

АНАЛИЗА ИНТЕНЗИТЕТА ЕРОЗИОНИХ ПРОЦЕСА И ПОВРШИНСКОГ ОТИЦАЈА НА СЛИВУ РЕКЕ КАМЕШИНЕ

ANALYSIS OF THE INTENSITY OF EROSION PROCESSES AND SURFACE RUNOFF IN THE KAMEŠINA RIVER WATERSHED

Ана Паравиња¹, Синиша Половина², Ратко Ристић²

¹ Институт за мултидисциплинарна истраживања, Београд

² Шумарски факултет, Универзитет у Београду

e-mail: ana.paravinja@imsi.bg.ac.rs

Извод: Земљиште је један од природних ресурса који представља основни услов за опстанак и развој човечанства. Један од најчешћих видова деградације земљишта је ерозија, која зависи од великог броја физичко–географских фактора и деловања човека. Како би се проценила ерозија земљишта и продукција наноса у употреби су различити модели. У овом раду је вршено одређивање физичко–географских карактеристика слива и анализа интензитета ерозије и проноса наноса на сливу реке Камешине. Река Камешина се налази у западном делу Републике Србије и позиционирана је на подручју Златиборског управног округа. Ова река је сврстана у хидролошку класу бујичних токова, а током 2007. и 2009. године десиле су се две велике поплаве. Река Камешина и њене притоке се сврставају у карактеристичне бујичне токове велике снаге. Процена интензитета ерозије и губитка земљишта вршена је применом Методе потенцијала ерозије. Примена ове методе је могућа у ГИС (Географски Информациони Системи) окружењу, те је израђена Карта ерозије која даје увид у стање ерозионих процеса различитог интензитета на сливу. На основу Карте ерозије, на истраживаном подручју заступљени су ерозиони процеси од врло слабе до јаке категорије разорности. Хидролошка анализа слива реке Камешине је рађена за прорачун максималног протицаја, средњих и малих вода. Максимални протицај ($Q_{\max}$) је прорачунат применом комбинованог поступка који се састоји од SCS (Soil Conservation Service) методологије и теорије синтетичког јединичног хидрограма за просечне и надпросечне услове влажности. Анализа средњих вода (Q_{sr}), је прорачуната применом емпиријске методе Langbein–а, док су мале воде (Q_{mv}) изражене у функцији средњег протицаја (Q_{sr}).

Кључне речи: земљиште, река Камешина, ерозија земљишта, продукција наноса, ГИС, површински отицај

Abstract: Soil is one of the natural resources that is essential for the survival and development of humanity. One of the most common types of soil degradation is erosion, which depends on a large number of physical–geographical and anthropogenic factors. Different models are used to assess soil erosion and soil losses. In this paper, the determination of physical and geographical characteristics and the analysis of the intensity of erosion and sediment transport in the Kamešina river watershed were performed. The river Kamešina is located in the western part of the Republic of Serbia and is positioned in the area of the Zlatibor administrative district. This river is classified as the hydrological class of torrents, and during 2007 and 2009, two major floods occurred. The Kamešina River and its tributaries are classified as characteristic torrents with great power. Estimation of soil erosion intensity and loss was performed using the Erosion Potential Method. The application of this method is possible in the GIS (Geographic Information Systems) environment, and an

Erosion map has been made which provides an insight into the state of erosion processes of different intensity in the river watershed. Based on the Erosion Map, erosion processes from very weak to strong category of destruction are represented in the researched area. The hydrological analysis of the Kamešina river watershed was carried out for the calculation of the maximum flow, medium and low flow. Maximum flow ($Q_{\max}$) was calculated using a combined procedure consisting of SCS (Soil Conservation Service) methodology and synthetic unit hydrograph theory for average and above-average moisture conditions. The analysis of medium waters (Q_{mean}) was calculated using the empirical method of Langbein, while small waters ($Q_{\min}$) were expressed as a function of mean flow (Q_{mean}).

Keywords: soil, Kamešina river, soil erosion, production of sediment, GIS, surface runoff

УВОД

Земљиште представља један од природних ресурса који има највећу важност и који је неопходан за опстанак људског друштва, а које директно зависи од његове продуктивности. Земљиште поседује велики значај за одржавање главних функција екосистема и представља ограничен, стратешки и практично необновљив или тешко обновљив природни ресурс (Белановић, 2012). Процеси деградације земљишта, механизми који покрећу деградативне трендове, укључују физичке, хемијске и биолошке процесе. Важан физички процес је промена структуре земљишта која доводи до стварања коре, збијања, ерозије, загађења животне средине и неодрживог коришћења природних ресурса. Значајни хемијски процеси укључују закисељавање и испирање, салинизацију и губитак плодности. Биолошки процеси укључују смањење укупног угљеника и угљеника у биомаси, и смањење биодиверзитета земљишта. Узроци деградације земљишта су агенси који одређују стопу деградације земљишта – биофизички (коришћење земљишта и управљање земљиштем, укључујући методе крчења шума и обраде земљишта), социо–економски (нпр. поседовање земљишта, маркетинг, институционална подршка, приход и здравље људи) и политичке (потицајни подстицаји, политичка стабилност) силе које утичу на ефикасност процеса и фактора деградације земљишта. Деградација земљишта је биофизички процес вођен социо–економским и политичким узроцима (Lal, 1997).

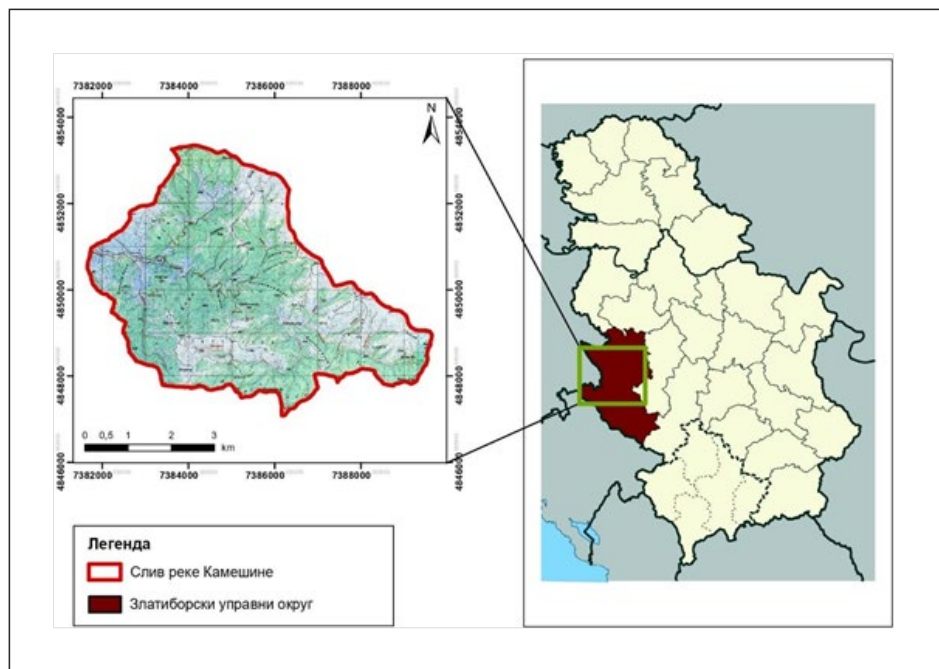
Ерозија земљишта представља светски проблем који је повезан са и има утицаја на различите делатности – пољопривреду, водопривреду, енергетику, саобраћај итд. Спирење, подривање земљишта или матичне стене под утицајем површинске воде модификује првобитни рељеф, а као производ ерозионих процеса у сливу јавља се ерозиони нанос који се са падина спира и доспева у хидрографску мрежу и чини токове мутним, пуним блата, камења и песка што штети различитим гранама привреде. Велики интензитет ерозионих процеса доводи до брзог одношења земљишта, некад све до матичне стене, чиме се ограничава развијање вегетације, поред тога и ерозиони процеси слабијег интензитета доводе у крајњем случају до ове фазе, само што је за то потребан дужи временски период (Kostadinov, 2008). Ерозија земљишта представља проблем од ширег значаја који се јавља на земљишту намењеном пољопривредној производњи, шумарству, саобраћају и рекреацији. Ерозија доводи до штете по животну средину кроз таложење материјала, загађење и повећане поплаве. Из тог разлога, контрола ерозије је неопходна у скоро свакој земљи света под готово свим начинима коришћења земљишта (Morgan, 2009).

Земљиште и вегетациони покривач директно утичу на интензитет површинског отицања стварајући „губитке“ падавина кроз процесе интерцепције, испаравања, транспирације и инфилтрације. Еродирано земљиште постаје збијено са недовољном количином хранљивих материја и органске материје, а стопе инфилтрације и капацитет за складиштење воде су смањени, што заузврат повећава површинско отицање и ерозију. Стрми терени без вегетације су посебно склони повећаном површинском отицању и ерозији (Ristić et al., 2012). Са друге стране, ерозија утиче на вегетацију у смислу састава и структуре биљне заједнице, као и обрасца раста. Вегетација значајно контролише стопе ерозије земљишта, а смањење стопе водене ерозије са повећањем вегетационог покривача је експоненцијално (Gyssels et al., 2005). Садашње, као и људске интервенције у прошлости везане за коришћење и манипулацију ресурсима животне средине, имају неочекиване последице. Земљиште се испира, постаје стерилно или се контаминира токсичним материјалима брзином која се не може одржати (Oldeman, 1992).

МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ

Опште карактеристике истраживаног подручја

Слив реке Камешине налази се на подручју Златиборског управног округа, коме административно припада општина Чајетина (слика 1). Од укупне површине општине пољопривредна газдинства налазе се на површини од 37.469 ha, а укупна обрасла шумска површина простире се на 21.555 ha (2011).

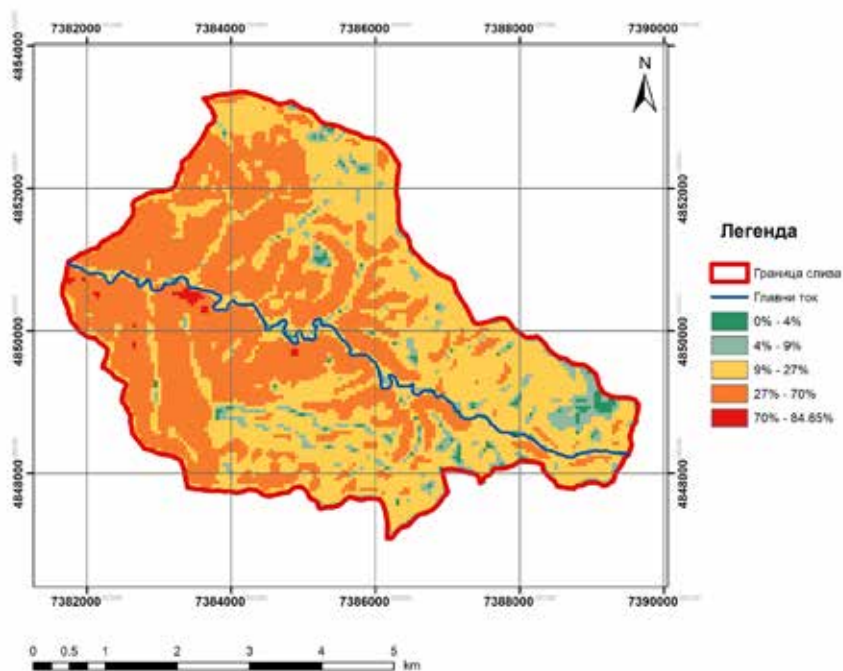


Слика 1. Географски положај слива реке Камешине
Figure 1. The geographical position of the river Kamešina watershed

Површина слива износи приближно 27 km^2 , а обим сливне површине реке око 25 km . Остале физичко–географске карактеристике слива приказане су у табели 1. На свом путу дужине $11,7 \text{ km}$, река Камешина има значајан број притока чије је рачвање равномерно у горњем, средњем и доњем току те слив заузима симетричан облик, а густина хидрографске мреже је веома велика ($3,29 \text{ km/km}^2$).

Табела 1. Физичко–географске карактеристике слива реке Камешине
Table 1. Main physical characteristics of river Kamešina watershed

Параметар	Ознака	Вредност
Површина слива	A	$26,94 \text{ km}^2$
Обим слива	O	$25,08 \text{ km}$
Кота врха слива	K_v	$1.046,56 \text{ mnm}$
Кота ушћа слива	K_u	$596,14 \text{ mnm}$
Дужина слива по главном току	L	$11,65 \text{ km}$
Одстојање од тачке у речном кориту, која је најближа тежишту слива, до излазног профила	L_c	$5,92 \text{ km}$
Релативни просечни пад корита	I_t	$3,87 \%$
Уравнати пад корита	I_u	$3,76 \%$
Густина хидрографске мреже	G	$3,29 \text{ km/km}^2$
Дужина свих водотока у сливу	$\sum L$	$88,75 \text{ km}$
Модул развијености вододелнице по Гравелијусу	E	$1,35$
Средња надморска висина слива	H_{sr}	$972,16 \text{ m}$
Средња висинска разлика	D	$376,02 \text{ m}$
Средњи пад слива	I_{sr}	$27,93 \%$



Слика 2. Просторни распоред нагиба терена на сливу реке Камешине
Figure 2. Terrain slope in watershed of the river Kamešina

Приликом одређивања коефицијента ерозије јако је важно проучити надморску висину те је утврђено да се висине дуж подручја слива реке Камешине крећу од 596 до 1.272 мнм и повећавају у правцу тока реке од коте ушћа до коте врха. Средња надморска висина слива износи 972,16 мнм. Поред надморске висине, неопходно је одредити и нагиб. Применом ГИС анализа аспекта рељефа показала је да већину сливног подручја чине стрми и врло стрми терени, а спорадично се јављају и терени са успонима преко 30 % (слика 2). Релативни просечни пад корита износи 3,87 %.

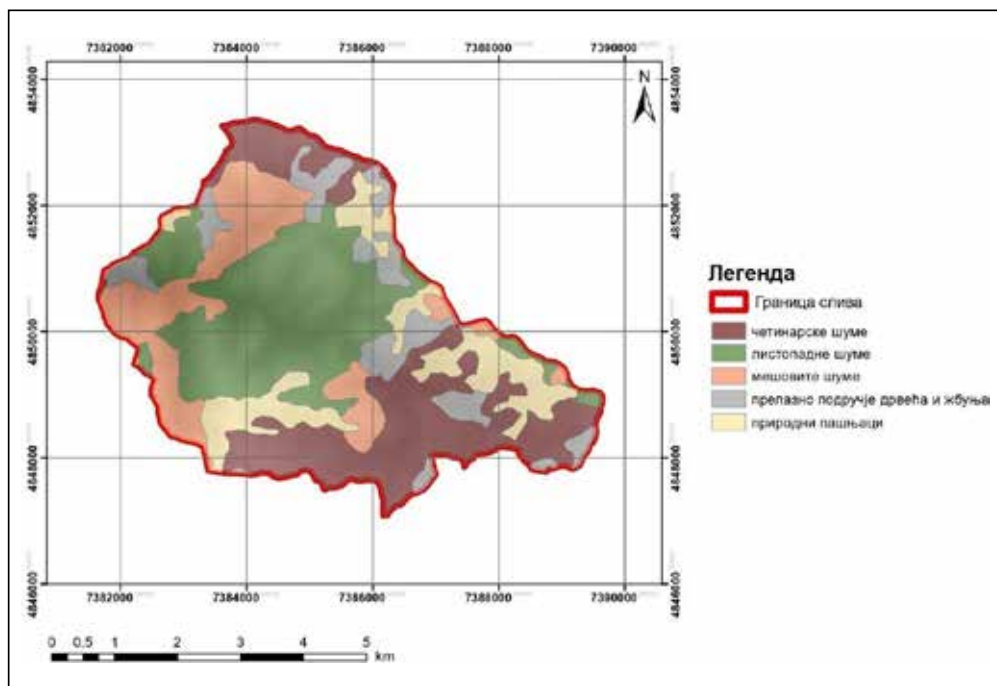
Клима овог подручја је умерено–континентална са утицајем планинске климе, са умерено хладним зимама и благим летима. Влажност ваздуха је релативно мала (76%) у односу на друга слична подручја, као и количине падавина које износе око 990 mm годишње у просеку (2011). Што се тиче плувиометријског режима, главни максимум је у мају и минимум у фебруару, а секундарни максимум у октобру. Укупан број дана са падавинама на Златибору је 166,7 годишње, највише кишних дана има мај, а најмање август и септембар (Rakićević, 1963).

У циљу квантитативног одређивања отицања воде и режима наноса у бујичним сливовима и ерозионим подручјима важне су процене геолошких карактеристика. Процентуално учешће врста стена је од значаја јер различите врсте стена имају различиту пропустљивост за воду која утиче на отицање, као и различиту отпорност на

ерозију од које зависе интензитет ерозије и продукција наноса (Kostadinov, 2008). Харцбургити су заступљени на 90,13 % слива, а серпентинити на 9,87 %.

На територији целокупног слива заступљен је само један тип земљишта и то је скелетно земљиште на серпентиниту. Карактеристике земљишта формираних на серпентинитима у зависности су од педогенетских процеса и природе матичне стене, а један од главних узрока неповољних својстава ових земљишта је матични супстрат. Серпентинити су стене ултрабазичног карактера које су веома богате магнезијумом, поседују велики број пукотина који проузрокује брзо отицање воде те су земљишта образована на њима сува и топла. Сматра се да је производни потенцијал ових земљишта често неповољан (Košanin, Gajić, 2008).

Приликом одређивања интензитета ерозије и режима отицаја најбитнију улогу игра вегетациони покривач, односно начин коришћења земљишног простора (Ристић, Малошевић, 2011). На подручју слива Камешине у највећој мери су заступљене листопадне, четинарске и мешовите шуме које у укупном збиру чине 75 % површине целокупног слива. Најмању просторну заступљеност имају природни пашњаци и прелазно подручје дрвећа и жбуња (слика 3). У табели 2 је дат приказ просторне и процентуалне заступљености одређених начина коришћења земљишта.



Слика 3. Начин коришћења земљишта на сливу реке Камешине
Figure 3. Land use in the river Kamešina watershed

Табела 2. Начин коришћења земљишта на сливу реке Камешине
 Table 2. Land use in the river Kamešina watershed

Начин коришћења	Површина	
	km ²	%
Листопадне шуме	8,41	31,22
Четинарске шуме	7,14	26,49
Мешовите шуме	4,76	17,66
Природни пашњаци	3,67	13,61
Прелазно подручје дрвећа и жбуња	2,97	11,02
Укупно:	26,94	100

На подручју Мокре Горе највећу опасност од поплава представља управо река Камешина на којој су се десиле две велике поплаве, 2007. и 2009. године (2021). У оквиру Просторног плана подручја посебне намене Парка природе „Шарган–Мокра Гора” (2019), рађени су регулациони радови на Камешини и њеним притокама Шарганчици, Постоњском потоку и Друганчици. Дуж река Камешине, Белог Рзава, Друганчице, Крسمанског потока, Ђетиње и Коњске реке започета је изградња бујичних преграда и брана са мини акумулацијама. У оквиру планског подручја планирана је регулација реке Камешине на дужини од 2,4 km, и њених притока (2019). Камешина, њене притоке, као и Црни Рзав, представљају карактеристичне бујичне токове велике снаге. У протеклом периоду доста је урађено на уређењу корита реке Камешине, међутим жељени ефекат није постигнут те је планирано настављање уређења кроз насеље Мокра Гора (2021).

Материјал и методе рада

За анализу основних физичко–географских параметара слива коришћене су топографска карта и дигитални модел терена (ДМТ) који је формиран на основу скенираних топографских карата у просторној резолуцији од 50 метара. За потребе овог рада коришћене су топографске карте у размери 1:25.000 (листове Кремна и Биоска, из 1978. године), Основна геолошка карта СФРЈ (Титово Ужице) у размери 1:100.000, као и Педолошка карта Србије у размери 1:50.000, издање Института за проучавање земљишта Београд–Топчидер из 1963. године. За израду карте начина коришћења земљишта коришћена је CORINE Land Cover база података из 2018. године (Büttner, Kosztra, 2017; Kosztra et al., 2017). Све претходно наведене карте и базе података анализиране су у ГИС окружењу.

Подаци о падавинама и температури ваздуха за дато подручје узети су са осматрачке мреже Републичког хидрометеоролошког Завода Р. Србије (ПХМЗС), за станицу Златибор. Анализа режима падавина претходи прорачунима максималног протицаја, а приликом анализе учесталости висине падавина одређеног трајања у тачки осматрања акценат је на броју догађаја, тј. низу који је формиран од годишњих екстрема, за тражена трајања. Учесталост појаве случајних променљивих попут јаке кише, одређује се коришћењем теоријских расподела вероватноћа (Gumbel, LogPearson), а критеријум за избор може бити број низа година осматрања. Резултат овог прорачуна су добијене висине јаких киша за тражени повратни период (Ристић, Малошевић, 2011). У овом

раду је рађен прорачун максималне дневне кише одређене вероватноће појаве, методом LogPearson-a type III расподеле за повратни период од 100 година (1%).

Прорачун максималног протицаја за слив реке Камешине је прорачунат применом комбиноване методе која обухвата два поступка – SCS (Soil Conservation Service) (SCS, 1979) методологију за раздвајање ефективних падавина (P_e) које формирају директан отицај од укупних падавина (P_b) и теорију синтетичког јединичног хидрограма за детерминисање вршне ординате јединичног отицаја. Крајњи резултат ове методе је максимални протицај којим се дефинише меродавна велика вода одређене вероватноће појаве за трајање ефективне кише (Ристић, Малошевић, 2011). Уз помоћ методе синтетичког јединичног хидрограма детерминисана је вршна ордината јединичног отицаја, за период од 100 година за просечне и надпросечне услове. Вршна ордината синтетичког јединичног хидрограма даје вредност протицаја од 1 mm ефективне кише ($q_{\max}$), а максималан протицај за тражену вероватноћу појаве ($Q_{\max}$) изражава се преко формуле (Ристић, Малошевић, 2011):

$$Q_{\max} (\%) = q_{\max} \cdot P_e (\%)$$

$Q_{\max} (\%)$ – максимални протицај одређене вероватноће појаве [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

$q_{\max}$ – вршна ордината синтетичког јединичног хидрограма [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$]

$P_e (\%)$ – ефективна киша [mm]

$$P_e = \frac{(P - 0,2 \cdot d)^2}{P + 0,8 \cdot d}$$

Потенцијална могућа инфилтрација d изражава се у mm и одређена је изразом:

$$d = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Вредност CN представља број криве отицаја који се одређује на основу дефинисаног хидролошког комплекса земљишта и начина коришћења земљишта (односно вегетационог покривача) (Ђоровић, 1984). Вредност CN за цело истраживано подручје добије се на основу заступљености појединих површина A [km^2] и множењем са одговарајућим бројем криве отицаја CN, тако да је средња вредност CN_{sr} (репрезентативна за цео слив) добијена пондерисањем и приказана применом следеће формуле:

$$CN_{sr} = \frac{A_1 \cdot CN_1 + A_2 \cdot CN_2 + \dots + A_n \cdot CN_n}{\sum A}$$

A – површина [km^2]

CN – бројеви криве отицаја

Поред прорачуна максималног протицаја у самом раду и на истраживаном сливу реке Камешине, прорачунат је и средњи годишњи отицај, који је одређен уз помоћ методе Langbein-a (Langbein, 1962). Метода Langbein-a представља емпиријску методу која као улазне податке користи средње температуре ваздуха (T) и средње годишње падавине (P) на сливу, и њена употреба је препоручљива искључиво за сливове чија је

површина до 1.000 km² (Prohaska et al., 2019). Уз помоћ методе Langbein–a, средњи годишњи отицај се одређује из следеће емпиријске везе:

$$Q/E = f(P/E)$$

Где је: Q – просечни отицај са слива изражен у cm, P – просечна годишња висина падавина на сливу изражена у cm, E – температурни фактор, који се израчунава уз помоћ формуле (Prohaska et al., 2019):

$$\log E = 0,027 \cdot T + \Theta$$

Према формули за прорачун температурног фактора E, главни параметар у прорачуну представља параметар Θ чија је оригинална вредност 0,886, али она може бити и калибрисан у односу на измерене податке. За познате вредности T и P на истраживаном подручју, одређује се вредност температурног фактора E, односно P/E и Q/E помоћу графичке зависности и табеларно према Јанковићу (Janković, 2015).

Вредност просечног отицаја може се добити применом годишњих ефективних падавина (P_{ef}) и површине слива (A) према формули:

$$Q_{sr} = \frac{P_{ef} \cdot 1000 \cdot A}{31,536 \cdot 10^6} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Док се специфична вредност отицаја добија према формулу:

$$q_{sp} = \frac{Q_{sr}}{A} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}]$$

Уз помоћ средњег протицаја, могуће је одредити и протицај малих вода. Мале воде се најчешће јављају током летњег периода године када долази до спуштања нивоа подземних вода, смањења количине воде у акумулацијама, издашности извора и уопштено смањења влажности земљишта. Мале воде су од значаја за водoprивреду јер њихово праћење омогућава планирање и управљање приликом водоснабдевања, наводњавања и заштите вода (Stričević, 2015). Мале воде (Q_{mv}) могу се изразити у функцији средњег протицаја (Q_{sr}), као:

$$Q_{mv} = 0,1 \cdot Q_{sr} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Интензитет ерозионих процеса и категорије разорности на сливу реке Камешине је анализиран и прорачунат применом Методе потенцијала ерозије према професору Слободану Гавриловићу (Gavrilović, 1972). Метода спада у групу емпиријских метода за прорачун губитака земљишта, на основу којег се израђује Карта ерозије и прорачунава продукција и пронос ерозионог материјала (Gavrilović, 1972). Категоризација ерозионих процеса извршена је према вредностима коефицијента ерозије (Z), који се одређује аналитичким путем или окуларно приликом теренског обиласка сливног подручја (Kostadinov, 2008). За правилно аналитичко одређивање потребно је правилно одредити коефицијент отпорности земљишта на ерозију (Y) који

је реципрочна вредност коефицијента отпора земљишта на ерозију и зависи од геолошких, педолошких и климатских карактеристика истраживаног подручја. Коефицијент уређења слива ($X \cdot a$) се односи на заштићеност земљишта од утицаја атмосферилија и сила ерозије у природним условима, нпр. вегетацијом (X) или вештачки створеним условима, тј. антиерозионим техничким или биолошким радовима на сливу (a). Производ ових коефицијената се креће од 0,01 (заштићено земљиште) до 1,0 (потпуно голо, незаштићено земљиште). Коефицијент φ је бројни еквивалент видљивих процеса ерозије на сливу, а средњи пад слива нам даје поузданије квантитативне вредности коефицијента ерозије него при обичном процењивању (Kostadinov, 2008). Вредности Z се крећу од 0,1 код очуваних и ерозијом слабо захваћених сливова до 1,5 и више код сливова са ексцесивном ерозијом.

$$Z = Y \cdot X \cdot a \cdot (\varphi + \sqrt{I_{sr}})$$

Y – реципрочна вредност коефицијента отпора земљишта на ерозију;

$X \cdot a$ – коефицијент уређења слива или подручја;

φ – бројни еквивалент видљивих и јасно изражених процеса ерозије на сливу;

I_{sr} – средњи пад слива.

Табела 3. Категорије ерозије на основу вредности коефицијента ерозије Z
Table 3. Classification of erosion by erosion coefficient Z

Категорија разорности (ерозивности)	Јачина ерозионих процеса	Тип владајуће ерозије	Коефицијент ерозије	Средња вредност коеф. ерозије
I	Ексцесивна ерозија	дубинска	$> 1,51$	1,25
		мешовита	1,21–1,50	
		површинска	1,01–1,20	
II	Јака ерозија	дубинска	0,91–1,00	0,85
		мешовита	0,81–0,90	
		површинска	0,71–0,80	
III	Осредња ерозија	дубинска	0,61–0,70	0,55
		мешовита	0,51–0,60	
		површинска	0,41–0,50	
IV	Слаба ерозија	дубинска	0,31–0,40	0,30
		мешовита	0,25–0,30	
		површинска	0,20–0,24	
V	Врло слаба ерозија	трагови ерозије	0,01–0,19 и мање	0,01

Извор:

Gavrilović, S. (1972) *Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji*. Izgradnja. Beograd, Serbia

Применом ерозионистичке формуле за прорачун укупног годишњег проноса наноса на сливном подручју према методи С. Гавриловића, одређене су: укупна годишња ерозиона продукција наноса (W_{god}), специфична годишња ерозиона продукција наноса на сливу (W_{godsp}), средњегодишњи пронос наноса на хидрографској мрежи (G_{god}), специфични средњи годишњи пронос наноса (G_{godsp}), и количина вученог (W_{vn}) и суспендованог наноса (W_{sn}). У наставку су дате формуле за прорачун према оригиналној Методи потенцијала ерозије према Гавриловићу (Gavrilović, 1972):

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

W_{god} – укупна годишња ерозиона продукција наноса на сливу [$m^3 \cdot god \cdot l^{-1}$]

T – температурни коефицијент подручја

$$T = \sqrt{\frac{t_{sr}}{10}} + 0.1$$

t_{sr} – средња годишња температура ваздуха [$^{\circ}C$]

H_{god} – средња годишња количина падавина [mm]

π – 3,14;

Z – коефицијент ерозије;

A – површина сливног подручја [km^2]

$$W_{godsp} = \frac{W_{god}}{A}$$

W_{godsp} – специфична годишња ерозиона продукција наноса на сливу [$m^3 \cdot god \cdot l^{-1} \cdot km^{-2}$]

$$G_{god} = W_{god} \cdot R_u$$

G_{god} – средњегодишњи пронос наноса [$m^3 \cdot god \cdot l^{-1}$]

$$R_u = \frac{(O \cdot D)^{0.5}}{0.25 \cdot (L + 10)}$$

R_u – коефицијент ретенције наноса

O – обим слива [km]

L – дужина слива [km]

D – средња висинска разлика [m]

$$D = H_{sr} - K_u$$

$$G_{godsp} = \frac{G_{god}}{A}$$

G_{godsp} – специфични средњи годишњи пронос наноса [$m^3 \cdot god \cdot l^{-1} \cdot km^{-2}$]

$$\delta = \frac{z \cdot (\rho_1 - 1)}{\pi \cdot \rho_2}$$

δ – учешће вученог наноса [%]

ρ_1 – запреминска маса вученог наноса [tm^{-3}]

ρ_2 – запреминска маса суспендованог наноса [tm^{-3}]

$$W_{wn} = G_{god} \cdot \delta$$

$$W_{sn} = G_{god} - W_{wn}$$

W_{wn} – количина вученог наноса [$m^3 \cdot god \cdot l^{-1}$]

W_{sn} – количина суспендованог наноса [$m^3 \cdot god \cdot l^{-1}$]

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

На основу дефинисаних методолошких поступака који су описани у претходном поглављу добијени су и анализирани резултати за прорачун максималног протицаја, као и прорачун средњих и малих вода, и анализа интензитета ерозионих процеса. У табели 4 приказани су подаци средњих месечних и средњих годишњих температура ваздуха за главну метеоролошку станицу Златибор. Према приказаној табели, најнижа средња месечна температура ваздуха је забележена у јануару, а највиша у августу. Поред средње годишње температуре ваздуха, за потребе анализе интензитета ерозионих процеса и прорачуна средњих и малих вода, анализиране су и средње месечне и средње годишње количине падавина за главну метеоролошку станицу Златибор. У табели 5 наведене су средње месечне и средње годишње количине падавина за посматрани низ од 1951. до 2020. године. На основу приказане табеле, најниже средње месечне количине падавина су забележене у месецу фебруару, док су највише количине падавина забележене у јуну месецу.

Табела 4. Средње месечне и годишње температуре ваздуха за главну метеоролошку станицу Златибор за 2020. годину

Table 4. Average monthly and annual air temperatures for the main meteorological station Zlatibor for the year 2020

Месец	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год.
Вред.	-1,2	2,1	3,0	8,3	11,5	14,9	17,5	18,4	15,1	10,0	4,0	2,5	8,9

Извор: PXM3C

(http://www.hidmet.gov.rs/ciril/meteorologija/klimatologija_godisnjaci.php)

Табела 5. Средња месечна и годишња количина падавина за главну метеоролошку станицу Златибор за период од 1951. до 2020. године

Table 5. Average monthly and annual amount of precipitation for the main meteorological station Zlatibor, period from year 1951 to 2020

Месец	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год.
Вред.	63,84	63,59	69,16	76,86	102,32	108,97	97,15	77,75	88,19	76,06	82,18	74,69	980,77

Извор: PXM3C

(http://www.hidmet.gov.rs/ciril/meteorologija/klimatologija_godisnjaci.php)

Анализа режима падавина обухватила је прорачун максималне дневне кише одређене вероватноће појаве методом LogPearson-a III за повратни период од 100 година и износи $P_{1\%}=74,641$ mm. Након добијене висине јаких падавина за различите повратне периоде, рађен је прорачун максималног протицаја применом комбиноване методе. SCS методологија обухватила је одређивање криве отицаја тј. CN криве, на основу хидролошке класе земљишта и начина коришћења. На сливном подручју је заступљено скелетно земљиште на серпентиниту што га сврстава у класу C (табела 6), а комбинације са различитим начинима коришћења и површине на којима су заступљени дале су различите вредности CN (табела 7).

Максимална вредност CN је 79 за природне пашњаке, а најнижа 71 за прелазно подручје дрвећа и жбуња.

Табела 6. Прорачун хидролошке класе земљишта
Table 6. Calculation of soil hydrological class

Редни број	Тип земљишта	Површина [km ²]	Хидролошка класа земљишта
1	Скелетно земљиште на серпентиниту	26,94	C

Табела 7. Прорачун за CN криву
Table 7. Calculation for curve number (CN)

Редни број	Начин коришћења	Хидролошка класа земљишта	Површина [km ²]	CN
1	Листопадне шуме	C	8,41	73
2	Четинарске шуме	C	7,14	77
3	Мешовите шуме	C	4,76	77
4	Природни пашњаци	C	3,67	79
5	Прелазно подручје дрвећа и жбуња	C	2,97	71

Применом формуле за пондерисање CN вредности на основу хидролошке класе земљишта и структуре земљишног покривача и начина коришћења земљишта, за цело истраживано подручје за просечне услове влажности износи CN=76. Применом табеле са бројевима криве отицаја CN за три услова влажности, за подпросечне услове износи CN=58, док је за надпросечне услове влажности CN=89. Уз помоћ методе синтетичког јединичног хидрограма детерминисана је вршна ордината јединичног отицаја, за период од 100 година (1%) за просечне и надпросечне услове. Добијене вредности максималног протицаја за дате услове приказане су у табели 8, а криволинијски хидрограм на графику 1.

Табела 8. Добијене вредности максималног протицаја за 100 година, просечне и надпросечне услове влажности

Table 8. Obtained values of maximum streamflows for 100 years, average and above-average humidity conditions

Просечни услови влажности		Надпросечни услови влажности	
q_{max} [m ³ ·s ⁻¹ ·mm]	0,76	q_{max} [m ³ ·s ⁻¹ ·mm]	0,86
Q_{max} [m ³ ·s ⁻¹]	11,58	Q_{max} [m ³ ·s ⁻¹]	25,93

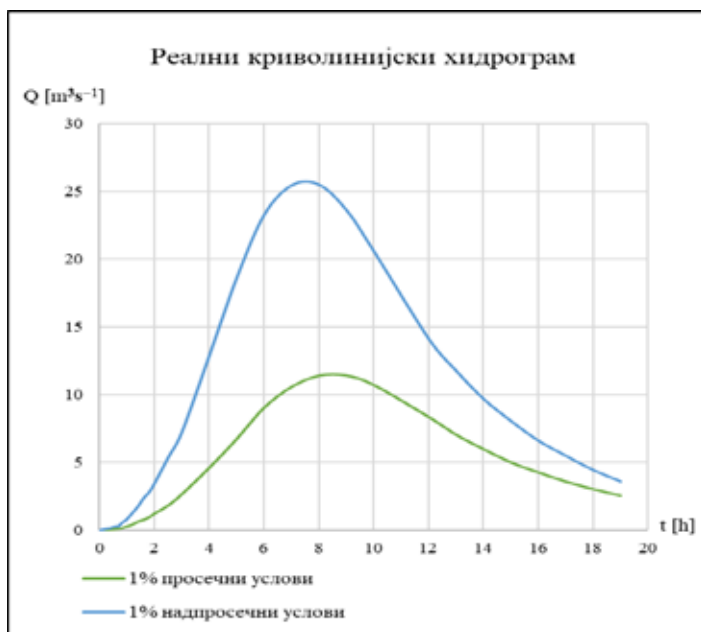


График 1. Реални криволинијски хидрограм за 100 година (1 %),
за просечне и надпросечне услове влажноти
Graphic 1. Real curvilinear hydrograph for 100 years (1 %),
for average and above-average humidity conditions

Применом емпиријске методе Langbein-a, добијен је протицај средњих вода на сливу реке Камешине. Уз помоћ податка о средњој годишњој температури ваздуха, прорачунат је температурни фактор који износи $E=13,38$ cm. У односу на добијени температурни фактор, на основу другог улазног параметра (средње годишње количине падавина) израчунат је однос између P/E који износи 7,33. На основу приказане емпиријске везе према методи Langbein-a, и у односу на функцију између P/E, добијене су вредности Q/E које износе 2,54. Према приказаним вредностима које су добијене из емпиријских веза, ефективне падавине на истраживаном сливу износе $P_{ef}=33,97$ cm, односно $P_{ef}=339,7$ mm. На основу ефективних падавина, прорачуната је и специфична вредност отицаја која износи $q_{sp}=10,785$ [l·s⁻¹·km⁻²] док протицај средњих вода износи $Q_{sr}=290,5$ [l·s⁻¹]. Вредности добијене применом методе Langbein-a приказане су у табели 9.

Табела 9. Вредности добијене применом методе Langbein-a
Table 9. Values obtained using the Langbein method

E [cm]	P/E	Q/E	P_{ef} [cm]	P_{ef} [mm]	q_{sp} [l·s ⁻¹ ·km ⁻²]	Q_{sr} [m ³ ·s ⁻¹]	Q_{sr} [l·s ⁻¹]
13,38	7,33	2,54	33,97	339,7	10,785	0,2905	290,5

Добијени резултати средњег протицаја (табела 9) су сведени на јединицу сливне површине, тј. представљени су по јединици површине слива, која представља квантитативну карактеристику издашности слива (Prohaska et al., 2020):

$$q_{sp} = \frac{Q_{sr}}{A} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}]$$

q_{sp} – специфична вредност отицаја $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}]$;

Q – максимални протицај воде $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$;

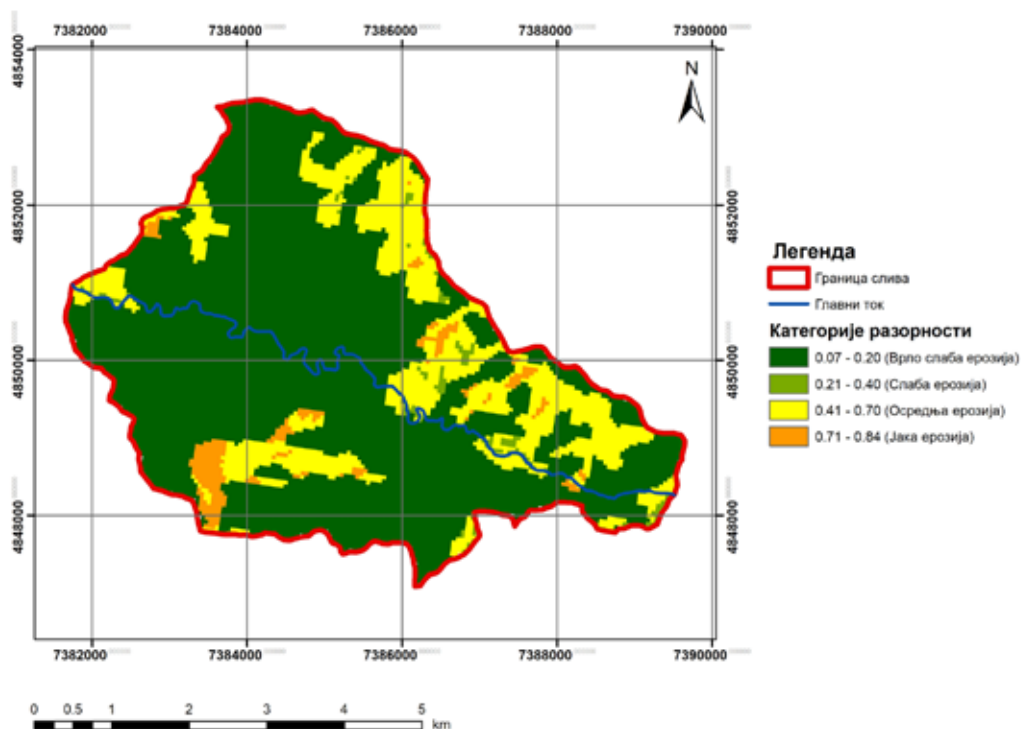
A – површина слива $[\text{km}^2]$;

$$q_{sp} = 0,010785 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2} = 10,785 \text{ l} \cdot \text{s} \cdot \text{km}^{-2}$$

Мале воде у речним токовима представљају есенцијално хидролошко стање и један од незаобилазних елемената водопривреде. Познавање њихових карактеристика значајно је за пројектовање, грађење, одржавање и управљање разним водопривредним системима (Никић, 2006). Нарочито важну улогу имају у заштити и очувању природне средине. При томе, сви корисници вода веома су осетљиви на промене режима речних вода у маловодном периоду. На основу овога, мале воде (Q_{mv}) могу се изразити у функцији средњег протицаја (Q_{sr}), и за истраживано подручје слива реке Камешине износе $Q_{mv} = 29,05 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, а рачунају се према датој формули:

$$Q_{mv} = 0,1 \cdot Q_{sr} = 0,1 \cdot 0,2905 = 0,02905 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 29,05 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

Према квантитативној класификацији бујичних токова по методи професора С. Гавриловића, река Камешина спада у класу бујичних река ($H_k=27,25$). У табели 10 је приказана распрострањеност ерозије на истраживаном подручју и њен интензитет. У односу на општу развијеност ерозионих процеса, према Методи потенцијала ерозије, са добијеном вредношћу коефицијента ерозије $Z_{sr}=0,226$, дато сливно подручје је захваћено слабом ерозијом. На сливном подручју, заступљени су ерозиони процеси од врло слабе до јаке ерозије. Процеси јаке ерозије се јављају на површини од $0,97 \text{ km}^2$ тј. на 3,61 % територије слива. Наведени процеси ерозије су заступљени највећим делом на подручју природних пашњака. Просеци осредње ерозије заузимају површину од $5,42 \text{ km}^2$, односно 20,10 % од укупне површине истраживаног подручја. У погледу начина коришћења земљишта, процеси осредње ерозије су заступљени на подручју природних пашњака и на прелазном подручју дрвећа и жбуња. Ерозиони процеси који спадају у категорију слабе ерозије, заузимају најмањи део површине слива и износи $0,38 \text{ km}^2$ односно 1,42 % сливног подручја. Ова категорија се јавља такође на подручју природних пашњака и прелазног подручја дрвећа и жбуња. У највећој мери је заступљена врло слаба ерозија која се простире на чак $20,17 \text{ km}^2$ тј. 74,87 % територије слива и она је равномерно распоређена на целој површини и углавном је под листопадним и мешовитим шумама. У наставку је дата карта са приказаним категоријама разорности (слика 4). Карта ерозије слива се добија као резултат детаљног проучавања процеса ерозије, а важна је приликом сагледавања проблематике ерозије у сливу и планирања противерозионих радова и радова у области водопривреде, пољопривреде и индустрије (Kostadinov, 2008).



Слика 4. Категорије ерозије на сливу реке Камешине
Figure 4. Cattegories of erosion of the river Kamešina watershed

Табела 10. Заступљеност категорија ерозије на сливу реке Камешине
Table 10. Representation of certain types of erosion in the river Kamešina watershed

Категорије разорности	Јачина ерозивних процеса	Заступљеност	
		km ²	%
II	Јака ерозија (0,71– 1,0)	0,97	3,61
III	Средња ерозија (0,41–0,70)	5,42	20,10
IV	Слаба ерозија (0,20–0,40)	0,38	1,42
V	Врло слаба ерозија (0–0,19)	20,17	74,87
	Укупно	26,94	100
Средња вредност коефицијента ерозије за цео слив је $Z_{sr}= 0,226$			

Укупна продукција и пронос ерозионог материјала на сливу одређени су Методом потенцијала ерозије. Према дефинисаним параметрима и објашњеној методологији рада, у табели 11 приказане су добијене вредности продукције и проноса наноса на сливу реке Камешине. Према приказаној табели 11, укупна годишња продукција ерозионог материјала износи $W_{god}=8.869 \text{ m}^3 \cdot \text{god}^{-1}$, а специфична продукција ерозионог материјала на истраживаном подручју $W_{godsp}=329,21 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$. Поред прорачуна продукције ерозионог материјала, а према дефинисаној формули Методе потенцијала ерозије прорачунат је и пронос ерозионог материјала до најниже тачке на истраживаном сливу. Према датој методологији, средњи годишњи пронос наноса у хидрографској мрежи реке Камешине износи $G_{god}=5.055,33 \text{ m}^3 \cdot \text{god}^{-1}$, док специфични средњи годишњи пронос наноса, који је дефинисан по јединици површине, износи $G_{godsp}=187,65 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$. Према дефинисаном проносу наноса, прорачуната је и количина вученог и суспендованог наноса. Укупна количина вученог наноса на посматраном сливу износи $W_{wn}=309,39 \text{ m}^3 \cdot \text{god}^{-1}$, док укупна количина суспендованог наноса износи $W_{sn}=4.745,94 \text{ m}^3 \cdot \text{god}^{-1}$.

*Табела 11. Добијене вредности укупне годишње
ерозионе продукције и проноса наноса
Table 11. Obtained values of total annual
erosion production and sediment transport*

W_{god} [$\text{m}^3 \cdot \text{god}^{-1}$]	W_{godsp} [$\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$]	G_{god} [$\text{m}^3 \cdot \text{god}^{-1}$]	G_{godsp} [$\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$]	W_{wn} [$\text{m}^3 \cdot \text{god}^{-1}$]	W_{sn} [$\text{m}^3 \cdot \text{god}^{-1}$]
8.869	329,21	5.055,33	187,65	309,39	4.745,94

W_{god} – укупна годишња продукција наноса; W_{godsp} – специфична годишња продукција наноса на сливу; G_{god} – средње годишњи пронос наноса на хидрографској мрежи; G_{godsp} – специфичн средњи годишњи пронос наноса; W_{wn} – количина вученог наноса; W_{sn} – количина суспендованог наноса;

ЗАКЉУЧАК

Земљиште представља неопходан природни ресурс који настаје под утицајем различитих фактора, а као један од основних фактора његове деградације издваја се ерозија земљишта. У циљу процене интензитета ерозије земљишта и могућности утицаја на смањење деградационих процеса, примењују се различите методе које служе за процену губитака земљишта, а добијене резултате могуће је представити у просторној функцији уз помоћ Географског Информационог Система (ГИС). На основу анализе добијених карактеристика слива реке Камешине, константовано је да:

- Слив има симетричан облик, количину атмосферских талога од 980,77 mm и дате топографске услове који могу створити услове за површинско отицање воде.
- Вегетациони покривач је дефинисан следећом структуром површина: шуме 75,37 %, природни пашњаци 13,61 % и прелазно подручје дрвећа и жбуња 11,02 %.
- Река Камешина је према Квантитативној класификацији бујичних токова према методи проф. Слободана Гавриловића, сврстана у класу бујичних река. А густина хидрографске мреже је велика са вредношћу преко 2 ($G=3,29 \text{ km/km}^2$).
- Према Методи потенцијала ерозије добијен је коефицијент ерозије $Zsr=0,226$, према чему је сливно подручје захваћено слабом ерозијом. На сливном подручју присутни су ерозиони процеси од врло слабе до јаке ерозије. Категорија јаке ерозије се јавља на 3,61 % територије слива, осредња ерозија на 20,10 %, а врло слаба ерозија заузима свега 1,42 %. Највећу распрострањеност од 74,87 % територије слива има врло слаба ерозија, која је већим делом под листопадним и мешовитим шумама.
- Са аспекта псамолошких услова на истраживаном подручју, укупна годишња продукција ерозионог материјала износи $W_{god}=8.869 \text{ m}^3\cdot\text{god}^{-1}$, док је специфична продукција ерозионог материјала по јединици површине $W_{godsp}=329,21 \text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{god}^{-1}$. Поред продукције ерозионог материјала, анализирана је и средњи годишњи пронос наноса у хидрографској мрежи који износи $G_{god}=5.055,33 \text{ m}^3\cdot\text{god}^{-1}$, док специфични средњи годишњи пронос наноса, који је дефинисан по јединици површине, износи $G_{godsp}=187,65 \text{ m}^3\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{god}^{-1}$. Кроз саму анализу псамолошких услова, прорачуната је и количина вученог и суспендованог наноса. Укупна количина вученог наноса на посматраном сливу износи $W_{wn}=309,39 \text{ m}^3\cdot\text{god}^{-1}$, док укупна количина суспендованог наноса износи $W_{sn}=4.745,94 \text{ m}^3\cdot\text{god}^{-1}$.
- Хидролошка анализа на истраживаном сливу је рађена за прорачун максималног површинског отицаја, као и за прорачун средњих и малих вода. Максимални површински отицај за просечне услове влажности износи $Q_{max}=11,58 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, док је просечна вредност броја криве отицаја $CNsr=76$. За надпросечне услове влажности вредност броја криве отицаја износи $CNsr=89$, док је максимални површински отицај $Q_{max}=25,93 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Анализа средњих вода, добијена је применом емпиријске методе $Langbeina$ а и на истраживаном подручју износи $Qsr=0,2905 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Прорачун малих вода изражава се у функцији средњег протицаја и на предметном подручју износи $Q_{mv}=0,0295 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

Дакле, иако је прорачунима и картирањем доказано да је сливно подручје реке Камешине захваћено врло слабом ерозијом, на неким деловима сливног подручја јавља се категорија јаке ерозије. Из тог разлога је неопходно праћење и изучавање ерозионих процеса, одређивање типа деградације и узрока. Потребно је успоставити комбинацију очувања земљишних и водних ресурса, уз едукацију становништва о начинима њиховог правилног коришћења, што би дугорочно утицало на смањење ерозионих процеса и смањење појаве учесталих бујичних поплава.

LITERATURA

- (2011): Lokalni akcioni plan za biodiverzitet opštine Čajetina (LBAP)
- (2019): Prostorni plan područja posebne namene Parka prirode „Šargan – Mokra Gora” („Službeni glasnik RS”, broj 13/19 i Službeni glasnik RS”, broj 10/19).
- (2021): Operativni plan odbrane od poplava za područje grada Užica za vode II reda u 2021. godini.
- Belanović S. (2012): Melioracije zemljišta, praktikum. Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu
- Büttner G., Kosztra B. (2017): CLC2018 Technical Guidelines. European Environment Agency (EEA), Technical Report
- Gavrilović, S. (1972) Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji. Izgradnja. Beograd, Serbia
- Gyssels G., Poesen J., Bochet E., Li Y. (2005): Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. *Progress in Physical Geography*, 29(2), 189–217. doi:10.1191/0309133305pp443ra
- Janković, D. (2015) O određivanju prosečnog oticanja sa neizučenih slivova na teritoriji Srbije. Zbornik radova 17. Savetovanja SDHI - SDH, Vršac, Srbija. str. 816-825.
- Kostadinov S. (2008): Bujični tokovi i erozija. Univerzitetski udžbenik. Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu. ISBN 978-86-7299-147-5, 505 str.
- Kosztra B., Büttner G., Hazeu G., Arnold S. (2017): Updated CLC illustrated nomenclature guidelines, European Environment Agency (EEA), Service Contract No 3436/R0-Copernicus/EEA.57441 Task 3, D3.1 – Part 1.
- Košanin O., Gajić B. (2008): Karakteristike nekih serpentskih zemljišta u sastojinama crnog bora na području Divčibare–Bukovi. Originalni naučni rad UDK 630*114.4 (497.11 Divčibare)
- Lal R. (1997): Degradation and resilience of soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 352. 10.1098/rstb.1997.0078.
- Langbein W.B. (1962): The water supply of arid valleys in intermountain regions in relation to climate. *Bulletin of the International association of Scientific Hydrology*, 7(1), 34-39.
- Morgan R. P. C. (2009): Soil erosion and conservation. John Wiley & Sons.
- Oldeman L. R. (1992): Global Extent of Soil Degradation. In *Bi-Annual Report 1991-1992 / ISRIC* (pp. 19-36). ISRIC. <https://edepot.wur.nl/299739>
- Prohaska O., Plavšić J., Prohaska S., Todorović A. (2019): Kartiranje parametara metode Langbajna za proračun srednjih voda na neizučenim slivovima na teritoriji Srbije. *Vodoprivreda*, 51(297–299), 99–109.
- Prohaska S., Plavšić J., Pavlović D., Čatović S., Marjanović S., Bartoš Divac V., Todorović A. (2020): Male vode na malim i srednjim slivovima Srbije. In *Voda 2020: zbornik radova 49. godišnje konferencije o aktuelnim problemima korišćenja i zaštite voda*, Trebinje, 19.-20. novembar 2020./*Water 2020: Conference Proceedings 49th Annual Conference of the Serbian Water Pollution Control Society* (pp. 9-15). Srpsko društvo za zaštitu voda.
- Rakićević T. (1963): Klimatske i hidrološke osobine Zlatibora. *Glasnik srpskog geografskog društva*. Sveska XLIII – br. 1.
- Ristić R., Kostadinov S., Abolmasov B., Dragičević S., Trivan G., Radić B., Radosavljević Z. (2012): Torrential floods and town and country planning in Serbia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(1), 23–35. doi:10.5194/nhess-12-23-2012
- Ristić R., Malošević D. (2011): Hidrologija bujičnih tokova, Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, (1–221 str.)
- Soil Conservation Service (1979): *National Engineering Handbook*, Section 4, Hydrology, US

Department Agriculture, Washington, D.C.

Stričević L. (2015): Vodni resursi Rasinskog okruga i njihov uticaj na regionalni razvoj. Univerzitet u Nišu

Ђоровић М. (1984): Одређивање хидролошке класе земљишта, Водопривреда, бр. 87: 57-60.

Никић З. (2006): Регионална анализа малих вода на средњим и малим водотоцима у брдскопланинским подручјима Србије - хидрогеолошки приступ, Гласник Шумарског Факултета, Београд, 2006, бр. 94, стр. 9-28, UDK: 556.536

Републички хидрометеоролошки завод Србије (ПХМЗС): Метеоролошки годишњаци: 1. Климатолошки подаци 1951-2020. Преузето: http://www.hidmet.gov.rs/ciril/meteorologija/klimatologija_godisnjaci.php