динамички фактор који се може модификовати у току времена (пренаменом површина). Од климатских критеријума су важне падавине и температура ваздуха. Падавине иницирају откидање честица земљишта и њихово даље транспортовање површинским отицајем што за последицу има одношење земљишта и формирање бразда, јаруга и других облика ерозије. Антропогене активности могу допринети појави и даљем интензивирању ерозионих процеса кроз сечу шуме, урбанизацију и интензивну пољопривредну производњу. Поред тога, човек врши и позитиван утицај који се огледа кроз извођење противерозионих радова у сливу и кориту бујичних водотокова.

Тежине ових критеријума су одређене на основу преференција једног стручњака из области ерозије и превенције бујичних поплава, применом Best Worst методе. Највећу тежину има структура земљишног покривача, затим следе антропогене активности, еродибилност земљишта, клима, топографија и са најмањим значајем су геолошке карактеристике терена. Променом преференција, која би уследила променом доносиоца одлука, промениле би се и тежине критеријума. Из тог разлога је значајно добро проучити конкретно подручје

истраживања и за поређења у паровима затражити мишљене већег броја екперата из области заштите од ерозије.

Овако отежани критеријуми би се могли користити за идентификацију ерозијом угрожених површина применом метода вишекритеријумске анализе у ГИС окружењу.

6. Референце

1. Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E., Rasmussen J. (1986): An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen 'SHE' 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *J. Hydrol.* 1986, 87, 45–59.
2. Adamović Ž., Ivić M., Vuković V. (2007): Metodologija i tehnologija izrade naučnih radova, prvo izdanje. Univerzitet za poslovni inženjering i menadžment Banja Luka, ISBN 978-99955-40-34-0
3. Aslam B., Maqsoom A., Alaloul W.S., Musarat M.A., Jabbar T., Zafar A. (2020): Soil erosion susceptibility mapping using a GIS-based multi-criteria decision approach: Case of district Chitral, Pakistan
4. Behzadian, M., Kazemzadeh, R.B., Albadvi, A., Aghdasi, M. (2010): PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research* 200 (1), 198-215.
5. Belton, V., Stewart, T.J. (2002): *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.
6. Blagojevic, B., Srdjevic, Z., Bezdan, A., Srdjevic, B. (2016): Group decision making in land evaluation for irrigation: A Case study from Serbia. *Journal of Hydroinformatics* 18(3), 579–598.
7. Breetzke G. D., Koomen E. and Critchley W. R. S.(2014): GIS-Assisted Modelling of Soil Erosion in a South African Catchment: Evaluating the USLE and SLEMSA Approach
8. Christos G. Karydas, Panos Panagos, Ioannis Z. Gitas (2014): A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth*, 7(3): 229-250 (DOI:10.1080/17538947.2012.671380)
9. Copeland C. (2003): Clean Water Act and Total Maximum Daily Loads (TMDLs) of Pollutants. Congressional Research Service CRS:Washington, DC, USA.
10. De Vente J. (2009): Soil Erosion and Sediment Yield in Mediterranean Geoeosystems - Scale issues, modelling and understanding. PhD Thesis, ISBN 978-90-8649-233-6 Faculteit Wetenschappen, Geel Huis, Kasteelpark Arenberg 11, 3001
11. Elirehema Y., (2001): Soil water erosion modeling in selected watersheds in Southern Spain. Enscheda: IFA, ITC.
12. Ellison W.D. (1947): Soil erosion studies. *Agric. Eng.*, 28: 145-146, 197-201,245-248,297-300, 349-351,402-405,442-450.
13. Ferro V., Porto P. (2001): Sediment Delivery Distributed (SEDD) Model. *J. Hydrol. Eng.* 2000, 5, 411–422.
14. Foster G. R., Toy T. E., Renard, K. G. (2003): Comparison of the USLE, RUSLE1.06c, and RUSLE2 for Application to Highly Disturbed Lands. In *First Interagency Conference on Research in Watersheds*, October 27–30 (pp. 154–160). United States Department of Agriculture, 2003.

15. Fryrear, D.W., Stout, J.E., Hagen, L.J., Vories, E.D., (1991) : Wind Erosion: Field Measurement And Analysis, Transaction of the ASAE 34 (1), The American Society of Agricultural and Biological Engineers, Article 0155.
16. Funk, R., Reuter, H.I. (2006): Wind Erosion. In: Boardman J. Poesen J. (eds.) Soil Erosion in Europe, John Wiley & Sons, Ltd.
17. Gavrilović, S. (1972): Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji. Izgradnja, Specijalno izdanje, Beograd.
18. Grau, J.B., Anton, J., Cisneros, J.M., Cantero, A. (2010): Territorial planning in a river basin with high erosion level using multicriteria decision methods in Cordoba Province (Argentina). Proceedings of Conference World Automation Congress (WAC), p. 1–6, 19-23 September 2010, Kobe, Japan.
19. Haile G. W., Fetene M. (2010): Assessment of soil erosion hazard in Kilie catchment, East Shoa, Ethiopia. Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/ldr.1082
20. Hajigholizadeh M., Melesse A.M., Fuentes H.R. (2018): Erosion and Sediment Transport Modelling in Shallow Waters: A Review on Approaches, Models and Applications. International Journal of Environmental Research and Public Health 15 (3), 518
21. Hajkovicz S., Higgins A.J. (2008): A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management. European Journal of Operational Research 184 (1), 255-265
22. Harmon R.S., Doe W.W. (2001): Landscape Erosion and Evolution Modeling. Kluwer Academic/Plenum Publishers/ New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow
23. Howard, R. A. (2007): The Foundation of the Decision Analysis Revisited, In: W. Edwards, R.F. Miles, Jr., D. von Winterfeldt,. (Eds.), Advances in Decision Analysis: From Foundations to Applications, Cambridge, UK, Cambridge University Press, p.32–57.
24. Jain M.K., Das D. (2010): Estimation of sediment yield and areas of soil erosion and deposition for watershed prioritization using GIS and remote sensing. Water Resources management, 24 (10), 2091–2112.
25. Julie E. Laity, (2016) : Eolian Erosional Processes and Landforms. The International Encyclopedia of Geography, edited by Richardson, D., Castree, N., Goodchild, M.F., Kobayashi, A., Liu, W., Marston, R.A., John Wiley & Sons, Ltd. Published, 1-7
26. Kadović R., (1999): Protiverozioni agroekosistemi, ISBN 86-7299-046-3 Šumarski fakultet, Beograd.
27. Kandel D.D., Western A.W., Grayson R.B., Turrall H.N. (2004): Process parameterization and temporal scaling in surface runoff and erosion modelling. Hydrol. Process. 2004, 18, 1423–1446.
28. Kangas, J. (1994): An approach to public participation in strategic forest management planning. Forest Ecology and Management 70, 75–88.
29. Karydas C.G., Panagos, P. (2018): The G2 erosion model: An algorithm for month-time step assessments, Environmental Research, 161: 256-267
30. Kirchhof W., Haberäcker P., Krauth E., Kritikos G., Winter R. (1980): A rapid method to generate spectral theme classification of Landsat imagery. Acta Astronaut., 7, 243–253.
31. Kostadinov, S. (2008): Bujični tokovi i erozija, Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.
32. Lal R. (1994): Soil Erosion Research Methods. CRC Press: Boca Raton, FL, USA.

33. Lazarević R. (1983): Karta erozije SR Srbije 1:500000-Tumač, Institut za šumarstvo i drvnu industriju, Beograd 1983.
34. Macary, F., Ombredane, D., Uny, D. (2010): A multicriteria spatial analysis of erosion risk into small watersheds in the low Normandy bocage (France) by ELECTRE III method coupled with a GIS. *International Journal of Multicriteria Decision Making* 1 (1), 25–48.
35. Meadows, M.E., 2003. Soil erosion in the Swartland, Western Cape Province, South Africa: Implications of past and present policy and practice. *Environmental Science & Policy*, 6, 17–28.
36. Morgan, R.P.C. (2005): *Soil Erosion and Conservation*, Blackwell Publishing, Oxford.
37. Musgrave G.W. (1947): The quantitative evaluation of factors in water erosion, a first approximation. 1. *Soil Water Cons.*, 2: 133-138.
38. Nearing, M.A; Yin S.Q., Borrelli P., Polyakov V.O. (2017): Rainfall erosivity: An historical review. *Catena*, 157.
39. Nikolić Jokanović, V., Vulević, T., Lazarević, K. (2020): Risk assessment of forest decline by application of geostatistics and multi-criteria analysis. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 68, 2020, 3, 285–292.
40. Panagos P., Karydas C.G., Gitas I.Z., Montanarella L. (2012): Monthly soil erosion monitoring based on remotely sensed biophysical parameters: a case study in Strymonas river basin towards a functional pan-European service, *International Journal of Digital Earth* 5(6): 461-487.
41. Pandey A.; Himanshu S.; Mishra S.; Catena V.S. (2016): Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *CATENA* 2016, 147, 595–620.
42. Prosser I.P., Young B., Rustomji P., Hughes A., Moran C. (2001): A model of river sediment budgets as an element of river health assessment. In *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'2001)*, Canberra, Australia, 10–13 December 2001; pp. 10–13.
43. PSIA-C-Pacific Southwest Inter-Agency Committee (1968): Report „Factors Affecting Sediment Yield and Measures for the Reduction of Erosion and Sediment Yield”. Pacific Southwest Inter-Agency Committee
44. Renard K., Foster G., Weesies G., McCool D., Yoder, D. (1997): Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agricultural Handbook No. 703*. <http://doi.org/DC0-16-048938-5> 65–100.
45. Rezaei J., (2014): *Best-Worst Multi-Criteria Decision-Making Method*. Faculty of Technology Policy and Management, Delft University of Technology Delft, The Netherlands
46. Ristić R., Kostadinov S., Abolmasov B., Dragičević S., Trivan G., Radić B., Trifunović M., Radosavljević Z. (2012): Torrential floods and town and country planning in Serbia, *Natural Hazards and Earth System Sciences (ISSN: 1561-8633)*, No. 1, Vol. 12, pg. 23-35 (DOI: 10.5194/nhess-12-23-2012).
47. Saaty T.L. (1980) *The Analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York.
48. Schultze, R.E., 1979. Soil loss in the Key Area of the Drakensberg – a regional application of the ‘Soil Loss Estimation Model for Southern Africa’ (SLEMSA). In: *Hydrology and Water Resources of the Drakensberg*, Pp. 149-167, Natal Town and Regional Planning Commission, Pietermaritzburg, South Africa.

49. Smith D.D. (1941): Interpretation of soil conservation data for field use. *Agric. Eng.*, 22: 173-175.
50. South African Department Of Agriculture, 2007, Strategic plan DoA 2007; Part 2: Sectoral overview and performance. Department of Agriculture, Pretoria.
51. Srđević Z., Srđević B., Bubulj S., Ilić M. (2019): Primenljivost i efikasnost Best- Worst metoda pri donošenju odluka u vodoprivredi. Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Departman za uređenje voda, Novi Sad.
52. Tsoukiàs, A. (2008): From decision theory to decision aiding methodology. *European Journal of Operational Research* 187 (1), 138–161.
53. Von Winterfeldt, D. (1980). Structuring decision problems for decision analysis. *Acta Psychologica* 45 (1-3), 71–93.
54. Vulevic, T., Dragovic, N., Kostadinov, S., Belanovic Simic, S., Milovanovic, I. (2015): Prioritization of Soil Erosion Vulnerable Areas Using Multi-Criteria Decision Analysis Methods. *Polish Journal of Environmental Studies* 24 (1), 317–323.
55. Vulević, T., Dragović, N. (2017): Multi-criteria decision analysis for sub-watersheds ranking via the PROMETHEE method. *International Soil and Water Conservation Research* 5 (1), 50–55.
56. White, R.E. (1997): Principles and practice of soil science: The soil as a natural resource, 3rd edn. Blackwell, Oxford.
57. Williams J.R. (1975): Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources, (Proceedings of the Sediment-Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi, November 28-30). 244-252.
58. Wischmeier W.H, Smith D.D (1978): Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. USDA Agriculture Handbook No. 537, 285–291.<http://doi.org/10.1029/TR039i002p00285>
59. Zachar, D. (1982): Soil erosion. *Developments in Soil Science* 10. Elsevier Scientific, Amsterdam.
60. Zingg A.W. (1940): Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. *Agric. Eng.*, 21: 59-64.
61. Белановић – Симић С. (2022): Процена деградације земљишта – методе и модели. Комисија за земљиште и животну средину, Шумарски факултет, Универзитет у Београду
62. Вулевић Т. (2017): Вишекритеријумско одлучивање у функцији конзервације земљишних и водних ресурса брдско-планинских подручја централне Србије. Докторска дисертација, Шумарски факултет, Универзитет у Београду
63. Вулевић, Т. Драговић, Н. (2022): Примена метода вишекритеријумског одлучивања у процени деградације земљишта. У: Процена деградације земљишта – методе и модели (Едитор: С. Белановић Смић), стр.
64. Вулевић, Т., Драговић, Н. (2022): Примена метода вишекритеријумског одлучивања у процени деградације земљишта. У: Процена деградације земљишта – методе и модели (уредник Снежана Белановић Симић), Универзитет у Београду Шумарски факултет,

- Српско друштво за проучавање земљишта, Комисија за земљиште и животну средину, 116-145, Београд 2022
65. Иконовић В. (2007): Картографско моделовање-улога и значај. Зборник радова Географског института "Јован Цвијић" САНУ, Књига 57 стр. 443-450.
 66. Јовановић Д. (2015): Модел објектно оријентисане класификације у идентификацији геопросторних објеката, докторска дисертација, Факултет Техничких Наука у Новом Саду, Универзитет у Новом Саду.
 67. Половина С. (2022): Компарација метода за квантификацију интензитета ерозионих процеса – студија случаја подручја генералног плана Београда. Докторска дисертација, Шумарски факултет, Универзитет у Београду
 68. Ристић Р. (2014): Плаво–зелени коридори–Истраживање могућности ревитализације слива потока Паригуз и околних шумских површина, Шумарски факултет, Београд, 2014.
 69. Ристић Р., Милчановић В., Малушевић И, Половина С. (2016): Бујичне поплаве и ерозија као доминантан фактор деградације земљишта у Србији – концепт превенције и заштите. Деградација и заштита земљишта [Електронски извор]: тематски зборник, Универзитет у Београду, Шумарски факултет ISBN 978-86-7299-242-7
 70. Ристић Р., Никић З. (2007): Одрживост система за водоснабдевање Србије са аспекта угрожености ерозионим процесима. Водопривреда бр. 225-227 (ISSN: 0350-0519), стр. 47-57, Београд

Литература са интернета:

1. https://webapp.agron.ksu.edu/agr_social/m_eu_article.throck?article_id=139 (приступило 12.09.2022.
2. https://www.researchgate.net/figure/The-types-of-soil-erosion-by-water_fig1_346958188 (приступило 12.09.2022.)
3. https://www.researchgate.net/figure/GIS-based-erosion-modeling-using-path-sampling-method-a-C-factor-at-the-study-site_fig10_249009078 (приступило 13.09.2022.)