

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ШУМАРСКИ ФАКУЛТЕТ
ЕРОЗИЈА ЗЕМЉИШТА И ПРЕВЕНЦИЈА БУЈИЧНИХ ПОПЛАВА

МАСТЕР РАД

ПРЕДМЕТ: ПРЕВЕНЦИЈА ОД БУЈИЧНИХ ПОПЛАВА

**ТЕМА: ХИДРОЛОШКИ И ПСАМОЛОШКИ ЕФЕКТИ ПРОТИВЕРОЗИОНИХ
РАДОВА НА СЛИВУ ЧЕСТИНСКЕ РЕКЕ**

Студент:
Никола Станишић

Ментор:
др Ратко Ристић, ред. проф.

Београд, 2022.

Садржај

1. Увод.....	6
2. Метод рада.....	8
2.1. Прорачун маскималног протицаја применом комбинованог метода.....	8
2.1.1. SCS методологија (Soil Conservation Service).....	8
2.1.2. Метода синтетичког јединичног хидрограма.....	9
2.2 Метод потенцијала ерозије.....	11
2.2.1. Коефицијент отпора земљишта на ерозију (Y).....	12
2.2.2. Коефицијент уређења слива (X·a).....	12
2.2.3. Коефицијент видљивих и јасно изражених ерозионих процеса (φ).....	14
2.2.4. Средњи нагиб терена (Isr).....	14
2.2.5. Продукција наноса.....	14
2.2.6. Пренос наноса.....	15
3. Материјал рада.....	17
3.1. Географски положај истраживаног подручја.....	17
3.2. Климатски услови на истраживаном подручју.....	18
3.3. Подаци о земљишном покривачу.....	18
3.4. Заступљеност типова земљишта.....	19
3.4.1. Скелетно и скелетоидно земљиште.....	19
3.4.2. Алувијална земљишта (Флувисол).....	20
3.4.3. Еутрично смеђе земљиште (Гајњача).....	21
3.4.4. Смоница.....	21
4. Планирани радови на сливу Честинске реке.....	23
5. Резултати истраживања.....	25
5.1.Физичко – географске карактеристике слива Честинске реке.....	25
5.2. Резултати прорачуна SCS.....	26
5.2.1. Хидролошки резултати на сливу Честинске реке пре извођења противерозионих радова.....	26
5.2.2. Хидролошки резултати на сливу Честинске реке после извођења противерозионих радова.....	31
5.3. Резултати прорачуна МПЕ.....	36
6. Дискусија.....	39
7. Закључак.....	42
Литература.....	43

Апстракт:

Најзаступљенији вид деградације земљишта представља ерозија земљишта, представљајући велику опасност како по животну средину, тако и за човека. У директној вези са ерозионим процесима је и настанак бујичних поплава. Бујичне поплаве представљају најчешћу природну непогоду у Србији. Могу бити последица природних појава или антропогеног утицаја. Неодговарајуће коришћење земљишта утиче на развој ерозионих процеса, долази до деградације, а самим тим и до смањења инфилтрационо–ретенционог капацитета и стварања површинског отицаја. На тај начин долази до појаве бујичних поплава које са собом носе суспендовани и вучени нанос који се акумулира у плавним зонама изазивајући велике материјалне штете.

Сврха овог рада је приказ хидролошких и псамолошких ефеката примењених противерозионих радова и мера у сливу Честинске реке. Променом начина коришћења у сливу, изведеним противерозионим радовима и мерама, дошло је до смањења вредности коефицијента ерозије са $Z = 0,17$ на $Z = 0,10$. Вредност максималног протицаја $Q_{\max(1\%)} = 31,28\text{m}^3/\text{s}$, смањена је на $Q_{\max(1\%)} = 26,52\text{m}^3/\text{s}$.

Ови резултати показују да променом начина коришћења дошло је до побољшања хидролошког и псамолошког режима у сливу Честинске реке. Побољшањем ових услова долази до смањења ризика од појаве бујичних поплава и последица изазваних овом појавом. Такође на овај начин утичемо на побољшање стања животне средине, квалитет шумских екосистема, земљишта и вода.

Кључне речи: ерозија, бујичне поплаве, промена начина коришћења, SCS, Метод потенцијала ерозије

Abstract

The most common type of soil degradation is soil erosion, which represent a great danger to both the environment and humans. The occurrence of torrential floods is directly related to erosion processes. Flash floods are the most common natural disaster in Serbia. They can be the result of natural phenomena or anthropogenic influence. Improper land use affects the development of erosion processes, land degradation, and thus influence on the reduction of soil infiltration-retention capacity and the creation of surface runoff. In this way, torrential floods occur, which transport sediment load and bedload accumulating it in floodplain, also causing great material damage.

The purpose of this paper is to present the hydrological and sediment transport effects of applied antierosion works and measures in the Čestina river basin. By changing the land use in the basin and with applied antierosion works and measures, the value of the erosion coefficient decreased from $Z = 0.17$ to $Z = 0.10$. The value of the maximum discharge $Q_{\max(1\%)} = 31,28\text{m}^3/\text{s}$, was reduced to $Q_{\max(1\%)} = 26,52\text{m}^3/\text{s}$.

These results show that the hydrologic and sediment transport regime was improved by land use change in the Čestina river basin. The risk of flash floods and the consequences caused by this phenomenon are reduced enhancing these conditions. Also changing these conditions the quality of forest ecosystems, soil, water and environment will be improved.

Keywords: erosion, flash floods, land use change, SCS, Erosion Potential 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. Као вид деградације земљишта, ерозија представља једну од највећих опасности како по животну средину, тако и по човека и има огроман утицај на сваки аспект друштвеног живота. У директној вези са ерозионим процесима је и настанак бујичних поплава. Бујичне поплаве представљају најчешћу природну непогоду у Србији. Могу бити последица природних појава или антропогеног утицаја. Хидролошки режим им је веома специфичан и манифестује се великим распоном протицаја и карактеристичном формом хидрограма великих вода.

Као предметно подручје узет је слив Честинске реке због специфичности које га карактеришу. С обзиром да на посматраном водотоку не постоје хидролошка мерења, вредности максималних протицаја прорачуната је применом комбинованог метода који обухвата SCS (Soil Conservation Service) методологију за раздвајање ефективних од бруто падавина и метода синтетичког јединичног троугаоног хидрограма. Процена губитака земљишта на истраживаном подручју извршена је коришћењем метода потенцијала ерозије (МПЕ).

Применом техничких, биотехничких и биолошких радова, као и увођењем административних мера на сливу Честинске реке дошло је до промене вредности максималних протицаја и коефицијента Z . Хидролошко-псамолошки ефекти противерозионих радова представљени су добијеним резултатима, односно упоређивањем вредности максималних протицаја и коефицијента Z за период пре и након изведених радова.

Изведеним радовима и предузетим адекватним мерама на сливу Честинске реке репрезентативна вредност коефицијента ерозије редукована је са $Z=0,17$ на $Z=0,10$ што утиче и на смањење продукције и проноса наноса. Вредност максималног протицаја $Q_{\max(1\%)} = 31,28\text{m}^3/\text{s}$, пре рестаурације смањена је на $Q_{\max(1\%)} = 26,52\text{m}^3/\text{s}$ после рестаурације, што указује на побољшање хидролошких услова као директну последицу промене начина коришћења земљишта.

Једина права ефикасна одбрана је превенција, која се састоји у перманентној контроли ерозије земљишта у сливу, извођењем неопходних противерозионих радова.

1. Увод

Ерозија земљишта је најподмуклији непријатељ човека, јер неприметно деградира и уништава земљиште, а самим тим и животну средину. Под појмом ерозије земљишта, у елементарном смислу, подразумевамо промене на површинском слоју земљишног рељефа, које настају као последица деловања кише, снега, мраза, температурних разлика, ветра и текућих вода, или услед деловања антропогеног фактора (Gavrilović, 1972).

На ерозију земљишта и настанак ерозионих процеса, утичу разноврсни биофизички и антропогени процеси који се одвијају са различитим интензитетом (Saavedra, 2005). Ерозиони процеси могу имати различите интензитете од најслабијих до екстремних. Неки процеси ерозије су јасно видљиви док други облици ерозије су прикривени и постају видљиви тек онда кад интензитет ерозије постане знатно јачи. Ерозија је један од најраспрострањенијих облика деградације земљишта широм света (Lal, 2010). Ветар и вода представљају главне покретаче деградације, где је највећи фокус дат водној ерозији (Borrelli et al., 2020). Ерозија је важан чинилац у процесу настанка бујичних поплава које на еродираним земљишту добијају велику брзину и значајан садржај наноса.

Бујичне поплаве су најчешћа природна катастрофа која последњих деценија представља еколошки и економски изазов на глобалном нивоу (Merz et al., 2010). На територији Србије, бујичне поплаве представљају највећи природни проблем, који са собом носи велике последице по животе и активности људи (Ристић, Никић, 2007). На територији Србије регистровано је око 11.500 бујичних водотокова смештених јужно од Саве и Дунава са изузетком Фрушке горе, Тителског брега и Вршачких планина у Војводини (Ристић и сар. 2016). Проблем бујичних поплава је највише изражен на брдско-планинским пределима наше земље. Ова подручја су генерално угрожена интензивнијим процесима ерозије, али се јављају и на долињским деоницама бујичних токова.

Бујичне поплаве настају као резултат хидролошких екстрема, динамичког кретања воде и наноса, а као узроци се могу издвојити бројни метеоролошки, али и физичко-географским фактори (Yang et al. 2003; Lincoln, 2007). Специфичне и варијабилне карактеристике климе и рељефа, геологије терена, педолошког и вегетационог покривача, али и промене социоекономских прилика, као што су миграције становништва или начин коришћења земљишта, представљају широк спектар услова и фактора појаве бујичних поплава у Србији (Милчановић, 2021). Крчење и уништавање шума, смањење пољопривредних површина и процеси урбанизације имају значајне негативне последице на хидролошки режим (Carlson, Arthur, 2000; Arthur-Hartranft et al., 2003). Повећање непропусних површина на сливу доводи до смањења нивоа подземних вода (Llorens, Domingo, 2007), као и стварање услова за појаву брзог површинског отицаја и бујичних поплава (Ferreira et al., 2012). Процес урбанизације утиче на повећање вршне ординате хидрограма, смањење времена кашњења и

повећање укупне запремине поплавног таласа (Ferreira et al., 2012). Климатске промене представљају глобални проблем који може да доведе повећања хидролошког циклуса, укључујући више укупних падавина и чешћих кишних догађаја високог интензитета (M.Nearing et al., 2004).

Трајање бујице је релативно кратко, реда величине неколико часова. Тај период од неколико часова омогућава практично само евакуацију локалног становништа угроженог овом стихијском појавом. Једина права ефикасна одбрана је превенција, која се састоји у перманентној контроли ерозије земљишта у сливу извођењем неопходних противерозионих радова и сталан мониторинг који је у садашњем времену напретком технологије доста олакшан.

2. Метод рада

С обзиром да на посматраном водотоку не постоје хидролошка мерења и спада у групу неизучених водотока као и већина водотока у Србији, вредности максималних протицаја прорачуната је применом комбинованог метода који обухвата SCS (Soil Conservation Service) методологију за раздвајање ефективних од бруто падавина и метода синтетичког јединичног троугаоног хидрограма. Процена губитака земљишта на истраживаном подручју извршена је коришћењем метода потенцијала ерозије (МПЕ).

2.1. Прорачун максималног протицаја применом комбинованог метода

Прорачун максималног протицаја комбинованим методом подразумева примену два основна поступка:

- SCS методологије за раздвајање ефективних падавина од укупних падавина
- Теорије синтетичког јединичног хидрограма за детерминисање вршне ординате јединичног отицаја

2.1.1. SCS методологија (Soil Conservation Service)

Ова метода је развијена средином XX века у САД. Овом методом се детерминише онај део падавина који формира директан отицај. Метод полази од претпоставке да се бруто падавине процесима трансформације разлажу на : директан отицај изражен као ефективна киша, реална инфилтрација воде у сливу и почетне губитке, уз то уведен је и термин потенцијално могуће инфилтрације (Ристић, Малошевић, 2011).

Одатле следи:

$$\frac{R}{d} = \frac{Pe}{P - I}$$

Где је:

P – бруто падавине

Pe – ефективна киша

I – почетни губици [mm]

R – реална инфилтрација воде у сливу [mm]

d – потенцијално могућа инфилтрација воде у сливу [mm]

Комбиновањем горње једначине са једначином континуитета:

$$R = (P - I) - Pe$$

Добија се:

$$\frac{(P - I) - Pe}{d} = \frac{Pe}{P - I}$$

Решавањем једначине по Pe добија се израз:

$$Pe = \frac{(P - I)^2}{(P - I) + d}$$

На основу истраживања која је спровела служба SCS, установљена је зависност која важи за стање просечне влажности земљишта :

$$I = 0,2 \cdot d$$

Уношењем овог израза у једначину за прорачун ефективних падавина добија се:

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

Вредност потенцијалне могуће инфилтрације d , одређена је изразом:

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

Потенцијално могућа инфилтрација воде у сливу зависи од вредности CN броја. Вредност CN броја односно броја криве дефинише комплексност односа земљишта и начина коришћења истог. За непрпусне површине као што су асфалт и бетон и водене површине вредност броја $CN = 100$, док је за све остале природне површине $CN < 100$.

2.1.2. Метода синтетичког јединичног хидрограма

Синтетички јединични троугаони хидрограм конструише се на основу рачунски добијених вредности: време кашњења слива tp , време пораста хидрограма Tr , време опадања хидрограма Tr , временска база хидрограма Tb , вршна ордината синтетичког јединичног хидрограма q_{max} (Ристић, Малошевић, 2011).

Време кашњења слива добија се на основу израза:

$$tp = C \cdot \left(\frac{L \cdot Lc}{I_u} \right)^n$$

tp – време кашњења слива [h];

L – дужина слива по главном току [km];

Lc – растојање од тежишта до излазног профила [km];

I_u – уравни пад тока [%];

$C = 0,751$; $n = 0,336$.

Вредности параметара C и n добијене су на основу обраде хидрограма са 93 бујична слива у Србији (Ристић, Малошевић, 2011).

Време пораста хидрограма добија се на основу следеће формуле за коју је претходно потребно одредити меродавно време трајања кише и време кашњења слива.

$$T_p = \frac{T_k}{2} + t_p$$

Време опадања хидрограма добија се на основу времена пораста хидрограма и коефицијента облика хидрограма K , који је у функцији површине слива и који се одређује на основу дијаграма.

$$T_r = K \cdot T_p$$

Временска база хидрограма се израчунава као збир времена пораста и опадања хидрограма:

$$T_b = T_p + T_r$$

Вршна ордината синтетичког јединичног хидрограма даје вредност протицаја даје вредност протицаја од 1 mm ефективне кише (Ристић, Малошевић, 2011). Након дефинисања временске базе хидрограма могуће је одредити вршну ординату синтетичког јединичног хидрограма применом следеће формуле:

$$q_{max} = \frac{0.56 \cdot A \cdot 1.0}{T_b}$$

q_{max} - вршна (максимална) ордината јединичног синтетичког хидрограма [$m^3 s^{-1} mm^{-1}$]

A – површина слива [km^2]

Максималан протицај Q_{max} представља комбинацију вршне ординате јединичног протицаја, за дато трајање кише и висине ефективних падавина за исто трајање. Вредности q_{max} и P_e не морају бити максималне вредности али њихов производ даје максималан протицај $Q_{max} = q_{max} \cdot P_e$.

На основу дефинисаних временских карактеристика синтетичког јединичног троугаоног хидрограма и израчунатог максималног протицаја, на основу спроведеног поступка оптимизације, могуће је конструисати реални криволинијски хидрограм укупног протицаја. То се постиже трансформацијом синтетичког јединичног троугаоног хидрограма помоћу бездимензионалног SCS јединичног хидрограма (Ристић, Малошевић 2011).

2.2 Метод потенцијала ерозије

Метод Потенцијала ерозије (МПЕ) или колоквијално 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 се примењује као стандардни метод и „инструмент“ 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. Метод полази од аналитичке обраде података о чиниоцима који утичу на ерозију. Коefицијент ерозије (Z) добија се из следећег израза :

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

- Y – реципрочна вредност коefицијента отпора земљишта на ерозију
- Xa – коefицијент уређења слива
- φ – бројни еквивалент видљивих и јасно изражених ерозионих процеса
- I_{sr} – средњи пад слива или ерозионог подручја

У зависности од вредности коefицијента ерозије (Z) проф. Гавриловић категоризовао је ерозионе процесе, где се вредности коefицијента ерозије најчешће крећу од 0,1 – 1,5 и више (Табела 1).

Табела 1. Вредности коefицијента ерозије (Гавриловић С. 1972)

Категорија разорности [Ке]	Јачина ерозионих процеса у кориту и сливу	Тип владајуће ерозије	Коefицијент ерозије [Z]	Средња вредност коefицијента ерозије
I	Екседивна ерозија	дубинска	1.51 и више	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	0.20-0.34	
V	Врло слаба ерозија	трагови ерозије	0.01-0.19 и мање	0.10

2.2.1. Коефицијент отпора земљишта на ерозију (Y)

Коефицијент представља реципрочну вредност коефицијента отпора земљишта на ерозију и зависи од геолошке подлоге, климата и типова земљишта. Анализом геолошких и педолошких карактеристика дефинисан је коефицијент отпора земљишта на ерозију (Y) на истраживаном подручју. Вредности коефицијента Y одређене су експерименталним путем и приказане у табели 2.

Табела 2. Средње вредности коефицијента Y (Гавриловић С. 1972)

Рб	Типови земљишних творевина и средно врсте	Средња вредност коефицијента Y
1	Пескови, шљунак и невезана земљишта	2
2	Лес, туфови, слатине, степска земљишта и сл.	1.6
3	Распаднути кречњаци и лапорци	1.2
4	Серпентинити, црвени пешчари, флишне наслаге	1.1
5	Подзоли и параподзоли, распаднати шкриљци, микашисти, гнајсеви, аргилошкриљци	1
6	Једри и шкриљасти кречњаци, црвенице и хумусно силикатна земљишта	0.9
7	Гајњаче и панинска земљишта	0.8
8	Смонице, ритске оранице и мочварна земљишта	0.6
9	Чернозем и алувијални наноси добре структуре	0.5
10	Голи, компакти еруптиви	0.25

2.2.2. Коефицијент уређења слива (X·a)

Коефицијент уређења слива или њему припадајућег ерозионог подручја, односи се на заштићеност земљишта од утицаја атмосферских чинилаца и ерозије. Овај коефицијент се састоји од два фактора, од првобитне или „неизмењене“ структуре површина („X“) и степена уређености у условима пре и после примене противерозионих радова („a“). Вредности према Гавриловићу приказане су у табели 3 се крећу од 0,05 до 1,0 (Gavrilović, 1972).

Табела 3. Коефицијент уређења слива Ха (Гавриловић С. 1972)

Рб	Услови који утичу на вредност коефицијента Ха	Средња вредност Ха
Слив или подручје пре антиерозионих радова		
1	Потпуно голо, необрадиво земљишта	1
2	Оранице са обрадом низ нагиб	0.9
3	Воћњаци и виногради без приземне вегетације	0.7
4	Планински пашњаци и сувати	0.6
5	Ливаде, детелишта и сличне вишегодишње пољопривредне културе	0.4
6	Деградиране шуме и шикаре са еродираним земљштем	0.6
7	Шуме и шикаре доброг слопа и обраста	0.05
Слив или подручје после антиерозионих радова		
1	Оранице са контурном обрадом	0.63
2	Оранице добре неге и заштићене малчирањем	0.54
3	Контурно појасна обрада са плодоредима	0.45
4	Контурни воћњаци и видогради	0.315
5	Терасирање земљишта ораница, терасе и градони	0.36
6	Затрављивање голих земљишта и мелиорација пашњака и сувати	0.3
7	Израда контурних ровова средње густине	0.24
8	Ретардациони водопутеви, микроакумулације	0.27
9	Обично пошумљавање у јаме или на пруге	0.2
10	Пошумљавање уз израду градона	0.1
11	Уређење корита водотока техничким објектима: канализација, кинете, иградња преграда и сл.	0.7

Табела 4. Коефицијент ф (Гавриловић С. 1972)

Рб	Услови који утичу на вредност коефицијента	Средња вредност коеф. ф
1	Слив или подручје потпуно обухваћено јаружастом ерозијом или урвинским процесима (дубинска ерозија)	1
2	Око 80% слива под браздастом и јаружастом ерозијом	0.9
3	Око 50% слива под браздастом и јаружастом ерозијом	0.8
4	Цео слив под површинском ерозијом: распадине и осулине, нешто мало бразда и јаруга као и јака крашка ерозија	0.7
5	Цео слив под површинском ерозијом али без видљивих дубинских процеса	0.6
6	Земљиште са 50% површине обухваћено са површинском ерозијом док је остали део слива очуван	0.5
7	Земљиште са 20% површине обухваћено са површинском ерозијом, док је 80% слива очувано	0.3
8	Земљиште у сливу без видљивих трагова ерозије али у коритима водотока има мањих одрона и клижења	0.2
9	Слив без видљивих трагова ерозије али претежно под ораницама	0.15
10	Подручје или слив без видљивих трагова ерозије као у сливу тако и у кориту водотока, али претежно под шумама или вишегодишњом вегетацијом	0.1

2.2.3. Коефицијент видљивих и јасно изражених ерозионих процеса (ϕ)

Коефицијент ϕ представља бројни еквивалент видљивих и јасно изражених ерозионих процеса ерозије у сливу. Вредности фактора ϕ се крећу од 0,1 за подручја без видљивих трагова ерозије до 1,0 односно за подручја која су захваћена дубинском ерозијом (Табела 4).

2.2.4. Средњи нагиб терена (I_{sr})

Последњи члан у овој формули је квадратни корен из средњег пада слива, односно ерозионог подручја или парцеле земљишта за коју се одређује коефицијент ерозије (Z).

2.2.5. Продукција наноса

Метод Потенцијала ерозије узима у разматрање шест фактора: геолошке карактеристике, педолошке карактеристике, начин коришћења земљишта, коефицијент видљивих трагова ерозије, климатске чиниоце (средња годишња температура и средње годишње падавине) и топографски фактор. На основу ових фактора, добијен је аналитичког израза за прорачун укупне продукције ерозионог материјала на једном природном сливу, гравитационом подручју или делу слива:

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

W_{god} – укупна продукција ерозионог материјала на сливу [$m^3 \cdot god^{-1}$]

T – температурни коефицијент подручја

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

π – 3,14

Z – коефицијент ерозије

A – површина сливног подручја [km^2]

Поред укупне продукције ерозионог материјала која се изражава по m^3 годишње, може да се израчуна и по $1 km^2$ слива односно ерозионог подручја.

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

W_{godsp} - специфична годишња продукција ерозионог материјала на сливу [$m^3 \cdot km^{-2} \cdot god^{-1}$]

Температурни коефицијент подручја се израчунава према формули:

$$T = \sqrt{\frac{t + 1}{10}}$$

t_{sr} – просечна годишња температура ваздуха на сливу [$^{\circ}C$]

Према формули, основни улазни параметар представља средња годишња температура ваздуха (t_{sr}) на сливу, гравитационом подручју или делу слива изражена у

Целзијусовим степенима [°C]. За истраживано подручје добија се на основу метода интерполација.

Средња годишња количина падавина (H_{god}) изражена је у милиметрима и добија се на основу метеоролошких станица која се налазе на истраживаном подручју. Средња годишња количина падавина на истраживаном подручју добија се методом интерполација.

2.2.6. Пренос наноса

Познато је да нанос произведен ерозионим процесима у сливу, не доспева у целокупној количини до најниже тачке слива. Знатан део наноса остаје по депресијама и увалама или на заравњеним деловима. На основу тога, формиран је израз који изражава степен ретенције (задржавање) ерозионог материјала. Помоћу коефицијента ретенције издваја се продукција односно производња ерозионог наноса у сливу од просечне годишње запремине наноса која доспева до одређеног хидрометријског профила. Коефицијент ретенције (задржавање), или према неким ауторима назива се још и коефицијент ретардације (закашњавања) протицаја наноса или коефицијент транспорта наноса (Gavrilović 1972) представља израз за редукацију продукције ерозионог материјала и дефинише количина материјала која доспева до хидрографске мреже. Коефицијент ретенције ерозионог материјала зависи од физичко-географских карактеристика слива и добија се према изразу:

$$R_u = \frac{(O \cdot D)^{0,5}}{0,25 \cdot (L + 10)}$$

R_u – коефицијент ретенције наноса на сливном подручју

O – обим слива [km]

L – дужина слива по главном току [km]

D – средња висинска разлика слива [km]

Након добијеног коефицијенте ретенције R_u и множењем његове вредности са укупном годишњом продукцијом ерозионог материјала добија средња годишња запремина укупних количина вунених и суспендованих наноса, која доспева до ушћа слива односно хидрометријског профила.

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

G_{god} – укупна количина вученог и суспендованог ерозионог материјала (наноса) на сливу [$m^3 \cdot god^{-1}$]

Поред средње годишње запремине наноса која се изражава по m^3 годишње, може да се израчуна и по $1 km^2$ слива односно ерозионог подручја.

$$G_{godsp} = T \cdot H_{god} \cdot \pi \cdot \sqrt{Z^3} \cdot R_u$$

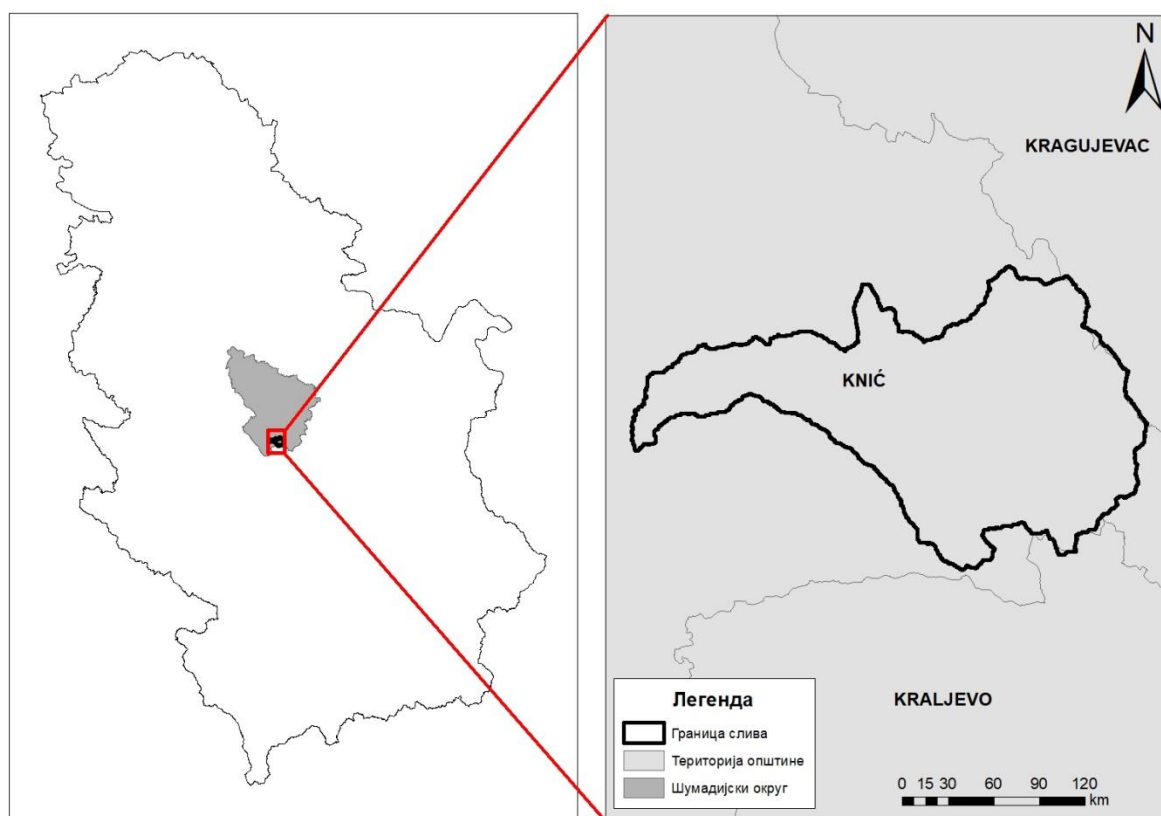
G_{godsp} – специфични годишњи пронос ерозионог материјала (вученог и суспендованог наноса) на сливу [$m^3 \cdot god^{-1} \cdot km^{-2}$]

3. Материјал рада

За потребе овог рада, анализирани су хидролошко-псамолошки ефекти противерозионих радова на примеру Честинске реке.

3.1. Географски положај истраживаног подручја

Слив Честинске реке налази се у централној Србији у Шумадијском округу и захвата површину од 26,67 km². Територијално сливно подручје у целости припада територији општине Кнић а окружу га општине Крагујевац и Краљево (Слика 1). Слив је издуженог облика и шири се од ушћа према изворишту. Честинска река је лева притока Груже и припада водотоцима II реда. Дужина главног тока реке износи 12,76 km и одликује се изразитом бујичношћу. Слив је испресецан јаругама и вододеринама које у сезонама киша постају притоке носећи са собом сав еродирани материјал у корито самог водотока. Најзначајније притоке су Кречански поток и Мала река.



Слика 1. Географски положај истраживаног подручја (извор:аутор)

3.2. Климатски услови на истраживаном подручју

Истраживано подручје одликује се умерено-континенталном климом са израженом релативно хладном зимом и топлим летима. Најхладнији месец је јануар, а најтоплији јун док су мај и јун месеци са највише падавина, а најмање их има у јануару, фебруару и марту. Средња годишња температура износи 11,3 °C а сума годишњих падавина 625 mm. Најчешће дувају југозападни и северозападни ветрови, а у периоду јануар-март и југоисточни (кошава). Просечан број дана са снегом износи 30, маглом 20, а градом 2 дана (<https://www.hidmet.gov.rs/>).

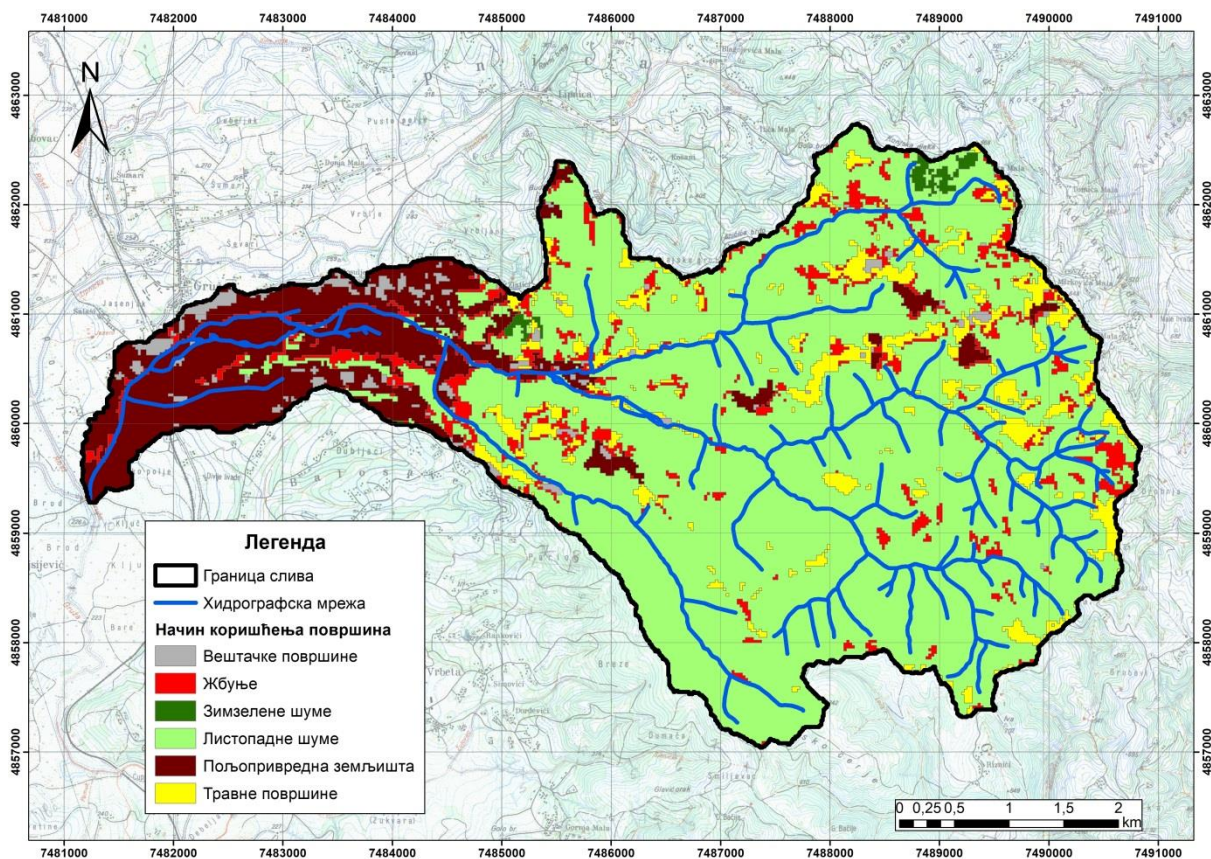
3.3. Подаци о земљишном покривачу

Земљишни покривач и намена површина представљају динамичке факторе који се мењају под утицајем социјалних и био-физичких елемената (Karsidi, 2004). Неадекватан начин коришћења земљишта услед све интензивнијег антропогеног притиска значајно убрзава ерозионе процесе (Cantón et al., 2011).

Постојећа структура површина (начин коришћења земљишта) на сливу Честинске реке је представљена у табели 5. Типологија начина коришћења земљишта је детерминисана на основу анализе сателитског снимка. На основу добијених резултата процентуално највећи део слива је покривен шумом 70%, пољопривредне површине заузимају 14% док травнате површине и жбуње суделују са по $\approx 7\%$. На слици 2 приказана је просторна расподела површина у зависности од начина коришћења земљишта. Вршни делови слива су обрасли шумском вегетацијом док је у средишњем а нарочитом у доњем делу слива доминантна пољопривредна производња.

Табела 5. Начин коришћења земљишта на истраживаном подручју

Ред.бр.	Начин коришћења земљишта	km ²	%
1	Вештачке површине	0,54	2,01
2	Пољопривредна земљишта	3,77	14,13
3	Травнате површине	1,85	6,93
4	Жбуње	1,80	6,77
5	Листопадне шуме	18,57	69,64
6	Четинарске шуме	0,14	0,52
Укупно		26,67	100



Слика 2 . Начин коришћења површина на истраживаном подручју (извор: аутор)

3.4. Заступљеност типова земљишта

Према коришћеној педолошкој карти размере 1: 50.000 (листови Чачак 2, Крушевац 1 и Аранђеловац 4, Институт за проучавање земљишта, Топчидер – Београд, 1963), на истраживаном сливном подручју издвојени су типови земљишта, који су представљени у табели 6. На слици 3 приказана је просторна расподела типова земљишта заступљених на истраживаном подручју.

Табела 6. Типови земљишта на истраживаном подручју

Ред.бр.	Тип земљишта	km ²	%
1	Скелетоидно земљиште	14,50	54,38
2	Гајњача плитка	2,86	10,73
3	Скелетоидно и скелетно земљиште на шкриљцима	6,19	23,23
4	Алувијални нанос иловести	1,74	6,54
5	Смоница	1,37	5,13
Укупно		26,67	100,00

3.4.1. Скелетно и скелетоидно земљиште

Називају се и сирова каменита земљишта, резидуална скелетна земљишта. У оваквим земљиштима преовладава фракција камена. Ово су земљишта планинских области где

су ниске температуре главни фактор механичке дезинтеграције стена. Образују се на нагибима али такође и на заравњеним формама рељефа тврдих стеновитих масива. Ова земљишта се образују на стенама које у процесу механичког распадања дају каменити детритус (перидотитско-серпентинске стене). Такав детритус остаје на месту постанка само на заравњеним теренима, док се на нагнутим теренима гравитационо премешта у виду сипара (точила).

Грађа профила ових земљишта је (А) – С . Доминација фракције камена даје основни печат физичким особинама камењара. Он се одликује екстремном пропустљивошћу за воду и готово потпуном неспособношћу задржавања воде. Због минималног контакта са течном фазом, хемијски процеси везани за чврсту фазу су крајње редуковани, па стога разлике у минералном и хемијском саставу супстрата (С хоризонта) не долазе до изражаја.

Дубина ових земљишта варира, зависно од места образовања. На заравњеним теренима су плића (10-20 cm), а на падинама, услед гравитационог премештања, може доћи до акумулације знатно дубљих слојева (сипари). Оваква земљишта су екстремно сува станишта која су изложена јаком загревању. Неповољна су за развој кореновог система, а на сипарима су биљке изложене и механичким повредама. Могуће је укоренавање ксеротермних врста и врста отпорних на механичке повреде. Сиромашна су хранивима (Ђорђевић и сар., 2011).

3.4.2. Алувијална земљишта (Флувисол)

Алувијална земљишта се налазе под сталним утицајем подземних и поплавних вода које са собом доносе различити педогенетски материјал почев од врло финих честица па до грубог песка или шљунка (Антић и сар., 2007). Настаје услед непрестаног таложења свежих суспензија нема развијен хумусни хоризонт, а процеси редукције су слабо испољени или потпуно одсуствују у профилу. Хидролошки режим реке и природа материјала који се таложи условљавају образовање флувисола и њихове особине. Образују се у приобалном делу речне плавне терасе где се у већој мери таложи грубљи материјал. Међутим, како интензитет појединих поплава варира, долази до промене гранулометријског састава наноса. На тај начин се могу један преко другог наталожити разноврсни наноси (нпр. песак преко шљунка), а такође може доћи и до образовања новог наноса преко већ формираних земљишта са хумусним хоризонтом. На флувисолу поплавне воде се најбрже крећу, а после повлачења флувисол се најбрже и најдубље дренира. Подземна вода се налази најчешће на дубини већој од 2 m па из тог разлога у овом земљишту нису изражени процеси редукције. До појаве хипоглејних флувисола може доћи само у депресијама и то нарочито на граници са централном зоном. Физичке особине флувисола зависе од броја слојева, њихове дебљине, гранулометријског састава, хемијског и минералног састава и од узајамног поретка слојева. Међутим њихове еколошке особине зависе у великој мери од режима плављења и режима подземних вода (Ђорђевић и сар., 2011).

3.4.3. Еутрично смеђе земљиште (Гајњача)

Еутрично смеђе земљиште се код нас назива још и гајњачама јер се на њима често налазе делови заосталих листопадних шума (гајева). Еутрично смеђе земљиште се трајно одржава и има највећу распрострањеност у семихумидним областима са средњом годишњом количином падавина 600-700 mm и са израженим летњим сушним периодом. Средња годишња температура је 10-12°C (Антић и сар., 2007).

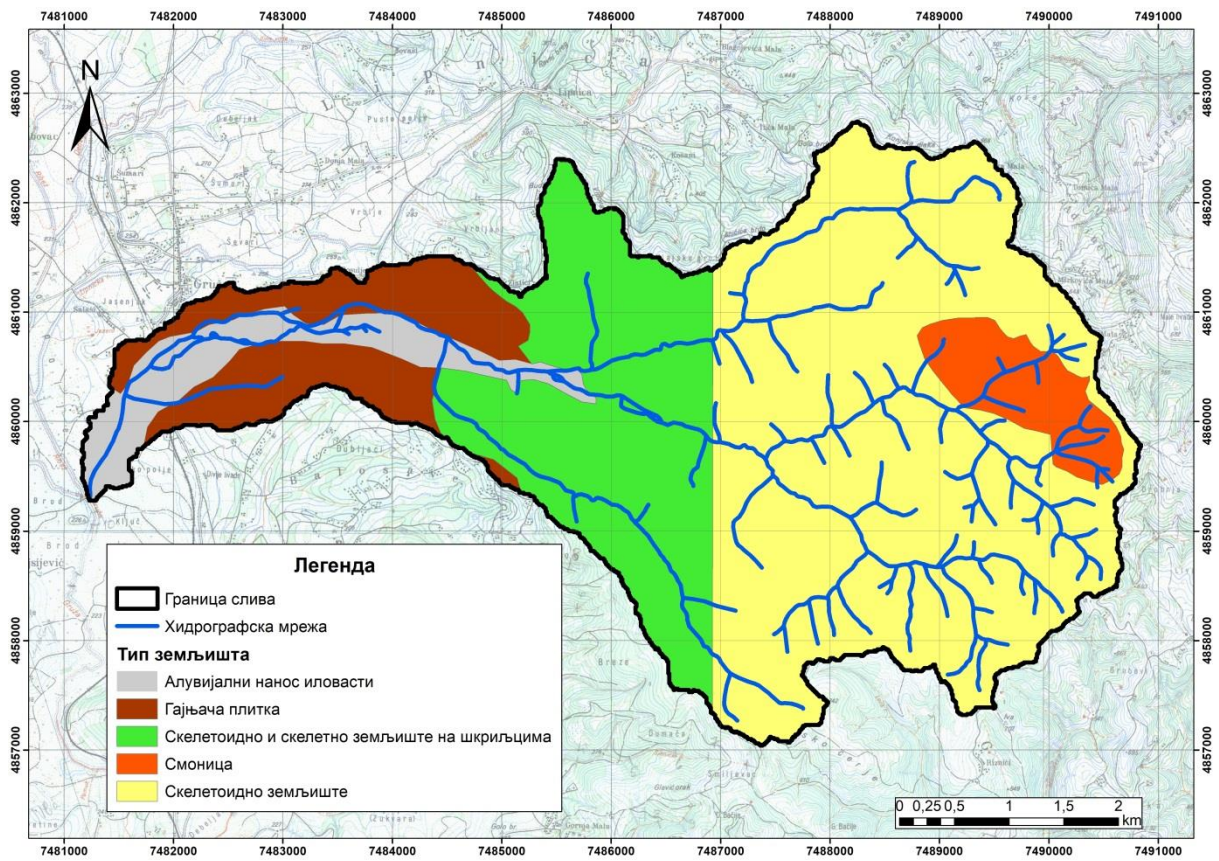
Биоклиматски услови су од великог значаја за образовање гајњача које се сматрају зоналним земљиштима. Ова земљишта се образују на различитим супстратима. Не образују се на екстремно киселим стенама и на тврдим кречњацима. Под утицајем човека су ова земљишта добила многе неповољне особине. Тако је дошло до смањења садржаја хумуса и биогених елемената, нестабилности структурних агрегата, кварења водног и ваздушног режима, а на нагибима је дошло и до ерозије. Гајњаче су најбоља земљишта за воћарску производњу а могу се користити и за ратарске и повртарске културе (Ђорђевић и сар., 2011).

3.4.4. Смоница

Смоница се образује на супстратима који имају више од 30% глине и то претежно монтморионитског типа, најчешће на терцијерним језерским глинама, богатим монтморионитом и кречњаком (лапоровите глине, карбонатни глиненни аргилошисти), на елувијуму (дробина) неких базичних стена које при распадању дају пуно монтморионита (базалт, габро, амфиболит, дијабаз, серпентин) и преко вулканског туфа и пепела. Други важан предуслов образовања смоница је клима која се карактерише смењивањем влажног и сувог периода.

Образовању смоница одговара равничарски или благо таласаста рељеф, јер условљава смањену спољашњу дренажу, што је значајно за образовање смоница. На надморској висини од 200 до 900 m, али најчешће у областима 200-600 m, тј. у котлинама у којима су се таложиле fine језерске глине. Типичне смонице су земљишта са А-АС-С грађом профила. То су дубока земљишта, чија дубина може бити већа од 150 cm (Ђорђевић и сар., 2011).

Главна карактеристика механичког састава смонице је велики садржај глине и колоида. Типична смоница садржи између 50 и 70%, а понекад и више „физичке глине“ (честица мањих од 0.02 mm) и претежно више од 40% колоидне глине (<0.002 mm). Спадају у класу глинуша и тешких глинуша. Дуги влажни периоди су неповољни због стварања анаеробних услова и могућности појачане ерозије, пошто је у јако влажном стању инфилтрациона способност смоница веома мала. Равномерно и умерено влажење даје најбоље услове за искоришћавање великог производног потенцијала смоница. (Ђорђевић и сар., 2011).



Слика 3. Педолошки састав истраживаног подручја (извор: аутор)

4. Планирани радови на сливу Честинске реке

Пројектна решења санационих мера треба да обезбеде брзу и сигурну евакуацију великих вода и наноса на предметном подручју, у складу са хидролошко-хидрауличким условима, у дефинисаним просторним границама. Основни циљ уређења корита Честинске реке је заштита од великих вода односно да се обезбеди пропусна моћ регулисаног корита за меродавни рачунски протицај и обезбеди стабилност обала.

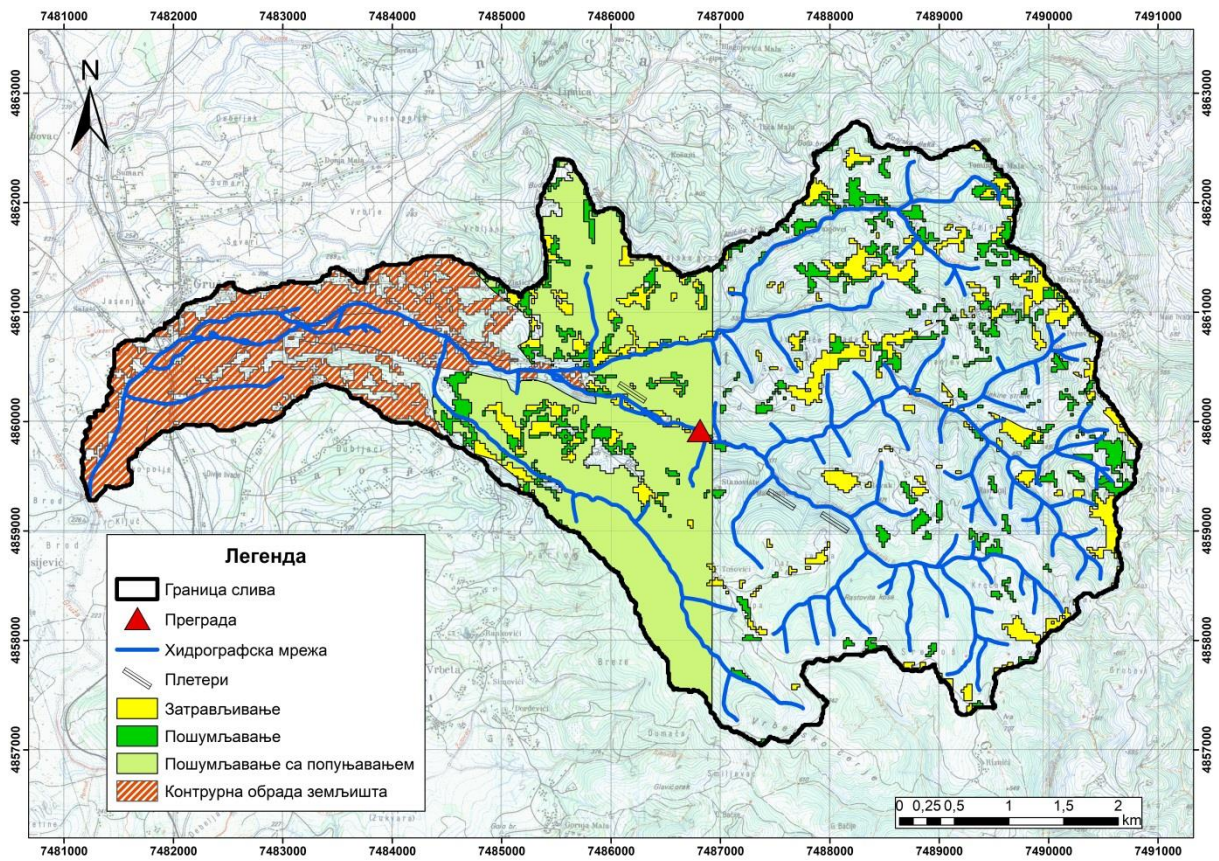
Техничким радовима предвиђена је изградња једне бујичарске преграде која првенствено служи за консолидацију корита и за задржавање наноса у циљу елиминисања даљег продубљавања корита, смањења количине вученог наноса и заштите од засипања пољопривредног земљишта у самој околини. За потребе пројектовања бујичних преграда, урађени су хидролошки, хидраулички и статички прорачуни, као и сва потребна геодетска снимања локације. Такође је урађена и геолошка перспекција терена у циљу утврђивања геолошког састава терена на третираној деоници.

Биотехничким радовима је предвиђено побољшање инфилтрационо–ретенционих карактеристика земљишта на нагибима, подизање попречних објеката у кориту повремених токова и јаруга, притока другог и трећег реда Честинске реке, у циљу заустављања наноса, стабилизације корита и обала. Ово се обезбеђује изградњом система једноструких и двоструких плетера.

Израда плетера, поготово у систему, делује на заустављање ерозионог материјала, односно, формирање заплава који има мањи пад од првобитног нагиба дна јаруге (или повремених водотока). Заустављени материјал, у коме има доста храњивих материја (ерозиони продукти), веома брзо обраста аутохтоном вегетацијом, чиме започиње процес трајне стабилизације.

Биолошким радовима предвиђено је пошумљавање и затрављивање на еродираним површинама. Врсте које ће се користити одговарају локалним условима терена. Промене у начину коришћења извршене су на теренима прекривеним жбунастим врстама на вишим надморским висинама где је пошумљено 5,4% сливног подручја. Пошумљавање са попуњавањем извршено је на деградираним листопадним шумама које заузимају 18,26%. Затрављивање деградираних пашњака и ливада изведено је на површинама које заузимају 6,83% слива Честинске реке.

Примена административних мера обухвата проглашење ерозионих подручја на сливу Честинске реке и израду планова за одбрану од бујичних поплава. Административним мерама забране, прописана је забрана кресања лисника и забрана испаше на еродираним површинама. Административним мерама прописана је и контурна обрада на површини 3,32 km² у средишњем и доњем делу слива Честинске реке.



Слика 4. Карта предвиђених радова на сливу Честинске реке

5. Резултати истраживања

5.1. Физичко – географске карактеристике слива Честинске реке

На основу топографске карте R 1:25000 одређене су физичко-географске карактеристике слива потребне за прорачуна великих вода. У табели 7 су дате основне физичко-географске карактеристике сливног подручја Честинске реке.

Табела 7. Физичко-географске карактеристике слива Честинске реке

	Параметар	Ознака	Вредност	Јединица
1	Површина слива	F	26,67	km ²
2	Обим слива	O	41,4	km
3	Кота на вододелници по правцу хидраулички најдужега тока	K _v	674	mnm
4	Најнижа тачка на сливу	K _u	225	mnm
5	Дужина слива по главном току	L	12,76	km
6	Одстојање од тачке у речном кориту, која је најближа тежишту слива, до излазног профила	L _c	7,7	km
7	Апсолутни пад (нагиб) корита	I _a	3,52	%
8	Уравнати пад корита	I _u	1,85	%
9	Средњи нагиб терена на сливу:	I _{sr}	29,75	%
10	Средња надморска висина слива	H _{sr}	462,04	mnm
11	Средња висинска разлика	D	237,04	m
12	Густина хидрографске мреже	G	2,33	km·km ⁻²

Слив је издуженог облика и има правац пружања исток – запад, са површином од 26,67 km² и обимом од 41,4 km. Горњи део слива карактеристише разграната и густа хидрографска мрежа. Слив одликује густина хидрографске мреже $G > 2 \text{ km/km}^2$ што је сврстава у категорију веома велике густине хидрографске мреже (Костадинов, 2008). Дужина слива по главном току износи 12,76 km, а сам ток на пар деоница пролази кроз узану зону оивичену стрмим падинама. Терен одликују врлетне падине на изворишту са нагибима преко 45% док идући према ушћу терен постаје блажи и скоро раван на самом ушћу у реку Гружу. Средњи нагиб на сливу износи 29,75% .

5.2. Резултати прорачуна SCS

Прорачун максималног протицаја је обављен применом комбиноване методе која обухвата теорије синтетичког јединичног хидрограма за одређивање вршне ординате јединичног протицаја као и SCS методологије за раздвајање ефективних од укупних падавина (Chang, 2003).

Максимална дневна киша одређене вероватноће појаве $H_{(24h,P)}$ се добија обрадом података са најближе кишомерне станице (издвајањем дневних максималних падавина за читав период рада станице и применом неке од теоријских функција расподеле вероватноћа). Примењена је Log Pearson Type III расподела, а приликом одређивања максималног протицаја сматра се да он има исту вероватноћу појаве као и киша која га је изазвала. Максимална дневна киша одређене вероватноће појаве $H_{(24h,P)}$ одређена је на основу обраде података осматрања са следећих кишомерних станица (К.С.): Рудник, Катрга, Краљево, Закута, Крагујевац и Чумић, генерисан је јединствен низ, помоћу кога је детерминисана рачунска киша. Висина рачунске кише вероватноће појаве 1% износи $H_{1\%} = 108,11 \text{ mm}$.

5.2.1. Хидролошки резултати на сливу Честинске реке пре извођења противерозионих радова

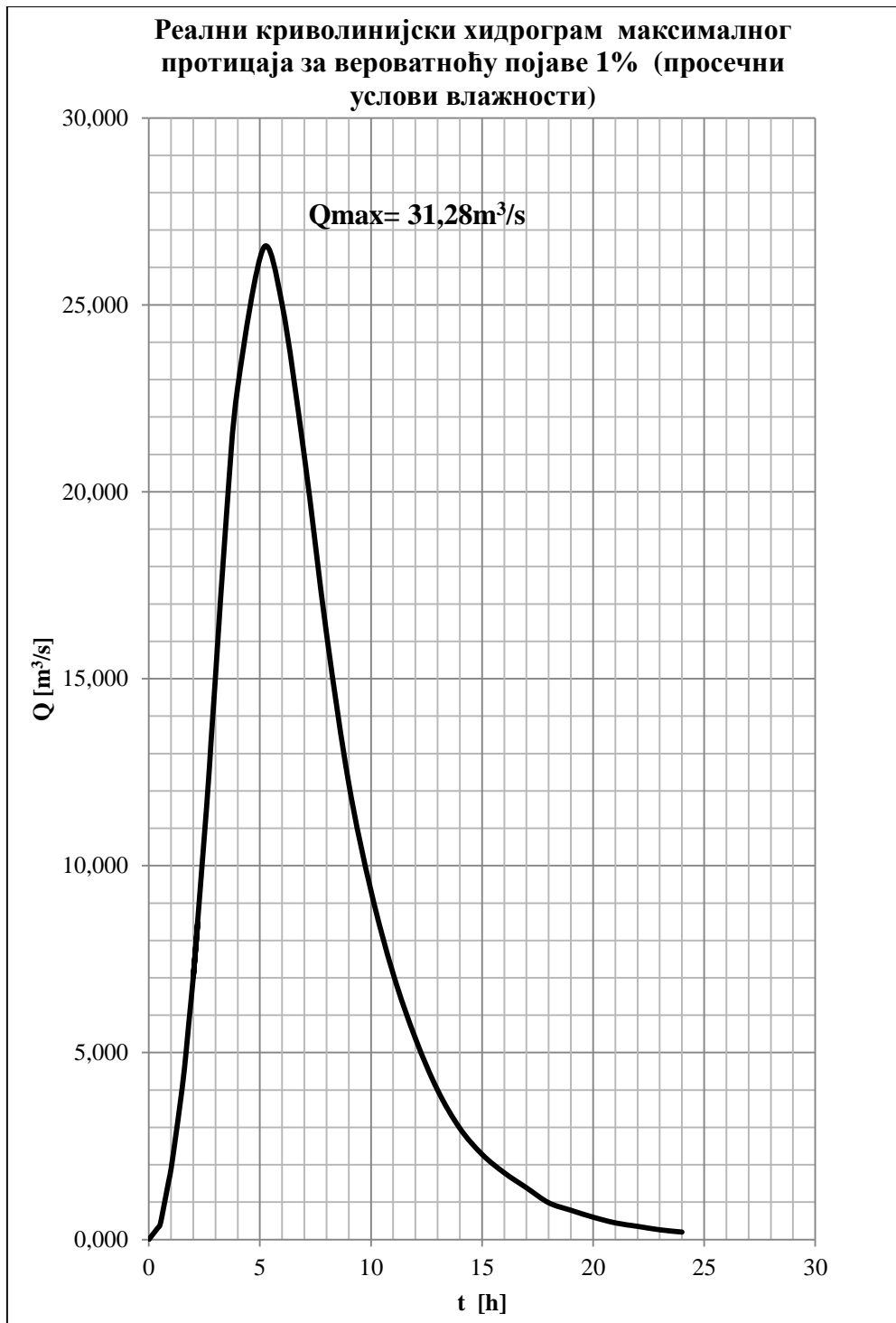
Вредност CN за слив Честинске реке пре извођења противерозионих радова износи $CN_{sr}=73$ и одређен је на основу начина коришћења земљишта у сливу, типа земљишта односно хидролошке класе земљишта (A, B, C, D) и хидролошких услова на сливној површини. Коришћењем комбинованог метода за прорачун максималног протицаја конструисан је јединични синтетички троугаони хидрограм за просечне услове влажности на основу података у прилогу 1. Увидом у прилог 1 уочава се да је максимални протицај за пресечне услове влажности, вероватноће појаве 1% достигнут за $\approx 3\text{h } 30\text{min}$.



Слика 5. Синтетички јединични троугаони хидрограм за просечне услове влажности пре изведених радова (извор: аутор)

Максимални протицај вероватноће појаве $p=1\%$ за просечне услове влажности износи $Q_{\max(1\%)} = 31,28 m^3/s$.

Трансформација троугаоног синтетичког јединичног хидрограма у реалан криволинијски хидрограм изведена је на основу SCS бездимензионалног јединичног хидрограма.



Слика б. Реални криволинијски хидрограм за просечне услове влажности пре изведених радова (извор: аутор)

Напросечни услови влажности се јављају у условима високе или потпуне сатурације земљишта водом што за последицу има формирање површинског отицаја. Овакви услови су карактеристични за период године са интензивним падавинама или се јављају након наглог отапања снега услед чега је инфилтрационо ретенциони капацитет земљишта значајно смањен.

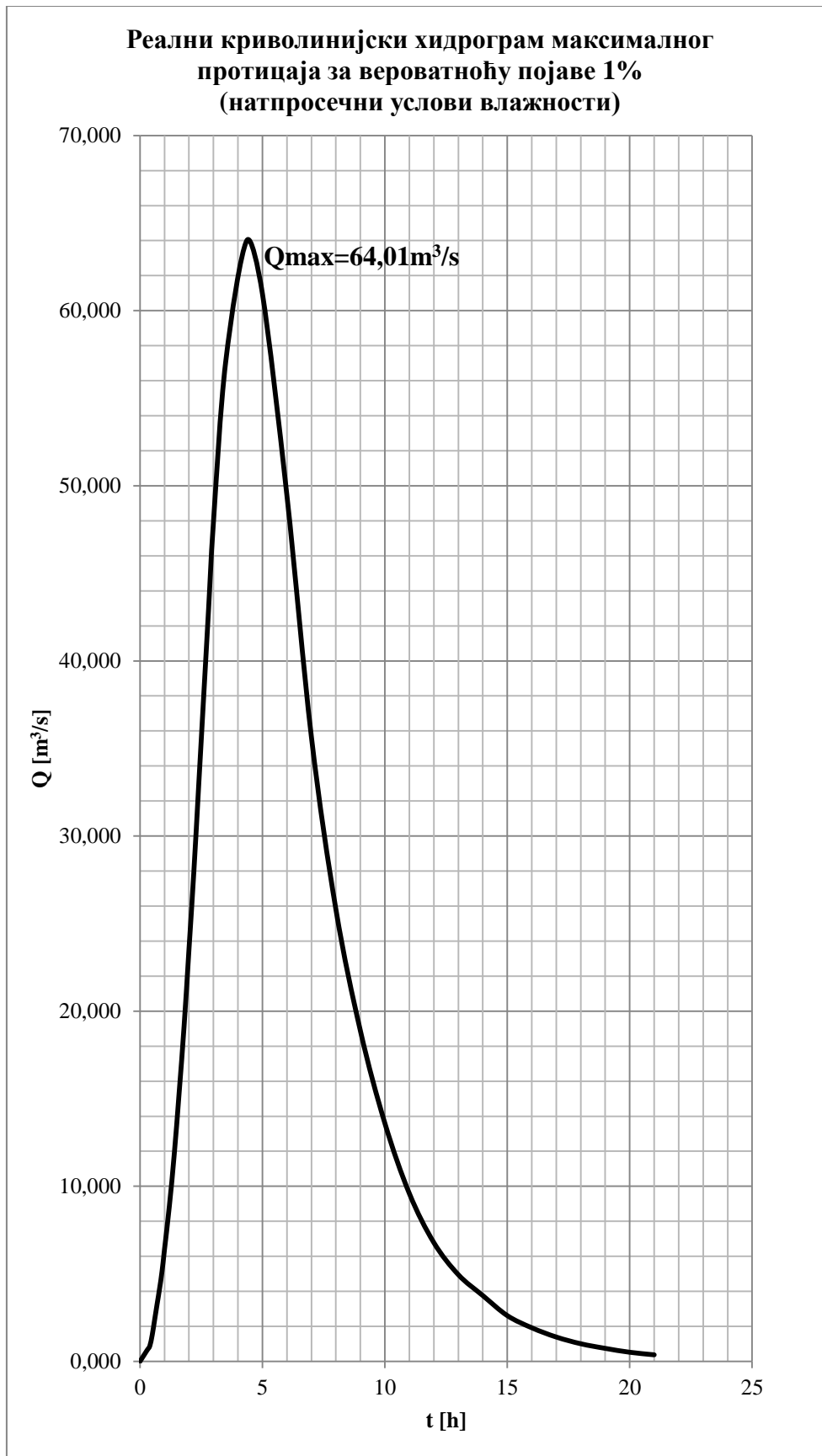
Коришћењем комбинованог метода за прорачун максималног протицаја конструисан је јединични синтетички троугаони хидрограм за натпросечне услове влажности на основу података у прилогу 2. Увидом у прилог 2 уочава се да је максимални протицај за пресечне услове влажности, вероватноће појаве 1% достигнут за $\approx 2\text{h } 24\text{min}$.



Слика 7. Синтетички јединични троугаони хидрограм за натпросечне услове влажности пре изведених радова (извор: аутор)

Максимални протицај вероватноће појаве $p=1\%$ за натпросечне услове влажности износи $Q_{\max(1\%)} = 64,01 \text{ m}^3/\text{s}$.

Трансформација троугаоног синтетичког јединичног хидрограма у реалан криволинијски хидрограм изведена је на основу SCS бездимензионалног јединичног хидрограма. На слици 8. приказан је реални криволинијски хидрограм максималног протицаја, вероватноће појаве 1% за натпросечне услове влажности.



Слика 8. Реални криволинијски хидрограм за натпросечне услове влажности изведених радова (извор: аутор)

пре

5.2.2. Хидролошки резултати на сливу Честинске реке после извођења противерозионих радова

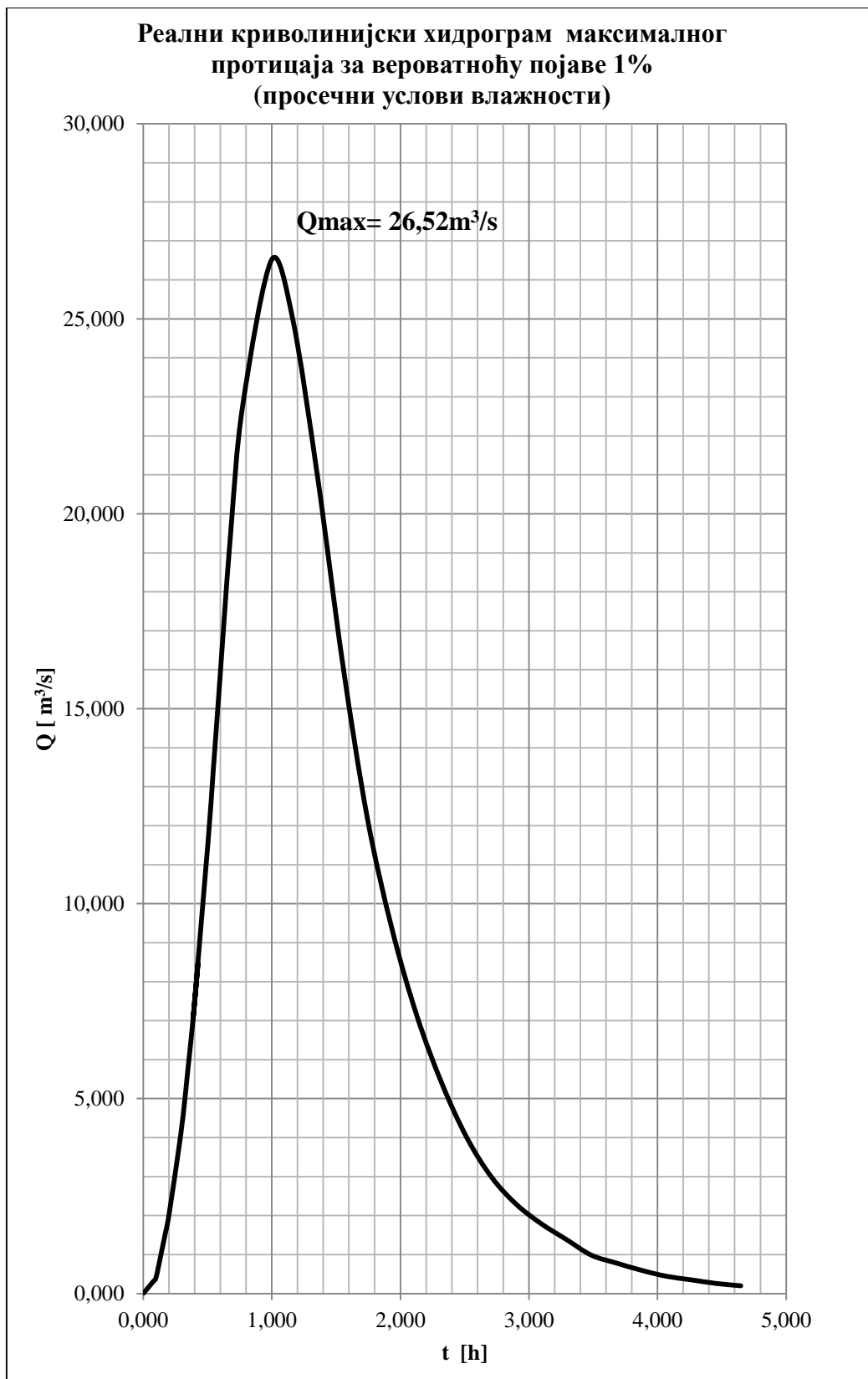
Применом одговарајућих мера и радова на сливу Честинске реке дошло је до побошљавања инфилтрационо-ретенционих карактеристика земљишта што је резултирало променом вредности CN . Након изведених противерозионих радова вредност CN за слив Честинске реке је смањена и износи $CN_{sr}=70$.

У прилогу 3 дати су подаци на основу којих је израђени хидрограми приказани на сликама 9,10.



Слика 9. Синтетички јединични троугаони хидрограм за просечне услове влажности након изведених радова (извор: аутор)

На основу прорачуна уочава се да је максималан протицај за просечне услове влажности вероватноће појаве $p = 1\%$ достигнут за ≈ 4 h. Максимални протицај вероватноће појаве $p=1\%$ за просечне услове влажности износи $Q_{max(1\%)} = 26,52 m^3/s$.

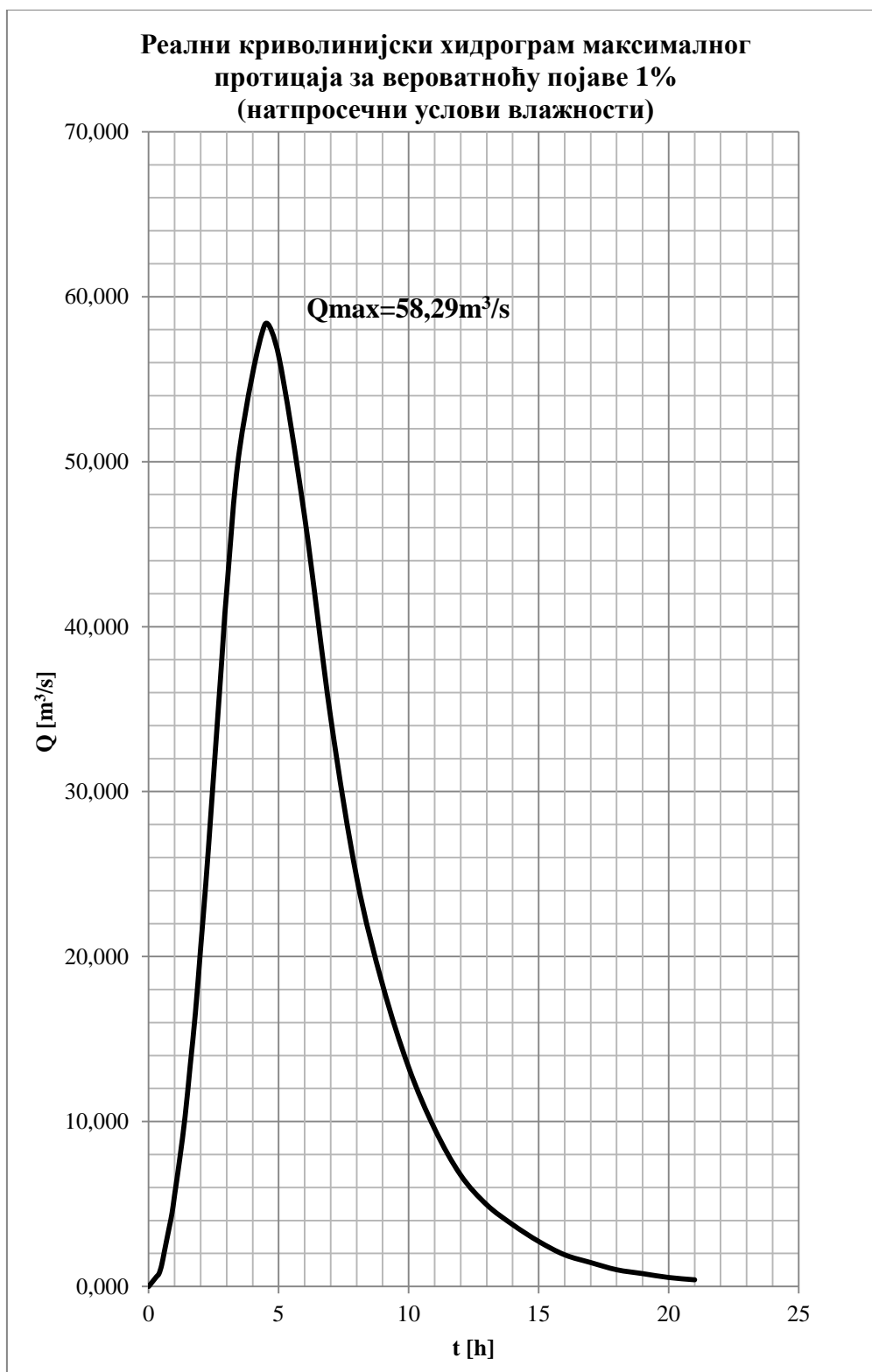


Слика 10. Реални криволинијски хидрограм за просечне услове влажности након изведених радова (извор: аутор)

У прилогу 4 дати су подаци на основу којих је израђени хидрограми приказани на сликама 11,12.



Слика 11. Синтетички јединични троугаони хидрограм за натпросечне услове влажности након изведених радова (извор: аутор)

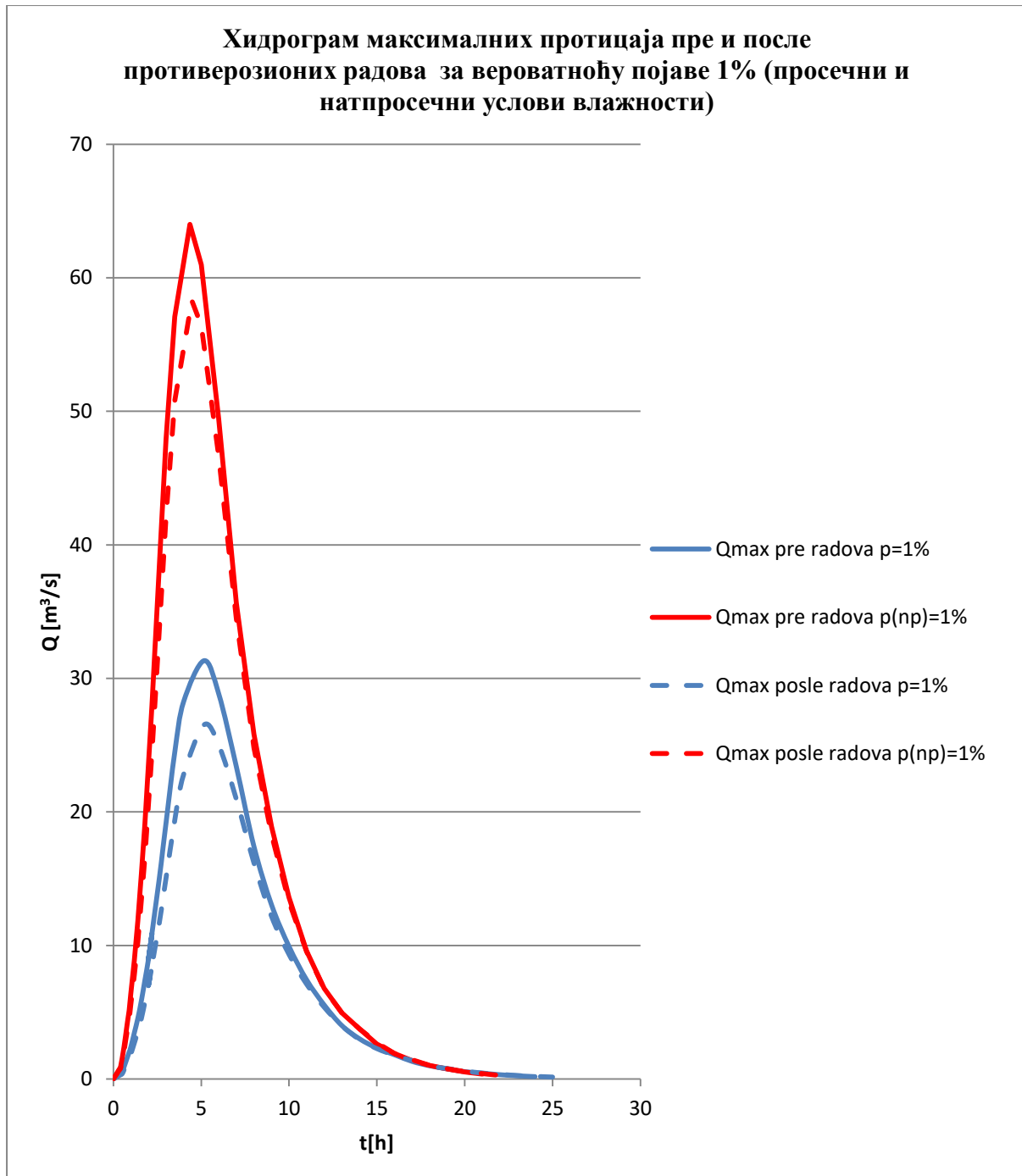


Слика 12. Реални криволинијски хидрограм за натпросечне услове влажности након изведених радова (извор: аутор)

На слици 13 приказан је збирни хидрограм максималних протицаја за вероватноћу појаве $p=1\%$, за подручје Честинске реке. Хидрограми максималних протицаја су урађени за период пре и након изведених противерозионих радова, за просечне и

натпросечне услове влажности. Промене коришћења земљишта ће утицати на временске карактеристике хидрографа (Ристић, 2006).

Пре изведених радова протицај за просечне услове влажности износио је $Q_{\max} = 31,28 \text{ m}^3/\text{s}$ док је након предузетих мера и радова протицај за просечне услове влажности износио $Q_{\max} = 26,52 \text{ m}^3/\text{s}$ што је за $4,76 \text{ m}^3/\text{s}$ мање.



Слика 13. Збирни хидрограм максималних протицаја (извор: аутор)

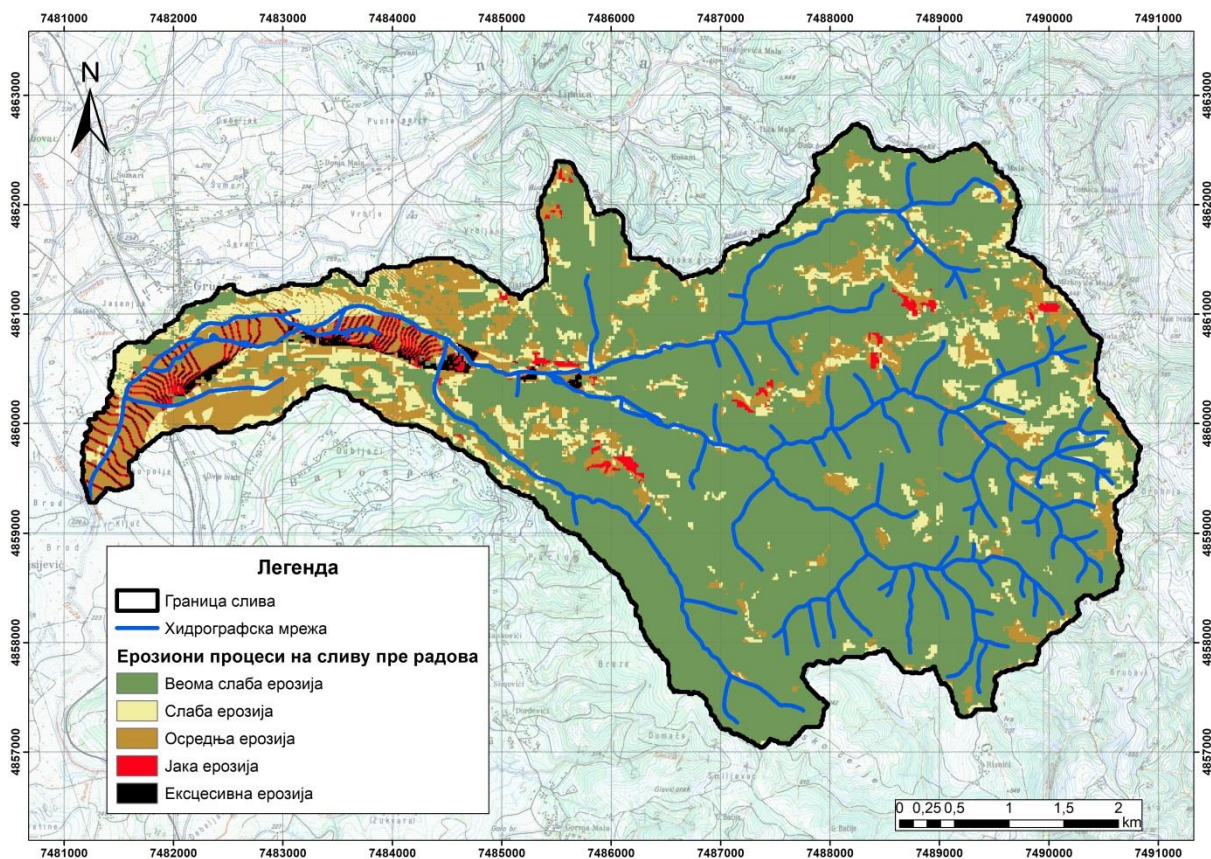
5.3. Резултати прорачуна МПЕ

Ерозија земљишта је природан процес и представља један од доминантних узрока деградације земљишта. За потребе предметног истраживања коришћен је метод потенцијала ерозије (МПЕ). Метод потенцијала ерозије је већ 50 година саставни део инжењерско-пројектанске праксе у Републици Србији, која се бави заштитом земљишта и уређењем бујица. Клима, литологија, топографија, земљиште и нарочито интензивне промене у начину коришћењу, чине истраживано подручје, односно слив Честинске реке, веома осетљивим на стварање површинског отицаја и ерозију земљишта. У табели 8 приказани су резултати коефицијента Z пре изведених противерозионих радова као и процентуална заступљеност ерозије на сливном подручју. Вредности коефицијента Z у оквиру истраживаног подручја крећу се од 0 до 1,55, док је просечна вредност 0,17 што сврстава у категорију врло слабе ерозије. Највеће просечне вредности коефицијента Z јављају се на подручјима са интензивном пољопривредом где доминирају ерозиони процеси из категорије осредње ерозије а мозајично се јављају и подручја из категорије јаке до екцесивне ерозије. Најмање просечне вредности се јављају на површинама које су покривене четинарским и лишћарски шумама и припадају категорији врло слабе ерозије.

Годишња продукција ерозионог материјала на истраживаном подручју, процењена је коришћењем МПЕ модела. Параметри МПЕ модела који се користе за одређивање годишње продукције ерозионог материјала су одређени помоћу GIS софтвера. Вредност годишње продукције ерозионог материјала на истраживаном подручју пре изведених радова износи $W_{\text{god}} = 1.947,63 \text{ m}^3/\text{god}$. Средња годишња продукција ерозионог материјала на истраживаном подручју износи $W_{\text{godsp}} = 73,03 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$ што одговара врло слабој ерозији. Годишњи пронос ерозивног материјала одређен је на основу МПЕ и износи $G_{\text{god}} = 1067,65 \text{ m}^3/\text{god}$ док вредност специфичног годишњег проноса износи $G_{\text{godsp}} = 40,03 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$.

Табела 8. Вредност коефицијента ерозије Z пре извођења радова

Рб	Јачина ерозионих процеса у сливу	Категорија разорности	Површина [km ²]	Површина [%]
1	Врло слаба ерозија	V	19,27	72,27
2	Слаба ерозија	IV	3,04	11,38
3	Осредња ерозија	III	3,57	13,38
4	Јака ерозија	II	0,51	1,90
5	Екцесивна ерозија	I	0,29	1,07
	Укупно:		26,67	100,00

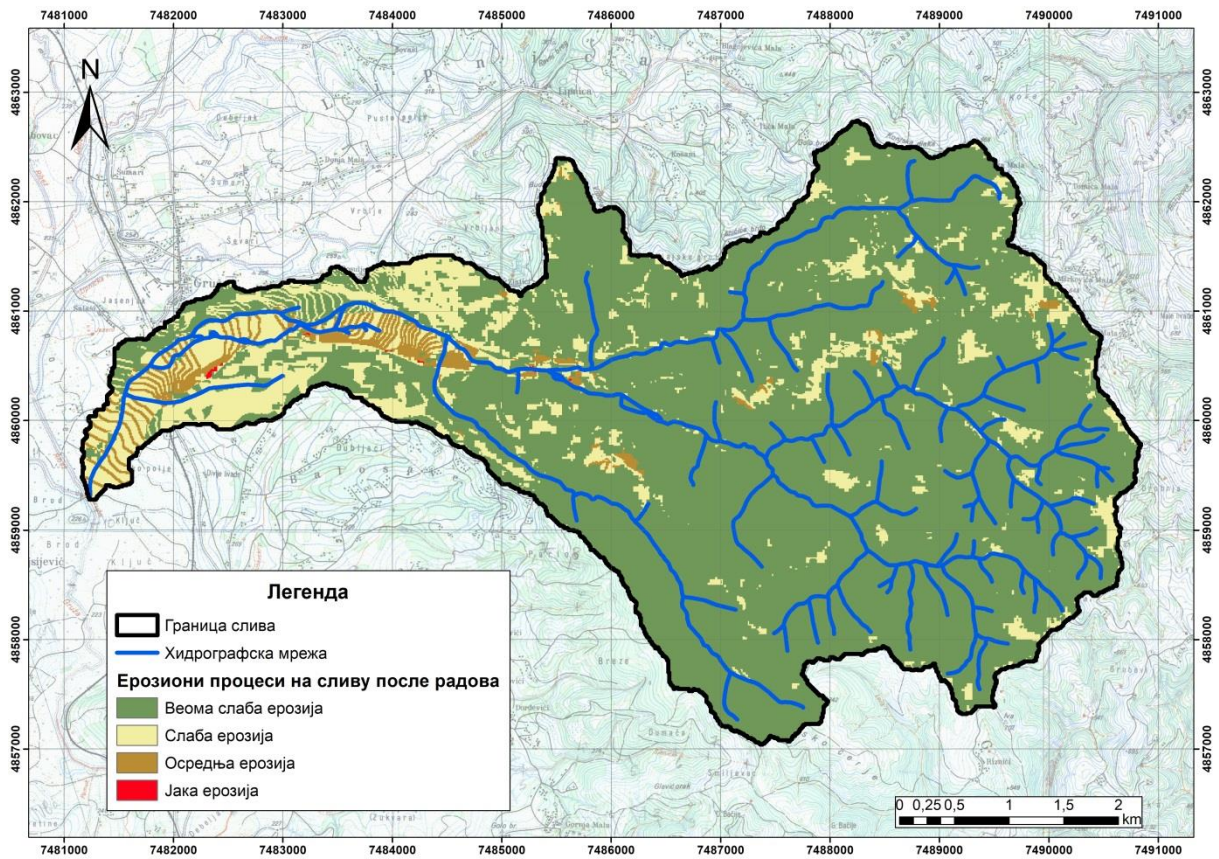


Слика 14. Карта ерозије пре изведених радова (извор:аутор)

Након примене административних мера и изведених техничких, биотехничких и биолошких радова стање ерозије изгледа потпуно другачије. Вредности коефицијента ерозије Z се сада креће границама 0 до 0,87, док је просечна вредност 0,10. Највећи део слива 83,03 % је захваћен врло слабом ерозијом док се јака ерозија јавља у траговима на свега 0,01 km² површине. Распрострањеност ерозије на сливу приказана је на слици 15 где се уочава да ерозиони процеси доминирају у доњем делу слива. Вредност годишње продукције ерозионог материјала на истраживаном подручју након изведених радова износи 878,68 m³/god. Средња годишња продукција ерозионог материјала на истраживаном подручју износи 32,95 m³·km⁻²·god⁻¹ што одговара врло слабој ерозији. Годишњи пронос ерозивног материјала одређен је на основу МПЕ и износи G_{god} 481,68 m³/god док вредност специфичног годишњег проноса износи $G_{godsp}=18,06m^3 \cdot km^{-2} \cdot god^{-1}$.

Табела 9. Вредност коефицијента ерозије Z након изведених радова

Рб	Јачина ерозионих процеса у сливу	Категорија разорности	Површина [km ²]	Површина [%]
1	Врло слаба ерозија	V	22,14	83,03
2	Слаба ерозија	IV	3,76	14,09
3	Осредња ерозија	III	0,76	2,84
4	Јака ерозија	II	0,01	0,03
5	Експесивна ерозија	I	/	/
	Укупно:		26,67	100,00



Слика 14. Карта ерозије након изведених радова (извор:аутор)

6. Дискусија

Промена коришћења земљишта је главно питање овог века. Неки сугеришу да би последице могле бити веће чак и од климатских промена (Vorosmarty et.al., 2000). Процена ризика од поплава мора да обухвати главне природне карактеристике слива, антропогено измењене карактеристике (намена земљишта, урбанизација, положај стамбених и инфраструктурних објеката), као и све релевантне аспекте као што су трошкови и бенефиције, управљање водним ресурсима, просторно планирање (Pettier et al., 2005). Урбанизација и интензивирани пољопривредни производња доводе до промене хидролошких услова на сливу чему додатно доприноси тренд климатских промена и све чешће екстремне кишне епизоде (Kundzewicz, 2015).

У овом раду хидролошки ефекти су приказани променама вредности максималног протицаја пре и после изведених радова. Прорачун максималног протицаја је обављен применом комбиноване методе која обухвата теорије синтетичког јединичног хидрограма за одређивање вршне ординате јединичног протицаја као и SCS методологије за раздвајање ефективних од укупних падавина (Chang, 2003). Вредност максималног протицаја пре рестаурације износила је $Q_{\max(1\%)} = 31,28 \text{ m}^3/\text{s}$. Након изведених радова вредност максималног протицаја смањена је за 15, 22% и износи $Q_{\max(1\%)} = 26,52 \text{ m}^3/\text{s}$ је, што указује на побољшање хидролошких услова као директну последицу промене начина коришћења земљишта. Промене у начину коришћења извршене су на теренима прекривеним жбунастим врстама на вишим надморским висинама где је пошумљено 5,4% сливног подручја. Пошумљавање са попуњавањем извршено је на деградираним листопадним шумама које заузимају 18,26%. Затрављивање деградираних пашњака и ливада изведено је на површинама које заузимају 6,83% слива Честинске реке. Административним мерама прописана је контурна обрада земљишта на 12,44% сливног подручја, у средишњем и доњем делу. Крива протицаја након изведених радова смањена је са $CN=73$ на $CN=70$. Промене у начину коришћења довеле су до повећања инфилтрације воде а самим тим и до смањења протицаја. У сливу реке Јелашнице ($30,04 \text{ km}^2$) који је сличних карактеристика као слив Честинске реке такође променом начина коришћења дошло је до побољшања хидролошких услова где је максимални протицај вероватноће појаве једном у сто година смањен са $Q_{\max(1\%)} = 54,17 \text{ m}^3/\text{s}$ на $Q_{\max(1\%)} = 41,22 \text{ m}^3/\text{s}$ док је вредност криве протицаја смањена је са $CN=88$ на $CN=83$ (Ristić et al., 2011). Упоређујући максималне протицаје ($Q_{0.5\%}$) на сливу Лукачеве Долине, уочава се смањење максималног протицаја за 52% , односно са $Q_{0.5\%}=54,24 \text{ m}^3$ на $Q_{0.5\%}=25,66 \text{ m}^3$ (Радоњић Ј., 2018).

Примењени противерозиони радови и остварени степен заштите довели су до смањења коефицијента ерозије Z , који према МПЕ, методи примењеној у овом раду, представља најважнији показатељ интензитета ерозионих процеса. Смањење коефицијента ерозије Z , после извођења противерозионих радова, одразило се и на редукацију вредности ерозионе продукције и проноса наноса, што представља побољшање псамолошких ефеката у сливу Честинске реке. Сливним подручјем Честинске реке доминирају шуме са око 70% док после њих најзаступљеније су оранице са око 14%. Управо ерозија

земљишта је најинтензивнија на ораничним површинама. Неправилна обрада, оскудна вегетација и неправилно газдовање земљиштем ресурсима оставља земљиште изложено процесима ерозије. Посматрајући распоред земљишта и начин коришћења земљишта на сливу долази се до закључка да је горњи део слива мање више уједначен када је у питању релација земљиште – начин коришћења земљишта. За разлику од горњег дела слива, средњи и доњи део сливног подручја карактерише учестало просторно смењивање различитих типова земљишта и начина његовог коришћења.

Применом МПЕ за период пре радова, утврђена је просечна вредност коефицијента ерозије $Z=0,17$ што је одлика категорије врло слабе ерозије. Вредност просечне годишње ерозионе продукције износи $W_{god}=1.947,63 \text{ m}^3/\text{god}$, док је специфична продукција $W_{godsp}=73,03 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$. Примена МПЕ за период после изведених радова показала је просечну вредност коефицијента ерозије $Z=0,10$ што такође одговара категорији врло слабе ерозије. Вредност просечне годишње ерозионе продукције се смањила и износи $W_{god}=878,68 \text{ m}^3/\text{god}$, са специфичном продукцијом од $W_{godsp}=18,06 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$. Поређењем вредности специфичне ерозионе продукције применом МПЕ, за оба временска пресека пре и након примењених мера и радова, утврђено је смањење од $54,97 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$ након изведених радова. Годишњи пронос ерозивног материјала смањен је са $G_{god}=1067,65 \text{ m}^3/\text{god}$ на $G_{god}=481,68 \text{ m}^3/\text{god}$, док је вредност специфичног годишњег проноса са $G_{godsp}=40,03 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$ смањена на $G_{godsp}=18,06 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$ односно за $54,88\%$.

На сливу Лукачеве Долине примењени су противерозиони радови у ширем обиму и уочава се драстичан пад средње вредности коефицијента ерозије са $Z=1,124$ на $Z=0,238$. Слично је забележено и на сливу Градашничке реке где је срења вредност коефицијента ерозије смањена са $Z=0,465$ на $Z=0,151$. Вредност годишње продукције ерозионог материјала и проноса наноса на сливу Лукачеве Долине смањена је за чак 92% са $W_{god}=14.327 \text{ m}^3$, $G_{god}=6.269,96 \text{ m}^3/\text{god}$ на $W_{god}=1.203,07 \text{ m}^3$, $G_{god}=526,50 \text{ m}^3/\text{god}$ (Радоњић Ј, 2018).

За разлику од претходних примера у којима је применом ПЕ радова и мера дошло до смањења коефицијента ерозије и максималног протицаја Mohammadi et al. (2021) су указали на негативан антропогени утицај. Променама начина коришћења земљишта у периоду од 1991–2014 у сливу реке Талар у северном Ирану дошло је до промене вредности коефицијента ерозије Z и вредности максималних протицаја за различите повратне периоде. Резултати показују да су у периоду 1991–2014. године површине под шумом смањене за $12.478,04 \text{ ha}$ односно 6% , док су остале намене земљишта укључујући пољопривредна земљишта, пашњаке и урбане површине повећане за $7248,25$, $4481,05$ и $273,95 \text{ ha}$. Промене начина коришћења резултирале су повећањем вредности максималног протицаја са $Q_{\text{max}(1\%)}=432.14 \text{ m}^3/\text{s}$ на $Q_{\text{max}(1\%)}=446.91 \text{ m}^3/\text{s}$. Средња вредност коефицијента ерозије добијена је МПЕ и износила је 1991. године $Z=0,452$ док је 2014. године средња вредност коефицијента ерозије за слив реке Талар износила $Z=0,492$. Продукција наноса такође се повећала са $1.918.186 \text{ m}^3/\text{god}$ на $2.183.558 \text{ m}^3/\text{god}$ (Mohammadi et al., 2021). На примеру слива реке Талар показано је да

недостатак планирања и одговарајућег управљања земљиштем доводи до повећања максималног протицаја и проноса наноса у слива.

Реконструкција слива Честинске реке која обухвата техничке, биотехничке и биолошке радове и увођење административних мера и забрана (адекватно управљање) резултирала је побољшањем хидролошких и псамолошких услова у сливу.

7. Закључак

Неадекватним управљањем земљишта долази до деградације земљишта као условно обновљивог природног ресурса. Ерозија земљишта, као вид деградације, зависи од фактора попут нагиба, типа и карактеристика земљишта, присуства или одсуства вегетационог покривача, хидролошких карактеристика посматраног подручја али у данашње време условљени су у великој мери и позитивним и негативним антропогеним активностима. У тренду климатских промена бујичне поплаве постају све чешћа хидролошка непогода. С обзиром да су овакви догађаји непредвидиви и праћени великим материјалним штетама и скоро увек угрожавају људске животе неопходна је адекватна заштита. Најефикасније решење у борби против ове стихије јесте интегрално уређење и управљање бујичним сливовима.

Уређење слива Честинске реке сагледано је кроз концепт интегралног уређења при чему се водило рачуна о економичности, функционалности и рационалности. Уређење слива кроз изведене радове и примењене противерозионе мере резултирало је смањењу ерозионих процеса на сливној површини и регулисању водног режима односно спречавању изливања велике воде из корита водотока.

Хидролошко-псамолошки ефекти противерозионих радова представљени су добијеним резултатима, односно упоређивањем вредности максималних протицаја, коефицијента Z и количином продукованог и пронетог наноса за период пре и након изведених радова. Изведеним радовима и предузетим адекватним мерама на сливу Честинске реке репрезентативна вредност коефицијента ерозије биће редукована са $Z=0,17$ на $Z=0,10$. Вредност специфичног годишњег проноса наноса смањена је са $40,03 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$ на $18,06 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{god}^{-1}$ односно за 54,88%. Вредност максималног протицаја $Q_{\max(1\%)} = 31,28 \text{ m}^3/\text{s}$, пре рестаурације смањена је на $Q_{\max(1\%)} = 26,52 \text{ m}^3/\text{s}$ после рестаурације, што указује на побољшање хидролошких услова као директну последицу промене начина коришћења земљишта. Из приложених резултата јасно се уочава да са променом начина коришћења површина, односно превођењем деградираних површина у шуме и обнављањем деградираних шума као и променом начина обраде на пољопривредним површинама долази до редукације вредности максималног протицаја и промена коефицијента ерозије.

Литература

1. Arthur-Hartranft S.T., Carlson T.N., Clarke, K.C. (2003): *Satellite and ground-based microclimate and hydrologic analyses coupled with a regional urban growth model.* – Rem. Sens. Environ. 86: 385–400
2. Borrelli P., Robinson D.A., Panagos P., Lugato E., Yang J.E., Alewell C., Wuepper D., Montanarella L., Ballabio C. (2020): *Land use and climate change impacts on global soil*
3. Cantón Y., Solé-Benet A., De Vente J., Boix-Fayos C., Calvo-Cases A., Asensio C., Puigdefábregas, J. (2011): *A review of runoff generation and soil erosion across scales in semiarid south-eastern Spain.* Journal of Arid Environments, 75(12), 1254–1261. doi:10.1016/j.jaridenv.2011.03.004
4. Carlson T.N., Arthur S.T. (2000): *The impact of land use – land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: A satellite perspective.* Glob. Planet Change 25: 49–65.
5. Chang, M. (2003) : Forest hydrology. CRC Press, New York
6. Đorđević A., Knežević M., Tomić Z., Golubović S., Onjija A., Životić Lj., Nikolić N., (2011.) - Metodologija za sistemsko praćenje kvaliteta i stanja zemljišta u Srbiji .
7. Ferreira C.S.S., Ferreira A.J.D., Pato R.L., Magalhães C.M., Coelho C.O., Santos C. (2012): *Rainfall-runoff-erosion relationships study for different land uses, in a sub-urban area.* Zeitschrift für Geomorphologie Vol. 56, Suppl. 3, 005-020, Stuttgart. doi: 10.1127/0372-8854/2012/S-00101
8. Gavrilović S. (1972): *Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji*, Izgradnja, Specijalno izdanje, Beograd.
9. Karsidi A. (2004): *Spatial analysis of land use/land cover change dynamics using remote sensing and geographic information systems: A Case Study in the downstream and surrounding of the CiTarum watershed*, doctoral dissertation, Department of Geographical and Environmental Studies The University of Adelaide South Australia
10. Kostadinov, S., Dragovic, N., (2009): Conesa-Garcia, C., Lenzi, M.A. (Eds.), Check Dams, Morphological Adjustments and Erosion Control in Torrential Streams. Nova Science Publishers, Inc., pp. 63–88
11. Lal R. (2010): *Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security*, Bioscience, 60, pp. 708–712.
12. Lincoln, T. (2007). “Flood of data.” Nature, 447(7143), 393.
13. Llorens P., Domingo F. (2007): *Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe.* Journal of Hydrology. 335: 37– 54.
14. Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., Thielen, A. 2010. Assessment of economic flood damage. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10(8), 1679-1724.
15. Mohammadi M., Darvishan A.K., Spalevic V. , Dudic B., Billi P. (2021) : Analysis of the Impact of Land Use Changes on Soil Erosion Intensity and Sediment Yield Using the IntErO Model in the Talar Watershed of Iran.

16. Nearing M.A., Pruski F.F., O'Neal, M.R. (2004): *Expected climate change impacts on soil erosion rates - A review*. Journal of Soil and Water Conservation, 59(1), 43-50.
17. Pottier N., Penning R.E., Tunstall S., Hubert G. (2005): Land use and flood protection: contrasting approaches and outcomes in France and in England and Wales, Applied Geography 25, www.elsevier.com/locate/apgeog (1-27)
18. Ristić R. (2006): Time of concentration in torrential catchments in Serbia, Bulletin of the Faculty of Forestry 93 (7-21) (in Serbian with an english summary)
19. Ristić R., Radić B., Vasiljević N., Nikić Z. 2011. Land use change for flood protection - a prospective study for the restoration of the river Jelašnica watershed. Bulletin of the Faculty of Forestry 103: 115-130.
20. Saavedra C. (2005): *Estimating spatial patterns of soil erosion and deposition in the Andean region using geo-information techniques - A case study in Cochabamba, Bolivia*. Ph.D. dissertation, degree of Doctor at Wageningen University, The Netherlands
21. Vorosmarty, C.J., Green, P., Salisbury, J., Lammers, R. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. Science 289, 284-288
22. Yang, S. Q., Chen, Y. N., and Wang, A. S. (2003). "Dynamic mechanism of flood disaster on the basis of chaotic theory." J. Graduate School Chinese Acad. Sci., 20(4), 446-451.
23. Z. W. Kundzewicz (2015): Climate change track in river floods in Europe, Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, doi:10.5194/piahs-369-189-2015
24. Антић М., Јовић Н., Авдаловић В. (2007): Педологија, Шумарски факултет Универзитета у Београду;
25. Костадинов, С. (2008) : Бујични токови и ерозија, Универзитет у Београду, Шумарски факултет
26. Милчановић В. (2021): Развој методологије за идентификацију ерозионих подручја као елемент система у превенцији бујичних поплава. Докторска дисертација, Шумарски факултет, Универзитет у Београду
27. Радоњић Ј. (2018): Хидролошки и псамолошки ефекти противерозионих радова на бујичним подсливовима Јужне Мораве. Докторска дисертација, Шумарски факултет, Универзитет у Београду
28. Ристић Р., Малошевић Д. (2011): Хидрологија бујичних токова, Шумарски факултет Универзитета у Београду, Београд;
29. 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
30. 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.

Интернет странице:

- <https://www.hidmet.gov.rs/>

Прилози:

Прилог 1. Прорачун максималног протицаја применом поступка отимизације

Вероватноћа појаве 1%, повратни период Tr= 100 година (просечни услови влажности)											
Tk	Tk	tp	Tr	K	Tr	Tb	Pbr	d	Pe	qmax	Qmax
h	min	h	h		h	h	mm		mm	$\frac{m^3}{s \cdot mm^{-1}}$	m^3/s^{-1}
0.2	12	3.164	3.264	1.2	4.037	7.301	40.984	93.95	4.242	2.046	8.677
0.3	18	3.164	3.314	1.2	4.099	7.413	46.584	93.95	6.346	2.015	12.786
0.4	24	3.164	3.364	1.2	4.161	7.524	50.438	93.95	7.975	1.985	15.831
0.5	30	3.164	3.414	1.2	4.223	7.636	53.367	93.95	9.303	1.956	18.195
0.6	36	3.164	3.464	1.2	4.284	7.748	55.728	93.95	10.425	1.928	20.096
0.7	42	3.164	3.514	1.2	4.346	7.860	57.707	93.95	11.400	1.900	21.662
0.8	48	3.164	3.564	1.2	4.408	7.972	59.412	93.95	12.263	1.874	22.975
0.9	54	3.164	3.614	1.2	4.470	8.084	60.912	93.95	13.040	1.848	24.093
1	60	3.164	3.664	1.2	4.532	8.195	62.252	93.95	13.747	1.822	25.053
1.2	72	3.164	3.764	1.2	4.656	8.419	64.571	93.95	15.000	1.774	26.610
1.4	84	3.164	3.864	1.2	4.779	8.643	66.536	93.95	16.090	1.728	27.804
1.6	96	3.164	3.964	1.2	4.903	8.867	68.247	93.95	17.057	1.684	28.732
1.8	108	3.164	4.064	1.2	5.027	9.090	69.764	93.95	17.930	1.643	29.459
2	120	3.164	4.164	1.2	5.150	9.314	71.129	93.95	18.727	1.604	30.029
2.2	132	3.164	4.264	1.2	5.274	9.538	72.371	93.95	19.461	1.566	30.474
2.4	144	3.164	4.364	1.2	5.398	9.761	73.512	93.95	20.143	1.530	30.820
2.6	156	3.164	4.464	1.2	5.521	9.985	74.569	93.95	20.781	1.496	31.083
2.8	168	3.164	4.564	1.2	5.645	10.209	75.553	93.95	21.380	1.463	31.279
3	180	3.164	4.664	1.2	5.769	10.432	76.475	93.95	21.946	1.432	31.418
3.5	210	3.164	4.914	1.2	6.078	10.992	78.556	93.95	23.239	1.359	31.576
3.6	216	3.164	4.964	1.2	6.140	11.104	78.940	93.95	23.480	1.345	31.582
3.7	222	3.164	5.014	1.2	6.202	11.215	79.314	93.95	23.715	1.332	31.581
3.8	228	3.164	5.064	1.2	6.264	11.327	79.679	93.95	23.946	1.319	31.573
3.9	234	3.164	5.114	1.2	6.326	11.439	80.036	93.95	24.171	1.306	31.559
4	240	3.164	5.164	1.2	6.387	11.551	80.385	93.95	24.392	1.293	31.539
4.1	246	3.164	5.214	1.2	6.449	11.663	80.726	93.95	24.609	1.281	31.514
4.2	252	3.164	5.264	1.2	6.511	11.775	81.059	93.95	24.822	1.268	31.484
4.3	258	3.164	5.314	1.2	6.573	11.887	81.386	93.95	25.031	1.256	31.450
4.4	264	3.164	5.364	1.2	6.635	11.998	81.705	93.95	25.235	1.245	31.412
4.5	270	3.164	5.414	1.2	6.697	12.110	82.019	93.95	25.437	1.233	31.370
4.6	276	3.164	5.464	1.2	6.758	12.222	82.326	93.95	25.634	1.222	31.325
4.7	282	3.164	5.514	1.2	6.820	12.334	82.627	93.95	25.829	1.211	31.276
4.8	288	3.164	5.564	1.2	6.882	12.446	82.923	93.95	26.020	1.200	31.224
4.9	294	3.164	5.614	1.2	6.944	12.558	83.214	93.95	26.208	1.189	31.170
5	300	3.164	5.664	1.2	7.006	12.669	83.499	93.95	26.393	1.179	31.113

Прилог 2. Прорачун максималног протицаја применом поступка отимизације

Вероватноћа појаве 1%, повратни период $T_r = 100$ година (натпросечни услови влажности)											
T_k	T_k	t_p	T_p	K	T_r	T_b	P_{br}	d	P_e	q_{max}	Q_{max}
h	min	h	h		h	h	mm		mm	$\frac{m^3}{s \cdot mm^{-1}}$	m^3/s^{-1}
0.2	12	3.164	3.264	1.2	4.037	7.301	40.984	37.95	15.63	2.046	31.974
0.3	18	3.164	3.314	1.2	4.099	7.413	46.584	37.95	19.76	2.015	39.813
0.4	24	3.164	3.364	1.2	4.161	7.524	50.438	37.95	22.72	1.985	45.100
0.5	30	3.164	3.414	1.2	4.223	7.636	53.367	37.95	25.03	1.956	48.948
0.6	36	3.164	3.464	1.2	4.284	7.748	55.728	37.95	26.92	1.928	51.883
0.7	42	3.164	3.514	1.2	4.346	7.860	57.707	37.95	28.52	1.900	54.190
0.8	48	3.164	3.564	1.2	4.408	7.972	59.412	37.95	29.91	1.874	56.043
0.9	54	3.164	3.614	1.2	4.470	8.084	60.912	37.95	31.15	1.848	57.551
1	60	3.164	3.664	1.2	4.532	8.195	62.252	37.95	32.26	1.822	58.791
1.2	72	3.164	3.764	1.2	4.656	8.419	64.571	37.95	34.20	1.774	60.668
1.4	84	3.164	3.864	1.2	4.779	8.643	66.536	37.95	35.86	1.728	61.963
1.6	96	3.164	3.964	1.2	4.903	8.867	68.247	37.95	37.31	1.684	62.847
1.8	108	3.164	4.064	1.2	5.027	9.090	69.764	37.95	38.61	1.643	63.429
2	120	3.164	4.164	1.2	5.150	9.314	71.129	37.95	39.78	1.604	63.784
2.2	132	3.164	4.264	1.2	5.274	9.538	72.371	37.95	40.85	1.566	63.964
2.4	144	3.164	4.364	1.2	5.398	9.761	73.512	37.95	41.84	1.530	64.009
2.6	156	3.164	4.464	1.2	5.521	9.985	74.569	37.95	42.75	1.496	63.947
2.8	168	3.164	4.564	1.2	5.645	10.209	75.553	37.95	43.61	1.463	63.799
3	180	3.164	4.664	1.2	5.769	10.432	76.475	37.95	44.41	1.432	63.583
3.5	210	3.164	4.914	1.2	6.078	10.992	78.556	37.95	46.24	1.359	62.825
4	240	3.164	5.164	1.2	6.387	11.551	80.385	37.95	47.85	1.293	61.865
5	300	3.164	5.664	1.2	7.006	12.669	83.499	37.95	50.61	1.179	59.655
6	360	3.164	6.164	1.2	7.624	13.788	86.103	37.95	52.93	1.083	57.330
7	420	3.164	6.664	1.2	8.243	14.906	88.350	37.95	54.94	1.002	55.046
8	480	3.164	7.164	1.2	8.861	16.025	90.333	37.95	56.72	0.932	52.866
9	540	3.164	7.664	1.2	9.480	17.143	92.111	37.95	58.33	0.871	50.814
10	600	3.164	8.164	1.2	10.098	18.262	93.725	37.95	59.79	0.818	48.897

Прилог 3. Прорачун максималног протицаја применом поступка отимизације

Вероватноћа појаве 1%, повратни период $T_r = 100$ година (просечни услови влажности)											
Tk	Tk	tp	Tr	K	Tr	Tb	Pbr	d	Pe	qmax	Qmax
h	min	h	h		h	h	mm		mm	$\text{m}^3/\text{s}^{-1}/\text{mm}^{-1}$	m^3/s^{-1}
0.2	12	3.164	3.264	1.2	4.037	7.301	40.984	108.86	2.882	2.046	5.896
0.3	18	3.164	3.314	1.2	4.099	7.413	46.584	108.86	4.606	2.015	9.280
0.4	24	3.164	3.364	1.2	4.161	7.524	50.438	108.86	5.976	1.985	11.861
0.5	30	3.164	3.414	1.2	4.223	7.636	53.367	108.86	7.108	1.956	13.901
0.6	36	3.164	3.464	1.2	4.284	7.748	55.728	108.86	8.074	1.928	15.563
0.7	42	3.164	3.514	1.2	4.346	7.860	57.707	108.86	8.919	1.900	16.947
0.8	48	3.164	3.564	1.2	4.408	7.972	59.412	108.86	9.671	1.874	18.119
0.9	54	3.164	3.614	1.2	4.470	8.084	60.912	108.86	10.351	1.848	19.125
1	60	3.164	3.664	1.2	4.532	8.195	62.252	108.86	10.973	1.822	19.997
1.2	72	3.164	3.764	1.2	4.656	8.419	64.571	108.86	12.078	1.774	21.426
1.4	84	3.164	3.864	1.2	4.779	8.643	66.536	108.86	13.044	1.728	22.541
1.6	96	3.164	3.964	1.2	4.903	8.867	68.247	108.86	13.905	1.684	23.423
1.8	108	3.164	4.064	1.2	5.027	9.090	69.764	108.86	14.685	1.643	24.127
2	120	3.164	4.164	1.2	5.150	9.314	71.129	108.86	15.398	1.604	24.691
2.2	132	3.164	4.264	1.2	5.274	9.538	72.371	108.86	16.057	1.566	25.143
2.4	144	3.164	4.364	1.2	5.398	9.761	73.512	108.86	16.670	1.530	25.505
2.6	156	3.164	4.464	1.2	5.521	9.985	74.569	108.86	17.244	1.496	25.793
2.8	168	3.164	4.564	1.2	5.645	10.209	75.553	108.86	17.785	1.463	26.019
3	180	3.164	4.664	1.2	5.769	10.432	76.475	108.86	18.296	1.432	26.193
3.5	210	3.164	4.914	1.2	6.078	10.992	78.556	108.86	19.467	1.359	26.451
3.6	216	3.164	4.964	1.2	6.140	11.104	78.940	108.86	19.685	1.345	26.478
3.7	222	3.164	5.014	1.2	6.202	11.215	79.314	108.86	19.899	1.332	26.499
3.8	228	3.164	5.064	1.2	6.264	11.327	79.679	108.86	20.108	1.319	26.513
3.9	234	3.164	5.114	1.2	6.326	11.439	80.036	108.86	20.313	1.306	26.521
4	240	3.164	5.164	1.2	6.387	11.551	80.385	108.86	20.514	1.293	26.524
4.1	246	3.164	5.214	1.2	6.449	11.663	80.726	108.86	20.711	1.281	26.522
4.2	252	3.164	5.264	1.2	6.511	11.775	81.059	108.86	20.905	1.268	26.516
4.3	258	3.164	5.314	1.2	6.573	11.887	81.386	108.86	21.095	1.256	26.505
4.4	264	3.164	5.364	1.2	6.635	11.998	81.705	108.86	21.281	1.245	26.490
4.5	270	3.164	5.414	1.2	6.697	12.110	82.019	108.86	21.465	1.233	26.472
4.6	276	3.164	5.464	1.2	6.758	12.222	82.326	108.86	21.645	1.222	26.449
4.7	282	3.164	5.514	1.2	6.820	12.334	82.627	108.86	21.822	1.211	26.424
4.8	288	3.164	5.564	1.2	6.882	12.446	82.923	108.86	21.996	1.200	26.396
4.9	294	3.164	5.614	1.2	6.944	12.558	83.214	108.86	22.168	1.189	26.365
5	300	3.164	5.664	1.2	7.006	12.669	83.499	108.86	22.336	1.179	26.331

Прилог 4. Прорачун максималног протицаја применом поступка отимизације

Вероватноћа појаве 1%, повратни период $T_r=100$ година (натпросечни услови влажности)											
T_k	T_k	t_p	T_p	K	T_r	T_b	P_{br}	d	P_e	q_{max}	Q_{max}
h	min	h	h		h	h	mm		mm	$m^3/s^{-1}/mm^{-1}$	m^3/s^{-1}
0.2	12	3.164	3.264	1.2	4.037	7.301	40.984	44.82	13.34	2.046	27.295
0.3	18	3.164	3.314	1.2	4.099	7.413	46.584	44.82	17.17	2.015	34.587
0.4	24	3.164	3.364	1.2	4.161	7.524	50.438	44.82	19.93	1.985	39.563
0.5	30	3.164	3.414	1.2	4.223	7.636	53.367	44.82	22.10	1.956	43.217
0.6	36	3.164	3.464	1.2	4.284	7.748	55.728	44.82	23.88	1.928	46.025
0.7	42	3.164	3.514	1.2	4.346	7.860	57.707	44.82	25.39	1.900	48.249
0.8	48	3.164	3.564	1.2	4.408	7.972	59.412	44.82	26.71	1.874	50.047
0.9	54	3.164	3.614	1.2	4.470	8.084	60.912	44.82	27.89	1.848	51.521
1	60	3.164	3.664	1.2	4.532	8.195	62.252	44.82	28.94	1.822	52.743
1.2	72	3.164	3.764	1.2	4.656	8.419	64.571	44.82	30.79	1.774	54.616
1.4	84	3.164	3.864	1.2	4.779	8.643	66.536	44.82	32.37	1.728	55.936
1.6	96	3.164	3.964	1.2	4.903	8.867	68.247	44.82	33.76	1.684	56.863
1.8	108	3.164	4.064	1.2	5.027	9.090	69.764	44.82	35.00	1.643	57.500
2	120	3.164	4.164	1.2	5.150	9.314	71.129	44.82	36.12	1.604	57.919
2.2	132	3.164	4.264	1.2	5.274	9.538	72.371	44.82	37.15	1.566	58.168
2.4	144	3.164	4.364	1.2	5.398	9.761	73.512	44.82	38.09	1.530	58.285
2.6	156	3.164	4.464	1.2	5.521	9.985	74.569	44.82	38.97	1.496	58.297
2.8	168	3.164	4.564	1.2	5.645	10.209	75.553	44.82	39.80	1.463	58.224
3	180	3.164	4.664	1.2	5.769	10.432	76.475	44.82	40.57	1.432	58.084
3.5	210	3.164	4.914	1.2	6.078	10.992	78.556	44.82	42.33	1.359	57.514
4	240	3.164	5.164	1.2	6.387	11.551	80.385	44.82	43.88	1.293	56.737
5	300	3.164	5.664	1.2	7.006	12.669	83.499	44.82	46.54	1.179	54.867
6	360	3.164	6.164	1.2	7.624	13.788	86.103	44.82	48.79	1.083	52.848
7	420	3.164	6.664	1.2	8.243	14.906	88.350	44.82	50.74	1.002	50.835
8	480	3.164	7.164	1.2	8.861	16.025	90.333	44.82	52.47	0.932	48.898
9	540	3.164	7.664	1.2	9.480	17.143	92.111	44.82	54.02	0.871	47.064
10	600	3.164	8.164	1.2	10.098	18.262	93.725	44.82	55.44	0.818	45.342