UDK 556.166(497.11)"2014" Оригинални научни рад

АНАЛИЗА ПОПЛАВА У СРБИЈИ ТОКОМ МАЈА 2014. ГОДИНЕ

ВОЈИСАЛАВ ЂЕКОВИЋ¹ АЛЕКСАНДАР АНЂЕЛКОВИЋ¹ ВЕЛИБОР СПАЛЕВИЋ² МИЛОРАД ЈАНИЋ¹

Извод: Коинциденција појаве великих вода на свим водотоцима на ширем подручју, које је захватила циклонска активност, била је врло изражена. У овом раду приказан је поплавни талас на реци Пештан, десној притоци реке Колубаре. Циљ ових истраживања био је да се обухвати један слив мале величине, а који је у коинциденцији са реком Колубаром поплавио површински угљенокоп "Тамнава" из којег се угљем снабдевају обреновачке термоелектране. На основу регистрованих трагова великих вода током трајања поплава, накнално је извршена реконструкција поплавног таласа, како би се стекао увид у обим и величину катасрофалних поплава, као и да се покаже интезитет поплаве и њена рушилачка снага на малим водотоцима. На основу анализе може се закључити да је протицај великих вода у доњем току реке Пештан у периоду 15-16. мај 2014. године био реда величина између 0,1% и 0,01%. Поплавним таласом су се димензије протицајних профила значајно увећале, тако да данас протицајни профил водотока обезбеђује протицај воде > Q0,1%. Све је то довело до огромних разарања и плављења у доњем току Пештана, а у коинциденцији са осталим водотоцима: Лукавицом, Бељаницом и Колубаром до потапања површинских коповима "Тамнава", насеља Вреоци и града Обреновца.

Кључне речи: поплаве, мали сливови, циклон, протицај воде, пронос наноса, поплавни талас

A STUDY OF THE FLOODING IN SERBIA IN MAY 2014

Abstract: The coincidence of high waters on all water courses in a wide area hit by cyclone was very strong. This paper studies the flood wave on the river Peštan, right tributary of the Kolubara River. The aim was to focus on a small-sized catchment which together with the river Kolubara flooded the `Tamnava` open mine pits which supply coal to the Thermal Power Plants Obrenovac. By using the recorded high water marks, the flood wave was reconstructed in order to get a deeper insight into the scope and size of the catastrophic floods and to determine the intensity of flooding and its destructive forces on small streams. The study results showed that the flood discharge in the lower course of the river Peštan was between 0.1% and 0.01% over the period 15-16 May 2014. The flood wave significantly increased the dimensions of discharge profiles, so today the discharge profile ensures a water flow of Q>0.1%. All this led to massive destruction caused by flooding in the lower course of the river Peštan which together with the concurrent flooding on other rivers, such as Lukavica, Beljanica and Kolubara flooded the `Tamnava` open pits, the settlement of Vreoci and the city of Obrenovac.

Keywords: floods, small catchments, cyclone, water discharge, sediment transport, flood wave

¹ др Војислав Ђековић, ред.проф.; Александар Анђелковић, дипл.инж., асистент, др Милорад Јанић, ванр. проф., Универзитет у Београду - Шумарски факултет, Београд

² др Велибор Спалевић, водећи истраживач, Институт за шумарство Црне Горе

1. УВОД

Поплаве спадају у најдеструктивније природне појаве на Земљи и зависе у великој мери од глобалних климатских промена, интезитета падавина и дужине времена трајања, облика и величине слива. Једна од главних њихових карактеристика је величина поплава, која се не може унапред предвидети и оценити њена деструктивност (Frantar, P., 2013; Globevnik, L. *et al.*,1998; Notaro, V. *et al.*, 2014).

Скала на основу које се може дефинисати величина и обим поплава је логаритамска функција, која потиче од показатеља магнитудних вредности обима поплаве и времена трајања. Обим и објашњење од којих карактеристика зависи величина поплаве су описани у раду о поплавама широм света, током 2008. године (Frantar, P., 2013; Chin, A., Gregory, K.J., 2005). У раду је дат преглед поплава широм света из различитих извора, који су наведени у литератури, најважнији међу њима су "Dartmouth Flood Observatori". У Европи је, током 2013. године, било 19 великих поплава (2012. 17 поплава, 2011. 5 поплава, 2010. чак 28). У овим поплавама страдало је 79 људи, док је мигрирало 19.730. Поплављено је пола милиона квадратних km површине. Током 2013. године било је 7 великих поплава у централној Европи, у Подунављу, у сливу реке Елбе. Незапамћене поплаве у централној Европи су током 2013. године однеле најмање 19 живота. Немачки градови на реци Елби нашли су се у опасној зони, Магдебург се нашао у зони могуће катастрофалне поплаве, дубина воде прешла је 7,5 *т*. Од јуна 2013. године због претераног засићења земљишта влагом и јаких киша, настале су поплаве међународног значаја. (Извештај електронских медија). Поплавама у Шпанији потопљено је 53.000 km² територије. У другој половини маја, због топљења снега и симултано обилних киша у Норвешкој, у жупанијама Хедмарк, Бускеруд и Телемарк, поплављена територија била је већа од Словеније и под водом око 28.000 km². У Европи најобимније поплаве у 2013. године почеле су такође крајем маја. У централној Европи, наиме у Немачкој, трајала су до 20. јуна. Поплаве у централној Европи захватиле су скоро 250.000 km², а 25 људи је изгубило живот.

Поплаве од јаких киша на југу Италије, у првој половини октобара, однеле су два живота. Средином новембра, циклонски систем "Клеопатра" достигао је област Сардиније где је у току два сата пала 450 *mm* кише. Поплаве су однеле 18 живота. Италију су обимне поплаве погодиле опет почетком децембра где су страдале две особе (Frantar, P., 2013). У 2013. години било је 138 већих поплава у свету (157 у 2012). Већина поплава су у југоисточној Азији, у Кини, Индонезији, Филипинима и Индија. Током 2013. поплаве су узроковале миграције и пресељење 19,9 милиона људи који су били приморани да напусте своје домове (Frantar, P., 2013).

Катастрофалне поплаве у Србији, током маја 2014. године, догодиле су се након тродневних обилних падавина и снажне циклонске активности. Падавине у периоду 13–15. маја 2014. године, захватиле су цео Балкан. На мањим водотоцима, у сливу реке Колубаре, врх поплавног таласа трајао је од 14 до 16. маја 2014. године.



Слика 1. Географски положај испитиваних области (извор: оригинал) Figure 1. The geographical position of the study area (source: original)

Циклон је захватио огромно подручје средње и југоисточне Европе (слика 2). Циклон је почео да се формира 12. маја 2014. године, а од 13. маја испољио је најјачу активност. Простирао се на великој хоризонталној површини, вертикално, до 100 km, кроз целу тропосферу. Засићеност влагом ваздушне масе током трајања циклонске активности била је око 100%, влажност се повећавала захваљујући топлом ваздуху са југа и истока. У прилог развоју оваквог поља ниског притиска погодовала је и физичко-географска специфичност Балканског полуострва, континентална, брдовита област. На анализираном подручју је у период 13 - 15. маја 2014. године пало више од 200 mm падавина, највећа икада забележена количина у задњих 100 година од када се, врше метеоролошка осматрања у Србији.



Слика 2. Сателитски снимак циклонске активности на Балкану 13. маја 2014. (извор: www.google.com) Figure 2. Satellite image of the cyclone activity in the Balkans on May 13, 2014 (source: www.google.com)

У зони ушћа реке Пештан, у реку Колубару и низводно потопљен је површински угљенокоп "Тамнава", западно поље и "Велики Црљени",

поплављене су транспортне траке и багери, који су радили на откопавању угља у овом басену, као и градски центри: Лазаревац и Обреновац, и многа друга мања сеоска места. Река Пештан, у зони насеља Вреоци, излила се из основног корита и поплавила је целокупну речну долину, насеља и угрозила мост на Ибарској магистрали, као и извориште воде за водоснабдевање Лазаревца са околином.



Слика 3. Поплављено подручје 16. маја 2014. године (извор: оригинал) Figure 3. The flooded area on May 16, 2014 (source: original)

2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

За прорачун величине и обима поплавног таласа на реци Пештан коришћена је методологија експерименталних сливова. У доњем току реке Пештан, на ограниченом простору, регистровани су екстремни протицаји и извршена оцена утицаја на појаву поплава у низводном делу водотока. Поред тога извршена је оцена утицаја циклонске активности на појаву глобалних поплава у Србији.

Методолошки поступак истраживања реконструкције поплавног таласа у кориту реке Пештан састојао се у регистровању трагова великих вода (Јовановић, М., 2008). Регистровани трагови великих вода на сектору доњег тока послужили су за накнадно геодетско дефинисање морфологије протицајног профила речног корита (Surian, N., Rinaldi, M., 2003). Снимањем трагова великих вода, одређена је пропусна способност речног корита у дефинисаним морфолошким условима (Lane, S.N., 2005).

Теренским радовима су регистроване промене подужног пада и попречних профила водотока, регистроване су зоне поремећаја морфологије речног корита. Такође, вршена су истраживања гранулометријских карактеристика материјала из дна и обала протицајног профила, у циљу сагледавања услова за покретање и транспорт ерозионог материјала у таласу великих вода, што за последицу има разарање речног корита и морфолошке промене протицајног профила водотока (Ortigosa, L. *et. al.*, 1995).

Материјал су представљали подаци теренских истражних радова на реци Пештану, десној притоци реке Колубаре. Аутори су за време трајања поплава регистровали трагове великих вода у протицајном профилу водотока и на ушћу у реку Колубару. После опадања поплавног таласа великих вода извршена су геодетска снимања морфологије протицајног профила Пештана. Примењена је комбинована метода реконструкције заснована на траговима великих вода и рачунском тарирању пропусне способности корита, преко програма "Нес-Ras" (Ђековић, В. *et al.*, 2014).

За примену модела, неопходна су била обимна теренска мерења и снимања како у току трајања поплава, тако и накнадно после проласка поплавног таласа. Примењене су следеће методе:

- Експериментално истраживање на водотоку и у сливу реке Пештан, подељено у две фазе:
 - 1. директно регистровање нивоа воде на протицајним профилима водотока за време трајања поводња, 15. маја 2014. године;
 - 2. лоцирање мерних профила, укупно 18 профила на деоници дужине 1+100 km.
- Теренско рекогносцирање слива, одређивање услова за појаву површинских ерозионих процеса, и концентрацијну великих вода у главном току.

За даљу анализу, улазне податке чине резултати директног мерења трагова поплавног таласа и морфологије протицајних профила у зони трагова великих вода као и оцена утицаја коефицијента отпора речног корита на спречавање флувијалних ерозионих процеса.

За дефинисање пропусне способности корита примењена је метода директног мерења промене контуре попречног протицајног профила у временском раздобљу после проласка поплавног таласа (Graham, P., 2014).

Накнадна фаза теренских истражних радова обухватила је истраживање гранулометријских карактеристика материјала у кориту и обалама водотока, са циљем да се одреде карактеристике критичних и сталних тангецијалних напона по контури оквашеног обима корита при којима долази до мировања или покретања наноса из профила водотока (Ђековић, В. *et al.*, 2014).

3. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ДИСКУСИЈА

На основу података мерења и прорачуна, установљено је да је учесталост појаве падавина већег интензитета и вероватноћа појаве у границама приказаним у табели 1. Падавине појаве 0,01% су реда величина 194 *mm*, међутим, у периоду 13–14. мај пало је у Степојевцу 293,50 *mm*, у Љигу 229,50 *mm* (табела 2), што указује на то да се догодила непогода ређе вероватноће појаве, статистички гледано, ређе од једном у 10.000 година. Непогода је изазвала огромна разарања и плављења, а имаће и далекосежне последице на захваћени регион (Allen, P.M. *et al.*, 2002). Слабљење и нестанак циклона почео је током 16. маја 2014. **Табела 1.** Меродавне рачунске кише за прорачун великих вода за анализирано подручје (извор: оригинал)

Table 1.	Applicable rainfall for the computation of high waters for the study	
	area (source: original)	

МЕРОДАВНЕ РАЧУНСКЕ КИШЕ ЗА ПРОРАЧУН ВЕЛИКИХ ВОДА						
H ⁰	Вероватноћа %	Повратни период Н _d (р)				
1.	0,01	10 000	194,00 (<i>mm</i>)			
2.	0,1	1000	137,00 (<i>mm</i>)			
3.	1	100	93,80 (<i>mm</i>)			
4.	2	50	82,00 (<i>mm</i>)			
Параметри расподеле: Р=1,599 С=0,086 С=0,527						

На основу вероватноће појаве екстремних падавина (табела 1) и стварно регистрованих падавина 14–16. маја 2014. године (табела 2), могло се, прелиминарно, закључити да су падавине катастрофалних размера. Протицаји на водотоковима пратили су интензитет падавина и зато се у завршној анализи користио податак о великим водама појаве >0.1%, Q ≥ 370 m³·s⁻¹. Параметри теоријске расподеле кише јаког интензитета пре задњих максималних падавина у мају 2014. године, мах. дневна сума, Лог-пеарсон-3, као и резултати прорачуна приказани су у табели 1.

Табела 2. Подаци о измереним падавинама у непосредној близини слива реке Пештан (извор: РХМЗ РС)

 Table 2.
 Data on rainfall in the immediate vicinity of the Peštan River basin (source: RHMZ RS)

	Полручіе		Подаци о падавинама за три дана у (мм)					
Нодру ул		Назив Станице	14.5.2014	15.5.2014	16.5.2014	Укупно за три дана		
1.	Београд	Пиносава	16.20	129.00	72.20	217.20		
2.	Београд	Макиш	31.1	100.80	46.20	178.10		
3.	Београд	Јаинци	21.20	148.20	48.20	217.60		
4.	Београд	Церак	25.20	104.00	47.20	176.40		
5.	Ваљево	Степојевац	23.60	185.10	84.80	293.50		
6.	Ваљево	Уб	61.20	114.8	51.20	227.20		
7.	Ваљево	Љиг	31.00	125.00	73.50	229.50		

ГМС* – Главне метеоролошке станице

3.1. Основне геоморфолошке карактеристике слива реке Пештан

Експериментална деоница за одређивање карактеристичног протицаја великих вода током поплава у мају 2014. године, налази се у доњем току реке Пештан, узводуно од ушћа у Колубару. Површина слива реке Пештан на профилу ушћа износи 172 km². Геоморфолошке карактеристике доњег тока Пештана одликују се развијеном речном долином са широким инундацијама, што индицира особине мањих равничарских алувијалних водотока.

Морфолошке промене у кориту доњег тока реке Пештан, могуће је класификовати на појаве које су се догодиле у последње 2–3 деценије према обиму, као свеобухватна ревизија сливне геоморфологије (Dollar, E.J., 2004).

Један од садашњих узрока морфолошких промена су неуједначене гранулометријске карактеристике материјала у обалама и дну речног корита дуж водотока (дијаграм2. и 3.), као и повећане вучне силе и брзине тока у екстремном поплавном таласу "Hec–Ras" (табела 3).

У доњем току свих водотока у сливу Колубаре настале су незабележене поплаве у овом региону са далекосежним последицама по привреду и душтво, потопљен је површински угљенокоп "Тамнава западно поље" и "Велики Црљени" (слика 4, 5. и 6).

Процењује се да се у ова два површинска угленокопа излило: у "Западном пољу" W = 187,30 милиона m^3 максималне дубине воде H = 66,4 m, а у површинском копу "Велики Црљени" W = 27,5 милиона m^3 воде, максимална дубина у овом копу је H = 28,90 m. У извештају бироа површински копови "Тамнава" наводи се површина воденог огледала на "Тамнави западно поље" $P = 7,44 \ km,^2$ а "Велики Црљени" $P = 2,27 \ km^2$. Максимална ширина већег језера је 3,2 km, а дужина око 5,0 km, док је код мањег језера ширина 1,1 km, а дужина 2,60 km. Потопљене су транспортне траке, багери који су вршили откопавање, помоћне машине, радионице и опрема (слика 4 и 5). Дубина воде у потопљеном граду Обреновцу је била у просеку преко 2,5 m.

Директна штета, настала услед катастрофалних поплава које су недавно задесиле Србију, износила је 810,1 милиона евра, док индиректни губици износе 661,9 милиона евра. То је укупни износ штета, према званичном извештају о процени штете од поплава који је усвојила Влада Републике Србије, представљен на донаторској конференцији у Бриселу 16. јула 2014.

Седам месеци касније, 26. децембра 2014. године, покренута је производња угља на копу "Тамнава" "Велики Црљени". Вода је непрекидно (дан и ноћ) испумпавана из језера у корито реке Колубаре тако да је до овог дана испумпано 129,4 милиона *m*³ воде и оборен је ниво воде за 23 *m*. Спуштањем нивоа, из воде је "изронило" пет багера-глодара, погонске станице и трачни транспортери.

На слици 3 може се запазити размера поплављених копова као и количина изливене воде што је уједно представљало растерећење низводног сектора, од притиска поплавних вода. На слици 4 види се багер "Глодар" од чијих огромних металних конструкција високих преко 40 метара, после поплава, из воде сабласно вире само његови врхови. Испод воде, која је на неким местима дубока преко 70 метара налази се прави мали град. Под водом је остало преко 20 *km* транспортних трака, аутоматизоване станице, једна мобилна радионица за оправку багера, већи број машина и разне рударске опреме.



Слика 4. Потопљен багер и транспортне траке на површинском копу "Тамнава". (http://www.alo.rs/resources) Figure 4. A sunk bagger and conveyors on the 'Tamnava'open mine pits. (Http://www.alo.rs/resources)

Подужни падови на свим притокама Пештана су релативно мали, речни токови меандрирају, мењајући трасу свог тока. У доњем току Пештана, на левој обали је извориште воде (рени бунари) за водоснабдевање града Лазаревца са околином, угрожено поплавним водама. У доњем току реке Пештан, на експерименталној деоници, због честих морфолошких промена, пад дна регулисаног корита је изломљен. Узроци промена пада дна регулисаног корита налазе се у неуједначеној геомеханичкој структури материјала у дну и обалама корита (слика 5), па су зато промењиве димензије протицајних профила (Kondolf, G.M. *et. al.*, 2002)

Утицај геомеханичке структуре материјала из протицајног профила водотока указује на могућу појаву деформација у дну и обалама током трајања поводња (дијаграм 1). Крупноћа фракција се креће у границама 0,001– 1.0 *mm*. Овај процес евидентиран је и током мајских поплава 2014. године.

3.2. Геомеханичка анализа ерозионог материјала дуж експерименталне деонице Пештана

У циљу одређивања отпорности речног корита на процес флувијалне ерозије и стварање отпора протицају великих вода вршена су истраживања геомеханичких карактеристика материјала из дна и обала речног профила дуж водотока (слика 5). На узетим узорцима извршена је гранулометријска анализа материјала (дијаграм 2, 3), одређена је запреминска и специфична маса материјала на узорцима (Sloan, J. *et. al.*, 2001).



Дијаграм 1. Гранулометријски састав материјала из обала и сондажних бушотина реке Пештана (извор: оригинал)

Diagram 1. Particle size of the material from the river banks and probing pits of the Peštan River (source: original)



Дијаграм 2. Гранулометријски састав из профила речног корита реке Пештан 2010. година. (извор: оригинал)

Diagram 2. Particle size of the material from the profile of the Peštan river bed in 2010 (Source: original)



Слика 5. Вучени нанос у спрудовима у упрофилу реке Пештан 2013. године (фото: В. Ђековић)

Figure 5. Suspended sediment in the sandbanks of the river Peštan profile in 2013 (foto:V. Đeković)

Гранулометријски састав материјала из сондажних бушотина и обала корита реке Пештан на експерименталној деоници водотока, указују на хетерогену и неуједначену структуру. Крупноћа фракција се креће (0,001 – 55 *mm*), при чему су и значајне осцилације између узорака наноса. Средњи пречник материјала у обалама је ($d_{sr} = 0,03 - 10$ mm) (дијаграм 2 и 3).

На основу овакве анализе може се закључити да се у обалама јављају и ситније фракције глине и колоида, које имају везивно својство, а то везивно својство се губи под утицајем хидродинамичких сила подземне воде из обала, и из профила речног корита за време протицаја великих вода, и наглог опадања и повлачења воде из профила речног корита.

3.3. Хидролошке карактеристике реке Пештан

Према Главном пројекту, за регулацију Пештана у зони ушћа, прорачунате су велике воде $Q_{1\%}=160 \ m^3 \cdot s^{-1}$, док су воде $Q_{0.1\%}=277 \ m^3 \cdot s^{-1}$ (Кољеншић, А. *et al.*, 1977). Рачунски модел максималног специфичног отицања, за натпросечне услове влажности позициониран је између анвелопа појаве (р = 0,1-0,01%) (слика 8).

Иако је изворишни део слива реке Пештан, под шумом доброг склопа и покровности под шумом се налази >53,10%, шума није у потпуности умањила шпиц поплавног таласа, али је заштитила земљиште од површинске и плувијалне ерозије.

Са концентрацијом вода дуж линија највећег пада, повећава се њен транспортни и енергетски потенцијал за покретање и транспорт постојећих и стварање нових количина ерозионог материјала. Повољне инфилтрационе и ретенционе карактеристике природних шума и шумског земљишта, шумских засада (култура) и травних површина, огледају се кроз промену структуре земљишта и садржаја квалитетног хумуса (Letić, Lj. et al., 2014). Начин коришћења земљишта у сливу има одлучујућу улогу у задржавању и регулисању отицаја (Thorne, C.R. et al.,1996).





Током мајских поплава 2014. године количина атмосферских падавина прелази значајно, количину падавина вероватноће појаве 0,01% (194mm : 293,50mm). За тарирање модела трагова великих вода урађено је више серија прорачуна са различитим протицајима, све док се нису добиле коте велике воде регистроване на терену. Корито реке Пештан пропушта протицаје без изливања из основног корита веће од $Q_{0,1\%} = 277,093 \ m^3 \cdot s^{-1}$ уколико се не узима у обзир коинциденција великих вода реке Колубаре и Пештан. С обзиром да се догодила коинциденција великих вода на свим водотоцима у сливу Колубаре, а на ушћу Пештана је регистрована кота велике воде од 93,64m (слика 8). Тарирани модел је показао врло прецизно да је протицај реке Пештана 15 – 16. маја износио $Q = 370 \ m^3 \cdot s^{-1}$. Протицај од $Q = 370 \ m^3 \cdot s^{-1}$ је ређе вероватноће појаве од 0,1%.









3.4. Резултати прорачуна поплавног таласа реке Пештан

Река Пештан у свом доњем току излила се из основног корита на многим деоницама и поплавила сеоска насеља и приградска насеља града Лазаревца. Током 15. маја аутори овог рада регистровали су нивое воде у доњем току реке Пештан (слика 8), као и на многим профилима снимајући видео запис о поплавама. Након проласка поплавног таласа извршена су геодетска снимања попречних профила корита. За хидрауличку анализу протицаја великих вода коришћена је диференцијална једначина неједноликог течења [1]. Димензије протицајних, (попречних) профила су неуједначене и промењиве, са неуједначеним коефицијентом рапавости дуж тока, и по оквашеном обиму протицајног профила. Такође дуж тока се јављају преломи у паду нивелете дна. Разлог за ову појаву је неуједначен геолошка структура матријала у дну и обалама регулисаног корита, као и периодично кретање вученог наноса (слика 8).



Слика 8. Трагови велике воде на реци Пештан 15. маја 2014. и после проласка поплавног таласа (фото: А. Анђелковић)

Figure 8. High water marks on the river Peštan on 15 May 2014 and after the flood wave (photo: A. Andjelković)

Програм "Hec-Ras" је разрађен на основу диференцијалне једначине неједноликог течења [1]:

$$\Delta Z = \frac{Q^2}{K^2} \cdot \Delta L + \frac{(V_u^2 - V_n^2)}{2g}$$
[1]

Где су:

ΔZ –денивелација нивоа воде на укупној деоници водотока од профила до профила;

К – Средња вредност модула протицаја;

 $V^2_{\ _{u}}$ и $V^2_{\ _{n}}$ – брзина протока у узводном и низводном профилу (од профила до профила).

Хидрауличка анализа обухватила је локалну деоницу водотока у укупној дужини 1+100 km на којој су прецизно регистровани трагови великих вода. Применом програма "Нес–Ras" извршено је тарирање пропусне способности корита до регистроване коте велике воде, по профилима (слика 9, 10. и 11). На основу главног пројекта за регулацију реке Пештан стогодишња велика вода{0><}0{>, je $Q_{1\%}$ =160 m³·s⁻¹. док је протицај $Q_{0,1\%}$ =277,093 m³·s⁻¹. С обзиром да су поплаве у мају 2014. оцењене као катастрофалне и незабележене у задњих 100 година, од када се воде метеоролошка осматрања. (РХМЗ–Србије 2014).

Тарирање модела вршено је методом пробања, за протицаје: ($Q_{1\%}$ =148 $m^3 \cdot s^{-1}$, $Q_{0,1\%}$ =277 $m^3 \cdot s^{-1}$, Q=400 $m^3 \cdot s^{-1}$, Q=370 $m^3 \cdot s^{-1}$. За протицај од Q=370 $m^3 \cdot s^{-1}$ добиле су се регистроване коте нивоа велике воде на терену.

У раду су приказани само неки протицајни профили са котом нивоа воде и линијом енергије тока, и завршна хидрауличка анализа за све профиле са протицајем од $Q = 370 \ m^3 \cdot s^{-1}$ (табела 3).

На основу табеле 1, падавине вероватноће појаве једном у 10.000 година су Н=194 *mm*. Током трајања циклона "Тамара" на метеоролошкој станици Степојевац, а што је у центру слива реке Пештан, регистровано је за три

узастопна дана Н=293,50 mm (табела 2).

Хидрауличком анализом "Hec-Ras" дефинисани су многи параметри дуж истраживане деонице водотока и приказани у табели 3.



Слика 9. Протицајни профили бр. 3 и 4 реке Пештан после проласка поплавног таласа **Figure 9.** Discharge profiles no. 3 and 4 of the Peštan River after the flood wave (photo: A. Andjelković)



Слика 10. Протицајни профил бр. 4 и бр. 9 на km 0+166,63 и на km 0+370,77 "Hec-Ras" Figure 10. Discharge profiles no. 4 and no. 9. at km 0 + 166.63 and at km. 0 + 370.77 'Hec-Ras'



Слика 11. Уздужни профил реке Пештан 15. маја 2014 (Hec-Ras) Figure 11. The longitudinal profile of the river Peštan on May 15, 2014 (Hec-Ras)

Табела 3. Приказ хидрауличких в	параметара	"Hec-Ras"	за протицај
Q _{<i>max</i>} =370 <i>m</i> ³ ⋅ <i>s</i> ⁻¹ (извор: 6	оригинал)		

Table 3. Overview of hydraulic `Hec-Ras` parameters for discharge $Q_{max} = 370 \ m^3 \cdot s$ (source: original)

Проф.	Min. Ch.El	W.S.Elev	Wat. depth	E.G.Elev	E.G. Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Wodth	Fraud	Tang. Tens
N^0	m	m	m	m	m/m	m/s	<i>m</i> ²	m		$kN \cdot m^{-2}$
18	86.38	93.89	7.51	94.13	0.000467	2.27	185.93	52.63	0.31	0.169
17	85.96	93.88	7.92	94.10	0.000459	2.13	184.80	46.29	0.30	0.179
16	86.06	93.69	7.44	94.02	0.000740	2.56	151.60	44.14	0.37	0.168
15	85.57	93.77	8.20	93.93	0.000268	1.78	212.38	42.40	0.23	0.185
14	85.20	93.75	8.55	93.90	0.000261	1.70	219.43	47.34	0.23	0,193
13	84.82	93.64	8.72	93.85	0.000443	2.04	184.63	50.42	0.29	0.196
12	84.81	93.58	8.76	93.83	0.000497	2.21	173.88	52.67	0.30	0,197
11	85.09	93.60	8.51	93.79	0.000349	1.95	201.17	54.61	0.26	0.192
10	85.15	93.57	8.42	93.76	0.000342	1.97	205.87	58.97	0.26	0.186
9	84.96	93.63	8.56	93.73	0.000145	1.45	270.33	59.75	0.18	0,193
8	84.64	93.63	8.68	93.73	0.000145	1.40	272.89	55.03	0.17	0,196
7	84.70	93.56	8.85	93.71	0.000255	1.79	226.01	56.34	0.23	0,203
6	84.63	93.57	8.94	93.70	0.000203	1.62	244.29	53.87	0.20	0,205
5	84.23	93.56	9.33	93.69	0.000284	1.59	236.05	60.31	0.23	0,214
4	84.14	93.57	9.41	93.66	0.000175	1.37	281.37	62.88	0.19	0,216
3	83.88	93.56	9.60	93.64	0.000149	1.30	293.97	60.82	0.18	0,220

На профилу бр. 9 km 0+370,77 се запажа зона изливања велике воде на левој обали са дубином воде од 0,50 m, иста појава регистрована је још на

неколико профила дуж експерименталне деонице водотока.

У табели 3 приказани су резултати хидрауличке анализе, може се запазити да је режим течења на експерименталној деоници миран), док су средње брзине тока биле у дијапазону (F_r < 1), истовремено дубине воде по профилима крећу се у дијапазону 6,14 – 8,56 *m*, док је тангецијални напон по дну тока $\tau = 0,0438 - 0,2478 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ (табела 3). Вредност критичног тангецијалног напона са тарираном константом "Shildsa 0,0478" је у дијапазону ($\tau_{cr} = 0.0478 \cdot g(\rho_s - \rho)d_{sr} = 0.04149 - 0.0826 \cdot kN \cdot m^{-2}$). На основу тога меоже се закључити да су деформације протицајног профила лоциране претежно на горњем сектору експерименталне деонице. Без обзира што је био миран режим течења у кориту водотока су се догодиле огромне морфолошке промене због повећаних вучних сила тока (табела 3, 9, 10. и 11).

4. ЗАКЉУЧЦИ

Издвојена деоница водотока у доњем току реке Пештан добро осликава обим и величину катастрофалних поплава током маја 2014. године. Падавине током трајања циклонске активности и претходне падавине, слабијег интезитета условиле су засићеност земљишта и изданских хоризоната водом, што је довело до високог коефицијента отицања. Појава поплава у свим приотокама и њихова коинциденција условиле су поплаве у доњем току водотока. Коинциденција великих вода на свим притокама Колубаре, створини су услови за потапање површинског копа Тамнава "Западно поље" и "Велики Црљени", Града Лазаревца, Обреновца и сеоских насеља. Да би се поново покренула експлоатација угља из угљенокопа, неопходно је да се вода испумпа, то је обиман посао, укупна запремина воде у коповима је W = 214,88 милиона m³. Ако се узме у обзир дозвола ЈП "СРБИЈА ВОДЕ" бр. 23/05.2014. да се и у профил Колубаре сме убацивати само $Q = 11,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, онда се лако може доћи до закључка да је за црпљење воде потребно непрекидног рада, дан и ноћ 226 дана (не рачунајући застоје и хаварије на пумпи и црпних постројења), за то време површински копови ће бити ван употребе.

С обзиром на то да су количине падавина од 14 до 16. маја 2014. године према извештају РХМЗ износиле знатно изнад, падавина 0,01%. На метеоролошкој станици Степојевац у центру слива реке Пештан, измерено је за три дана укупно 293,50 *mm*, што знатно прелази вредност вероватноће појаве 0,01%, за очекивање је било да ће се и протицаји у овом сливу понашати према унапред утвђеним критеријумима. Да би се дефинисао протицај великих вода у поводњу 14 –16. маја 2014. године, извршена су снимања и мерења трагова великих вода на терену које је оставила велика вода у току трајања поплавног таласа, и после престанка поплава. Геодетска снимања протицајних профила вршена су после проласка поплавног таласа, са везом на тригонометријске репере на терену. Регистроване промене морфолошких карактеристика протицајног профила водотока, као и промене кофицијента рапавости дуж водотока, указују на интезитет и величину поплавног таласа.

На основу једначине [1] према којој је разрађен компјутерски про-

грам за хидрауличке прорачуне "Нес-Ras", извршено је тарирање пропусне способности корита при задатим морфолошким параметрима и коефицијенту рапавости све док се није добила регистрована кота нивоа велике воде на терену у току трајања поводња. С обзиром на то да су унапред дефинисане коте нивоа воде дуж водотока, попречни профили и подужни профил, анализом је добијен фрудов број и брзина течења по профилима. Као и многи други параметри (табела 3), на основу којих се могу извући закључци о стабилности протицајног профила водотока, режиму течења и степену вероватноће протицаја великих вода. У анализи је коришћена велика вода која је оставила траг на протицајним профилима, након повлачења и престанка поплаве, реконструкцијом је установљено да је речним корито током трајања поводња протицало ($Q=370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} > Q_{0.192}=277 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

На основу ове анализе може се закључити да је протицај великих вода у доњем току реке Пештан у периоду 15–16. мај 2014. године био реда величина између 0,1% и 0,01%. Поплавним таласом су се димензије протицајних профила значајно увећале, тако да данас протицајни профил водотока обезбеђује протицај воде >Q_{0,1%}. Све је то довело до огромних разарања и плављења у доњем току Пештана, а у коинциденцији са осталим водотоцима: Лукавицом, Бељаницом и Колубаром до потапања површинских коповима "Тамнава", насеља Вреоци и града Обреновца.

Напомена: Овај рад је реализован у оквиру пројекта "Нови биоеколошки материјали за заштиту земљишта и вода" (ТП37002) и пројекта "Истраживање климатских промена на животну средину: праћење утицаја адаптација и ублажавање" (III 43007) које финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

ЛИТЕРАТУРА

- Allen, P.M., Arnold, J.G., Skipwith, W. (2002): Erodibility of urban bedrock and alluvial channels, north Texas. Journal of the American Water Resources Association 38, 1477–1492.
- Globevnik, L., Sovinc, A., Fazarinc, R. (1998): Land degradation and environmental changes in the Slovenian sub Mediterranean (the Dragonja river catchment). Geofkodynamik (Bensheim) XIX, 281–291
- Graham Piper, Balancing flood risk and development in the flood plain: the Lower Thames Flood Risk Management Strategy, Ecohydrology & Hydrobiology 14 (2014) 33–38
- Dollar, E.J. (2004): Fluvial geomorphology. Progress in Physical Geography 28, 405–450.
- Đeković, V., Anđelković, A., Milošević, N., Gajić, G., Janić, M. (2013): Effect of reservoir on floodwave transformation, Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, ISSN: 1842– 4090 ISSN online:1844–489X North University of Baia Mare, May 2013, Vol.8, No. 2, p. 107–112
- Đeković, V. *et al.* (2014): Reconstruction of the Flood Wave in the Source Area of the Barajevska River in may 2014 Časopis Šumarstvo "Forestri" 2014. str.103–116
- Frantar P. (2013): POPLAVE PO SVETU LETA 2012 Floods in the world in 2012 Ministarstvo za obrambo, http://www.sos112.si/slo/, 127 –140
- Jovanović, M. (2008): "*Regulacija reka*, rečna hidraulika i morfologija".Univerzitetski udžbenik. U*niverzitet u Beogradu* Građevinski fakultet, Beograd str. 1–500

Kondolf, G.M., Piegay, H., Landon, N. (2002): Channel response to increased and decreased bedload supply from land use changes: contrasts between two catchments. Geomorphology 45, 35–51.

Lane, S.N. (2005): Roughness-time for a re-evaluation? Earth Surface Processes and Landforms

30, 251-253.

Letić, Lj., Nikić, Z., Savić, R., Nikolić, V. (2014): Uticaj vegetacionog *pokrivača na retenciju i oticanje vode na području Fruške Gore*, Šumarstvo DIT Srbije, 1–2, Beograd. 97–111.

- Notaro, V., De Marchis, M., Fontanazza, C.M., La Loggia, G., Puleo, V., Freni, G. (2014): The Effect of Damage Functions on Urban Flood Damage AppraisalOriginal Research Article Procedia Engineering, Volume 70, Pages 1251–1260
- Ortigosa, L., Ruiz Flano, P. (1995): Changes in runoff and erosio as a consequence of land-use changes in the Central Pyrenees. Physical hemical Earth 20, 301–307.
- Sloan, J., Miller, J.R., Lancaster, N. (2001): Response and recovery of the Eel River, California, and its tributaries to floods in 1955, 1964, and 1997. Geomorphology 36, 129–154.
- Surian, N., Rinaldi, M.(2003): Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. Geomorphology 50, 307–326.
- Thorne, C.R., Allen, R.G., Simon, A. (1996): Geomorphological river channel reconnaissance for river analysis, engineering and management. Transactions Institute of British Geographers 21, 469–483.
- Chin, A., Gregory, K.J. (2005): Managing urban river channel adjustments. Geomorphology 69, 28-45.
- (2014): Operativni hidrometeorološki bilten, RHMZ- Srbije, 15. maj 2014. godine, Izveštaj o padavinama tokom ciklona "Tamara", QF-A-011 Beograd.

A STUDY OF THE FLOODING IN SERBIA IN MAY 2014

Vojislav Đeković Aleksandar Anđelković Velibor Spalević Milorad Janić

Summary

The paper gives an overview of the development of catastrophic floods in our country and in the world at the beginning of this century. The occurrence of flooding was studied on the concrete case of the flood in the lower course of the river Peštan during the cyclone 'Tamara' from May 14 to May 16, 2014. The research included field work, rainfall measurements, and recording of high water marks during the cyclone activity and after the rain had ceased and the flood subsided. Nearby weather stations provided data on the daily rainfall totals that had caused the large-scale flooding and created conditions for the simultaneous occurrence of maximum discharges in all watercourses in the drainage basins of the Peštan and Kolubara rivers and in the watercourses of different categories from streams that dry up in summer months to small and large rivers of the Kolubara drainage basin and other rivers in Serbia.

In order to get a deeper insight into the conditions that led to the formation of the flood wave, we made additional field measurements, analyzed the topography of the catchment and studied the way surface runoff was formed from the catchment. We further studied the land use in the catchment and the role of vegetation in the prevention of precipitation concentration and formation of the surface runoff. It was found that even though it has the ability to concentrate along the lines of the greatest fall, water did not cause the occurrence of surface erosion due to the presence of vegetation, although it caused further retention of precipitation. The water course was fed by clear and clean water from the valleys, while the river course made conditions for channel cutting, bank caving and removal of the erosion material along the catchments to the zone of disposal.

After the flood cessation, a detailed geodetic survey of the morphology of the streamflow profiles was conducted in order to determine the discharge. Converting the obtained results into envelope curves, we obtained the probability of flood occurrence during the observation period. Other hydraulic parameters of the watercourse during the floods were determined and the maximum discharge of water in this flood wave was defined using appropriate computer programmes. Water depths and tractive forces were determined for each profile as well as the medium flow velocity of streamflow profiles.