

АНАЛИЗА ПОПЛАВА У КОЛУБАРСКОМ РЕГИОНУ У СРБИЈИ ТОКОМ МАЈА 2014. ГОДИНЕ

ВОЈИСЛАВ ЂЕКОВИЋ¹
АЛЕКСАНДАР АНЂЕЛКОВИЋ¹
МИЛОРАД ЈАНИЋ¹
ВЕЛИБОР СПАЛЕВИЋ²

Извод: Разорне поплаве које су погодиле Србију у мају 2014. године угрозиле су регионалну економију и привредни раст захваћеног подручја. У овом раду направљена је синтеза последица које су поплаве изазвале као резултат дејства циклонске активности. Реконструкцијом поплавног таласа на рекама: Колубари у Ваљеву, Пештану, Лазаревцу, Бељаници, у Степојевцу и Барајевској реци у Барајеву, извршена је анализа обима и величине протицаја у поплавним таласима на овим водотоцима. Регистровањем трагова великих вода за време трајања протицаја поплавног таласа створили су се услови да се прецизно дефинише протицај воде у поводњу. Накнадним снимањем протицајних профила водотока и трасе корита, дефинисане су морфолошке карактеристике речних корита до кога трага велике воде у поводњу. На основу регистрованих трагова великих вода, комбинованом методом „Hec-Ras“, одређена је пропусна моћ речних корита до регистроване коте велике воде на протицајним профилима.

Кључне речи: бујице, Гис, Колубара, Пештан, Бељаница, Барајевска река, трагови великих вода

A STUDY OF FLOODING IN THE KOLUBARA REGION IN SERBIA IN MAY 2014

Abstract: Devastating floods that hit Serbia in May 2014 jeopardized the economy of the region and restrained the economic growth of the affected area. This paper makes a synthesis of the effects brought about by flooding that resulted from the action of cyclone. By reconstructing the flood wave on the rivers of Kolubara in Valjevo, Peštan in Lazarevac, Beljanica in Stepojevac and Barajevska River in Barajevo, we analyzed the scope and size of the flood discharge in these watercourses. The high water marks that were recorded during the flooding enabled a precise determination of the high water discharge. Subsequent recording of discharge profiles of the watercourses and riverbed routes was used to define the morphology of riverbeds to the high water marks. The discharge capacity of riverbeds to the recorded high water levels was determined on the basis of the recorded high water marks using the 'HEC-RAS' combined method.

Keywords: torrents, GIS, Kolubara, Peštan, Beljanica, Barajevska River, high water marks

1. УВОД

Поплаве спадају у најдеструктивније елементарне непогоде на Земљи, зависе у великој мери од глобалних климатских промена, интезитета, ду-

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

2 *др Велибор Спалевић, доц., Универзитет у Подгорици - Филозофски факултет Никшић, Црна Гора*

жине времена трајања падавина, облика и величине слива. Једна од главних њихових карактеристика је величина поплаве, 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. Објашњење од којих карактеристика зависи величина и обим поплаве су описани у раду о поплавама широм света, (Chin, A., Gregory, K.J., 2005).

У раду је приказан преглед поплава широм света са подацима 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. године 17 поплава, 2011. године 5 поплава, а 2010. године чак 28. У овим поплавама изгубљено је 79 људских живота, док је евакуисано 19.730 особа. Поплављено је пола милиона квадратних километара пољопривредног земљишта. Током 2013. године било је 7 великих поплава у централној Европи, у Подунављу и 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 је прелазила 7,5 m. Од јуна 2013. године због претераног засићења земљишта влагом и јаким киша, настале су поплаве међународног значаја (Извештај електронских медија). У другој половини маја, због топљења снега и симултано обилних киша у Норвешкој, у жупанијама Хедмарк, Бускеруд и Телемарк, поплављена територија била је око 28.000 km². У Европи најобимније поплаве у 2013. години почеле су такође крајем маја. У централној Европи, Немачкој, поплаве су трајале до 20. јуна. Поплаве у централној Европи захватиле су скоро 250.000 km², а 25 људи је изгубило живот. Поплаве од јаким киша на југу Италије, у првој половини октобра 2013. године, однеле су два живота. Средином новембра исте година, циклонски систем „Клеопатра“ достигао је област Сардиније где је у току два сата пало 450 mm кише. Поплаве су однеле 18 живота. Италију су обимне поплаве погодиле опет почетком децембра 2013. године где су страдале две особе (Frantar, R., 2013).

Циклонска активност изнад Балканског полуострва од 14. до 16. маја 2014. године, генерисала је обилне падавине на територије Србије, северне Босне и источне Хрватске. Овом периоду претходило је изузетно дуготрајно кишовито време, падавине су заситиле педолошко-геолошке слојеве земљишта, подижући нивое подземних вода. Тако да се накнадне количине падавина од 14. до 16. маја нису могле инфилтрирати и задржати у сливовима, него су се створили услови за концентрацију површинских вода у речним долинама и речним коритима, то је изазвало појаву поплава у многим регионима. Поплаве су проузроковале велике материјалне штете, губитке људских живота, уништење сточног фонда и деградацију животне средине. Велика количина падавина покренула је многа клизишта, настала су оштећења путева и мостова, оштећења привредних, стамбених и других објеката. Ова појава је окарактерисана као екстремна елементарна метеоролошка непогода (Ђековић, В. *et al.*, 2015/a).

О катастрофалним поплавама на Балкану 2014. године извештавали су сви светски медији, а Влада Републике Србије је прогласила ванредну ситуацију на целој територији државе.

Након хладног и кишовитог времена, које је владало изнад Србије у периоду од 3. до 5. маја 2014. године, наступила је стабилизација времена у трајању од 7 дана. Из дана у дан температура је расла, 12. и 13. маја достигла је вредности између 18°C и 25°C.

До продора хладног ваздуха 12. и 13. маја, дошло је преко западне Европе и области Алпа који је условио стварање циклона "Тамара". Релативно високе температуре условиле су интензивно испаравање са копна, шумских и водених површина. Хладни висински слојеви ваздуха стварали су услове за поновну кондезацију и изливање падавина на исту површину. Тако да је циклон практично генерисао влагу од сопствених падавина. Интензивни процеси у циклону условили су захватање велике хоризонталне површине дебљине до 100 km (Ђековић, В. *et al.*, 2015/a; 2015/6.).

На планинама изнад 1200 m падао је снег, формиран је снежни покривач: Бјелашница 65 cm, Копаоник 61 cm, Ханпијесак и Голија 25 cm (РХМЗ-Србије).

На основу процене штета од катастрофалних поплава, Комисија „Европске банке“, за обнову и развој (EBRD) проценила је штете у Србији на износ 1,5 до 2 милијарде евра. Штета коју је Србија претрпела у поплавама била је већа од 2,7% бруто националног дохотка, а у губицима од посредних штета 2,0%. У поплавама је угрожено 39 општина, односно 1.643.832 становника, евакуисано је укупно 31.879 грађана, срушено је или потпуно уништено 1.763 објекта, поплавлјено је 2.260 објекта, без Обреновца.

Влада Републике Србије проценила је да су поплаве, одрони и клизишта, оштетиле око 4.500 km путева и 250 мостова. Штету је претрпела и свака десета фирма, односно 37.000 предузећа. Само у РБ „Колубара“ штете су процењене на 100 милиона евра, поплавлјени су површински копови „Западно поље и Велики Црљени“. Поплавлјено је 80.000 хектара ораница, што је два одсто укупно обрадивог земљишта у Србији (Зарић, М., 2014).

2. МЕТОДОЛОГИЈА РАДА

За истраживање утицаја повећаног интензитета падавина од 15. до 16. маја 2014. године на појаву великих поплава широких размера у Колубарском региону, коришћена је методологија експерименталних сликова. У карактеристичним зонама доњих, средњих и горњих токова, регистровани су екстремни протицаји и извршена, оцена утицаја на појаву поплава у низводном делу сликова као и њихова имплементација на појаву поплава у Колубарском региону Србије.

Као материјал за писање овог рада, коришћени су подаци РХМЗ Србије и теренски истражни радови аутора за време поплава и непосредно после проласка поплавног таласа.

Циљ овог рада био је истраживање утицаја катастрофалних поплава на привредни развој региона и реконструкција поплавног таласа на рекама: Колубари, Пештану, Бељаници и Барајевској реци 14-16. маја 2014. године. За реконструкцију поплавног таласа примењена је комбинована метода заснована на траговима великих вода и рачунском тарирању пропусне способности речних корита преко програма „Нес-Ras“.

Да би модел био применљив неопходна су била обимна теренска мерења, током трајања поплава и после проласка поплавног таласа. Примењене су следеће методе:

- експериментално истраживање на водотоцима и у сливовима;
- истраживања карактеристика сливова (начин коришћења земљишта, топографских карактеристике сливова);
- директно регистровање нивоа воде на протицајним профилима водотока у периоду поводња, 15. маја 2014. године, на свим водотоцима, на основу снимљеног видео материјала, регистроване су коте велике воде у профилима;
- лоцирање мерних профила, на експерименталним деоницама, после проласка поплавног таласа.

За даљу анализу, улазне податке чине резултати директног геодетског снимања протицајних профила до коте трагова поплавног таласа. За снимање су коришћени геодетски инструменти: нивелир, тотална станица и дистомат „ТОРCON 3100М“. Резултати анализа публиковани су у радовима истих аутора (Ђековић В., и др. 2015.а; 2015.б; 2015.в.).

3. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ДИСКУСИЈА

Слив Колубаре обухвата 4,12% укупне површине Србије. Површина слива ове реке на ушћу у Саву износи 3.638,47 km², док је дужина тока око 123 km. Највиша кота у сливу је 1.346 m, а најнижа 73 m. Висинској зони до 300 m надморске висине припада удео површине слива од око 68% површине. Број становника у општинама Колубарског региона је око 325.000.

Табела 1. Основни подаци о истраживаном подручју (извор: оригинал)

Table 1 Basic data on the study area (source: original)

Водотоци	Укупна Површина слива	Укупна дужина тока	Површина слива до експериментал- не деонице	Дужина тока из- лазног профила експерименталне деонице	Просечан пад тока на екс. деониц.	Протицај велике воде
	km ²	km	km ²	km	%	m ³ •s ⁻¹
Колубара	3638,50	123	330,27	28,50	0,0873- 0,2505	450,00
Бељаница	454,30	48,85	454,30	48,85	0,0736-0,355	400,00
Пештан	172,00	33	172,00	33	0,0145-0,074	370,00
Барајевска	65,85	37,7	39,056	29,00	0,1826- 0,2808	145,00

У табели 1 приказани су основни морфолошки параметри истражива-

них водотокова из слива реке Колубаре.

Статистичким анализама вероватноће појаве падавина већег интензитета за слив Колубаре дошло се до сазнања да се интензитет падавина креће у границама приказаним у табели 2. Падавине појаве 0,01% су реда величина 194 mm, међутим, у периоду од 14. до 16. маја пало је у Степојевцу 293.50 mm, у Љигу 229.50 mm, на Убу 227,2 mm (табела 3). Ови подаци мерења указују да се догодила елементарна непогода вероватноће појаве 0,001%. Непогода је изазвала огромна разарања и плављења, а имала је и далекосежне последице на захваћени регион. Слабљење и нестанак циклона почео је 16. маја 2014. године (РХМЗ-Србије).

Табела 2. Меровдавне рачунске кише за анализирано подручје (извор: оригинал)

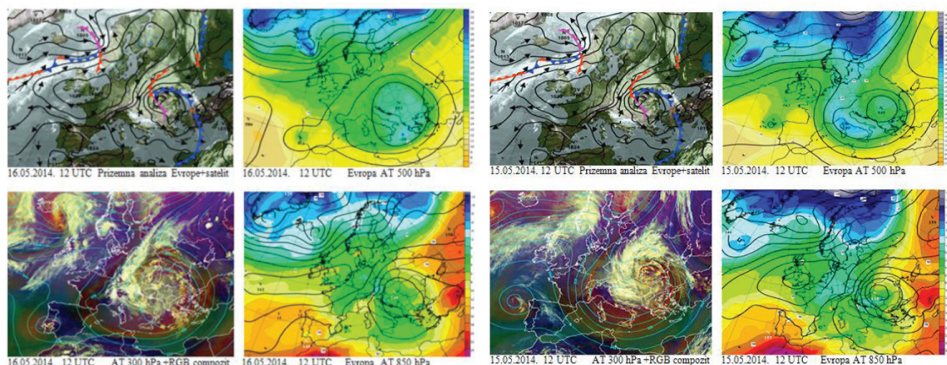
Table 2 Relevant rainfall values for the study area (source: original)

МЕРОДАВНЕ РАЧУНСКЕ КИШЕ ЗА ПРОРАЧУН ВЕЛИКИХ ВОДА			
№	Вероватноћа %	Повратни период	$H_d(p)$ [mm]
1.	0,01	10 000	194,00
2.	0,1	1000	137,00
3.	1	100	93,80
4.	2	50	82,00
Параметри расподеле: $P=1,599$ $C=0,086$ $C=0,527$			

У табели 3 приказане су измерене количине падавина од 14. до 18. маја 2014. године, које је вршио РХМЗ Србије, на метеоролошкој станици Ваљево, кишомер Степојевац, у периоду од 14. до 18. маја измерено је 293,5 mm падавина. Количина падавина за подручје слива реке Колубаре превазилази појаву једном у 10.000. година, а која према статистичкој вероватноћи појаве износи $N_{0,01\%} = 194$ mm. таб. 2.

На сателитском снимку (слика 1) види се синоптичка ситуација изнад Европе и северног Атлантика за дан 15. и 16. мај 2014. године, из кога су настале олујне падавине и формирање циклона.

У овом раду приказани су сумарни подаци реконструкције поплавних таласа, на свим водотоцима који су се појавили од 14. до 16. маја 2014. године. За анализу су коришћене диференцијалне једначине неједноликог течења у деформабилном протицајном профилу преко разрађеног компјутерског програма „Нес-Ras“, са обимним геодетским мерењима на свим водотоцима. Обиље притока и дуготрајна снажна циклонска активност створиле су коинциденцију појаве великих вода на свим притокама Колубаре. У доњем току водотока настале су незабележене поплаве са далекосежним последицама по привреду и друштво, потопљен је површински угљенокоп „Тамнава западно поље“ и „Велики Црљени“ (слика 2) (Ђековић, V. *et al.*, 2013).



Слика 1. Синоптичка ситуација изнад Европе и северног Атлантика за дан 15. и 16.05.2014. године (www.chmi.cz/portal/, www.eumetrain.org/)
Figure 1 Synoptic situation above Europe and the North Atlantic on May 15th and 16th 2014 (www.chmi.cz/portal/, www.eumetrain.org/)

Табела 3. Подаци о падавинама у непосредној близини слива Колубаре (извор: PXM3. PC)

Table 3 Data on rainfall in the immediate vicinity of the Kolubara River basin (source: RHMZ.RS)

Н ⁰	Подручје ГМС	Назив Станице	Подаци о падавинама за три дана у (mm)			
			14.5.2014	15.5.2014	16.5.2014	за три дана
1	Ваљево	Степојевац	23.60	185.10	84.80	293.50
2	Ваљево	УБ	61.20	114.8	51.20	227.20
3	Ваљево	Љиг	31.00	125.00	73.50	229.50

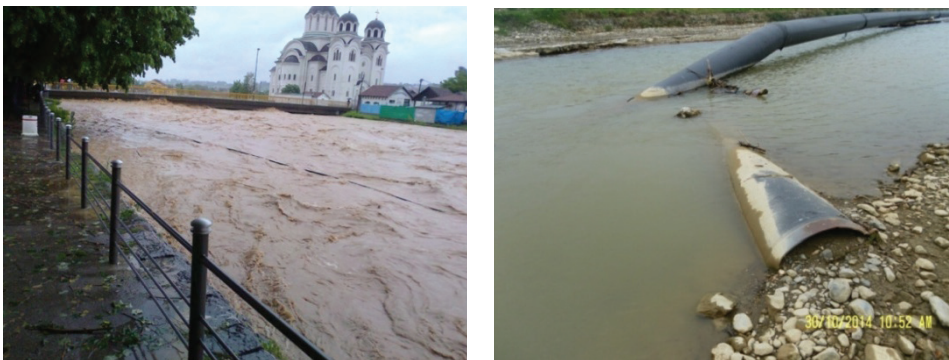
Протицаји на водотоцима пратили су интензитет падавина. Зато је у завршној анализи за водоток Колубара у градској зони узводно од ушћа реке Градац коришћен податак о протицају великих вода појаве 0.1%, $Q = 450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, за слив реке Пештан $Q = 370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, за слив реке Бељанице $Q = 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, за слив Барајевске реке $Q = 145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

3.1. Резултати прорачуна реконструкције поплавног таласа Колубаре

На многим деоницама градских и приградских насеља СО Ваљево дошло је до огромног разарања дна и обалоутврда регулације, а поплављена су приградска насеља како и центар Ваљева, и у коинциденцији са другим притокама Колубаре поплављена су приградска насеља града Лајковца, површински копови Тамнава и градови Ваљево, Лазаревац и Обреновац. Аутори овог рада су 15. маја 2014. године регистровали нивое воде реке Колубаре у Ваљеву (слика 2) као и на многим профилима Колубаре низводно од Ваљева снимајући видео запис о поплавама. Након проласка поплавног таласа извршена су геодетска снимања попречних профила корита, од стране геодетске службе предузећа „Инграп – Омни“ из Ваљева.

За хидрауличку анализу протицаја великих вода коришћена је диференцијална једначина [1] неједноликог течења. Током трајања поплавног таласа димензије протицајних, (попречних) профила су се стално мењале као и

остали морфолошко–хидраулички параметри тока, са неуједначеним коефицијентом рапавости дуж водотока и по контури оквашеног обима протицајног профила. Такође, дуж тока настали су преломи у паду нивелете дна. Разлог за ову појаву су повећани тангентијални напони који су разорили дно регулисаног корита.



Слика 2. Регистровани ниво велике воде, оштећен магистрални цевовод у Ваљеву (фото: А. Анђелковић)

Figure 2 The registered level of high water, damaged main pipeline in Valjevo (photo: A. Anđelković)

Из левог форланда „ишчупан“ је магистрални цевовод па су оштећења регулације била много већа од очекиваних (слика 2). Програм „Нес–Ras“ је разрађен на основу диференцијалне једначине неједноликог течења, преко програма је вршена реконструкција поплавног таласа на свим водотоцима:

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

Где су:

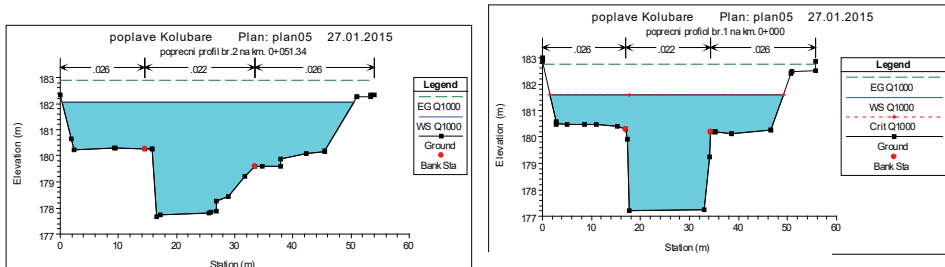
ΔZ – денивелација нивоа воде на укупној дужини водотока од профила до профила, K – средња вредност модула протицаја, $K = \frac{1}{n} \cdot AR^{2/3}$, V_u^2 и V_n^2 – брзина протока у узводном и низводном профили (од профила до профила).

Применом програма „Нес–Ras“ извршено је тарирање пропусне способности корита до регистрованих кота велике воде, као на профилима 3, 5 и 6 (слика 3).

С обзиром на то да су поплаве у мају 2014. године оцењене као елементарна непогода са катастрофалним последицама и незабележене у задњих 100 година, од када се воде метеоролошка осматрања (РХМЗ–Србије).

Тарирање модела вршено је, за протицаје: $Q=300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q=370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q=400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $Q=450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. За протицај од $Q=450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ добиле су се регистроване коте нивоа велике воде на терену. Завршна хидрауличка анализа за све профиле са протицајем од $Q=450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, приказана је у табелама 4 и 5.

Анализом дефинисани су многи параметри дуж истраживане деонице водотока и приказани у табелама 4 и 5.



Слика 3. Снимљени протицајни профили реке Колубаре „Нес-ras“, са нивом воде у поплавном таласу

Figure 3 Recorded discharge profiles of the Kolubara River, in 'Hec-Ras' with the water level in the flood wave

Табела 4. Хидраулички параметари «Нес-ras» река Колубара протицај $Q_{\max} = 450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (извор: оригинал)

Table 4 'Hec-Ras' hydraulic parameters for the Kolubara River discharge $Q_{\max} = 450 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (source: original)

Profile	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	m^2	m		$kN \cdot m^{-2}$
4	178,12	182,65	3,79	183,07	0.000873	3,35	172,08	55,61	0.52	0.4171
3	177,85	182,41	4,21	183,00	0.001438	3,92	142,70	49,71	0.64	0.4633
2	177,68	182,06	4,58	182,89	0.002039	4,54	124,24	50,13	0.75	0.1865
1	177,20	181,61	5,29	182,74	0.002505	5,09	109,43	47,69	0.79	0.6190

Због успора од реке Градац на профилу 1. km 0+000,00 и профилу 2. km 0+051,34 догодила су се изливања воде из регулисаног корита Колубаре. Регистроване дубине воде у овим профилима су 4,54 m, и 5,09 m. На овим профилима је дошло до „чупања“ магистралног цевовода из форланда Сл. 2.

У табелама 4. и 5. приказани су резултати хидрауличке анализе, може се запазити да је режим течења на експерименталној деоници миран ($F_r < 1$), док су средње брзине тока биле у дијапазону $V_{sr} = 3,35 - 5,09 \text{ m}^1 \cdot \text{s}^{-1}$. Тангентијални напон по дну тока ($\tau_0 = 0.1865 - 0,619 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$). Вредност критичног тангентијалног напона за фракције вученог наноса 50– 100 mm. са тарираном константом „Shildsa“ је у дијапазону.

$$(\tau_{cr} = 0.0279 - 0.05592 \cdot kN \cdot m^{-2})$$

На основу прорачуна може се закључити да су деформације регулисаног корита лоциране претежно на низводном сектору деонице ван градске регулације водотока. Без обзира што је био миран режим течења, у кориту водотока су се догодиле огромне морфолошке промене, због повећаних вучних сила тока које су се кретале у дијапазону 20,66 – 82,27 N/m^2 (табела 5).

Табела 5. Резултати хидрауличног прорачуна „Hec-Ras“ План: 05 водоток Колубара, сектор Ваљево Деоница 01. на км 0+000 до 0+147,66 (извор: оригинал)

Table 5 Results of hydraulic computation by `Hec-Ras` Plan: 05 Kolubara watercourse, Sector Valjevo, Section 01 at km 0 + 000 to 0 + 147.66 (source: original)

„Hec-Ras“	Profil 1			Profil 2			Profil 3			Profil 4		
<i>Elementi</i>	<i>Left OB</i>	<i>Cha</i>	<i>Rig OB</i>	<i>Left OB</i>	<i>Cha</i>	<i>Rig OB</i>	<i>Left OB</i>	<i>Chan</i>	<i>Rig OB</i>	<i>Left OB</i>	<i>Chan</i>	<i>Rig OB</i>
<i>Wt. n-Val</i>	0,026	0,022	0,026	0,026	0,022	0,026	0,026	0,022	0,026	0,026	0,022	0,026
Reach Len (m)				51,40	51,34	51,20	50,00	49,06	50,20	47,55	47,26	47,10
Flow Area m²	17,00	73,06	19,37	23,58	69,71	30,94	36,78	68,01	37,91	43,73	75,90	52,45
Area m²	17,00	73,06	19,37	23,58	69,71	30,94	36,78	68,01	37,91	43,73	75,90	52,45
Flow (m³/s)	34,35	372,0	73,58	55,52	316,4	78,10	88,23	266,5	95,21	88,14	254,61	107,24
Top Width (m)	15,39	17,31	14,99	14,23	18,86	17,04	16,23	17,60	15,88	17,19	17,80	20,62
Avg Vel m · s⁻¹	2,02	5,09	2,25	2,35	4,54	2,52	2,40	3,92	2,51	2,02	3,35	2,04
Hydr Depth (m)	1,11	4,22	1,29	1,66	3,70	1,82	2,27	3,86	2,39	2,54	4,26	2,54
Conv m⁵ · s⁻¹	686,3	7434	870,7	1229	7006	1729,5	2326	7030	2511	2983,0	8616,7	3629,3
Wetted Per.(m)	15,81	21,82	15,32	14,94	21,21	17,67	17,43	19,83	16,78	18,52	19,23	21,73
Shear (N/m²)	26,41	82,27	31,05	31,56	65,74	35,03	29,75	48,35	31,86	20,22	33,80	20,66
Share (N/m.s)	2670	0,00	0,00	2585	0,000	0,000	2418	0,00	0,00	2681,16	0,00	0,00
Cum Vol. 1000 m³				1,04	3,67	1,29	2,55	7,04	3,02	4,47	10,44	5,14
Cum SA1000 m²				0,76	0,93	0,82	1,52	1,82	1,65	2,32	2,66	2,51



Слика 4. Дно корита реке Колубаре и оштећен магистрални цевовод (фото: А. Анђелковић)

Figure 4 The bottom of the Kolubara riverbed and the damaged main pipeline (photo: A. Anđelković)

3.2. Резултати прорачуна реконструкције поплавног таласа реке Пештан

Експериментална деоница, за одређивање карактеристичног протицаја великих вода током поплава маја 2014. године, налази се у доњем току реке Пештан, узводно 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. У зони ушћа реке Пештан у Колубару и низводно до ушћа Бељанице настале су незабележене поплаве, са далекосежним последицама по привреду и друштво, потопљен је површински угљенокоп „западно поље и Велики Црљени“ (слика 5).

Процењује се да се у ова два површинска угљенокопа излило: у „Западном пољу“ $W = 187.30$ милиона m³ са максималном дужином воде $N=66,4$ m, а у површинском копу „Велики Црљени“ $W = 27.5$ милиона m³ воде, максимална дубина у овом копу била је $N=28,90$ m. У извештају бироа површински копови „Тамнава“ наводи се површина воденог огледала на Западном пољу $P = 7.44$ km² а Велики Црљени $P = 2.27$ km². 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 5). Дубина воде у потопљеном граду Обреновцу је била у просеку преко 2,5 m.

На слици 5 може се видети 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 5. Прегледна ситуација поплавлених копова са багером глодаром
Figure 5 The sight of the flooded pits with a ferris wheel excavator

Седам месеци касније 26. децембра 2014. године покренута је производња угља на копу Велики Црљени. Вода је непрестано (дан и ноћ) испумпавана из језера у корито реке Колубаре. До овог датума је испумпано 129,4 милиона m³ воде и оборен је њен ниво за 23 m. Спуштањем нивоа, из воде је „изронило“ пет багера-глодара, погонске станице и трачни транспортери.

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, па су зато промењиве димензије протицајних профила. Утицај геомеханичке структуре материјала из протицајног профила водотока указује на могућу појаву деформација у дну и обалама за време трајања поводња (слика 6).

Према Главном пројекту, за регулацију Пештана у зони ушћа, прорачунате су велике воде $Q_{1\%}=160 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, док су воде $Q_{0,1\%}=277 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Током мајских поплава 2014. године, количина атмосферских падавина прелази значајно, количину падавина вероватноће појаве 0,01% (194 mm: 293,50 mm). За тарирање пропусне способности корита према траговима великих вода урађено је више серија прорачуна са различитим протицајима, све док се нису добиле коте велике воде регистроване на терену (слика 6).

Корито реке Пештан пропушта протицаје без изливања из основног корита веће од $Q_{0,1\%} = 277,093 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, уколико се не узиме 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 93,64 m (слика 7).

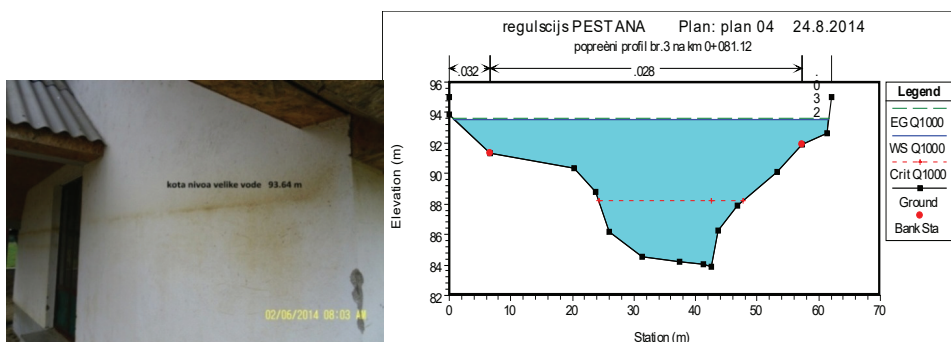
Тарирани модел је показао врло прецизно да је максимални протицај реке Пештана 15 - 16. маја износио $Q=370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Протицај од $Q=370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ је ређе вероватноће појаве од 0,1%.

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. Детаљнија анализа протицаја великих вода у поплавном таласу приказана је у раду (Ђековић, B. *et al.*, 2015/6).



Слике 6. Протицајни профили бр. 3 и 4. реке Пештан после проласка поплавног таласа (фото: А. Анђелковић)

Figure 6 Discharge profiles 3 and 4 of the Peštan River after the flood wave (photo: A. Andjelković)



Слика 7. Траг велике воде на ушћу Пештана у Колубару кота 93,64 *m* и модел истог профила “Hec - Ras” (фото: А. Анђелковић)
Figure 7 High water mark at the mouth of the Peštan River into the Kolubara at 93.64 *m* and ‘Hec - Ras’ model of the same profile (photo: A. Andjelkovic)

Табела 6. Приказ хидрауличких параметара „Hec-Ras“ за протицај

$Q_{\text{max}} = 370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (извор: оригинал)

Table 6 ‘Hec-Ras’ hydraulic parameters for discharge $Q_{\text{max}} = 370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (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 ^o	m	m	m	m	m/m	m/s	m ²	m		kN.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

У табели 6. приказани су резултати хидрауличке анализе. Може се запазити да је режим течења на експерименталној деоници миран ($F_r < 1$), док су средње брзине тока биле у дијапазону $V_{sr} = 2,58 - 3,64 \text{ m}^1 \cdot \text{s}^{-1}$, истовремено дубине воде по профилима крећу се у дијапазону 6,14 - 8,56 *m* док је тангенијални напон по дну тока ($\tau_0 = 0.0438 - 0,2478 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$). Вред-

ност критичног тангентијалног напона са тарираном константом „Shildsa $\theta = 0,0478$ “ је у дијапазону ($\tau_{cr} = 0.04149 - 0.0826 \cdot kN \cdot m^{-2}$). На основу тога може се закључити да су деформације протицајног профила лоциране дуж целог сектора експерименталне деонице Пештана.

3.3. Резултати прорачуна реконструкције поплавног таласа на реци Бељаници

Површина слива реке Бељанице са својом највећом притоком Туријом износи 454,10 km², извире на Космају на коти 445 m, као поток под називом Велика Тресија, спаја се са реком Малом Тресијом и одатле тече као река Турија. Од важнијих притока испод села Миросалци на km 35 + 450 са леве стране се улива поток Турија. На km 20 + 500 са десне стране прима Сибничку реку, а код села Сибница Турија се улива у Бељаницу. Од тог дела Бељаница тече до ушћа регулисаним коритом и без притока. Директне притоке реке Бељанице у изворишном делу, су: на km 13 + 400 од састава са Туријом код села Бељина, улива се Стојничка и Губеровачка река. На km 11 + 400 прима са десне стране поток Буљковац, на km 7 + 880 улива се Барајевска река, на km 3 + 360 са десне стране улива се река Опарна и на km 1 + 780 са леве стране улива се Сеона. Обиље притока у условима изражене коинциденције створиле су услове за поплаве широких размера. Бељаница, Пештан и Колубара у зони колубарских копова поплавиле су површинске копове Велики Црљени и Западно поље. Експериментална деоница на реци Бељаници на којој су вршена снимања и реконструкција поплавног таласа налази се у доњем току на деоници km 0+000 ушће у Колубару до 1+500 km. снимљено је укупно 33 профила помоћу геодетских иструмената, а на основу регистрованих трагова великих вода накнадно је извршено тарирање пропусне способности речног корита.

За све притоке Бељанице карактеристично је да у доњим токовима и плавним деловима имају развијене речне долине, у приобаљу се развија интензивна пољопривредна производња и сеоска насеља. Подужни падови су им релативно мали речни токови меандрирају, мењајући трасу свог тока. Бељаница од ушћа Турије до ушћа у реку Колубару има дужину 13,4 km, са просечним падом дна корита око 3,91‰. У доњем току реке Бељнице, 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, па су зато промене димензије протицајних профила. Утицај геомеханичке структуре материјала из протицајног профила водотока указује на појаву деформација у дну и обалама током трајања поводња (Ђековић, В. et al., 2014).

Хидраулички прорачун протицаја великих вода Бељанице у поплавама 15. маја 2014. године и прорачун осталих хидрауличких параметара изведена је преко једначине [1]. Основни параметри водотока који су коришћени у прорачуну су морфолошки параметри протицајног профила дуж експерименталне деонице, и унапред дефинисане (регистроване) коте нивоа велике воде као и траса водотока са коефицијентом отпора по контури оквашеног

обима. Пад дна је дефинисан уздужним профилем водотока, котама и стационажом. Прорачуни су изведенина преко програма „Hes-Ras“ и једначине [1].

Према главном пројекту за регулацију реке Бељанице протицај воде појаве једном у 100 година износио је $Q_{1\%} = 228 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ док је протицај воде вероватноће појаве једном у 1000 година $Q_{0,1\%} = 370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. На основу регистрованих кота великих вода у профилима за време трајања поплава на реци Бељаници и детаљних геодетских снимања попречних профила, после проласка поплавног таласа извршена је серија прорачуна пропусне способности корита, све док се нису добиле тачне коте нивоа воде у мајским поплавама. Протицаји $Q_{1\%} = 228 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ и $Q_{0,1\%} = 370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ се не изливају из протицајног профила водотока док је и протицај од $Q = 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ тачно на регистрованим котама. С обзиром да су протицаји хиљадугодишњих великих вода према главном пројекту за регулацију Бељанице на овом сектору $Q_{0,1\%} = 370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Анализом је установљено да се ове воде ни на једном профилу не изливају из основног корита. Међутим, за време трајања мајских поплава догођала су се изливања и плављења приобаља тако да је део вода текао инундацијама. Слика 8 делимична изливања се догађају само за протицај $Q = 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, а што је знатно више од $Q_{0,1\%}$, па се може закључити да се у поплавном таласу 15. маја 2014. формирао поплазни талас са протицајем већим од $Q_{0,1\%}$.

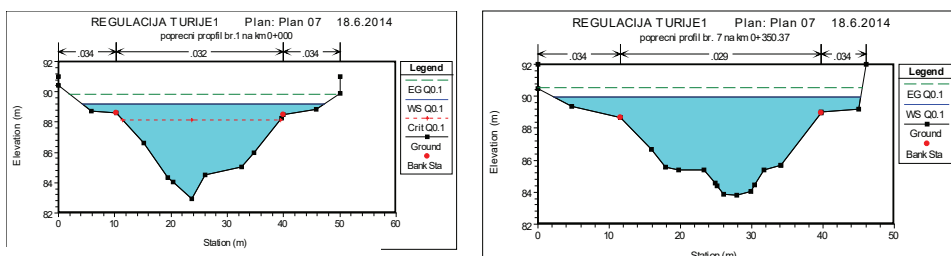
У раду су приказани само неки протицајни профили са котом нивоа воде и линијом енергије тока, и завршне анализе са протицајем од $Q = 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, што указује на обим и величину ове природне катастрофе. На основу Таб бр.1 падавине вероватноће појаве једном у 10000 година износиле су 194 mm. Током циклона „Тамара“ на метеоролошкој станици Степојевац регистровано је $N=293,50 \text{ mm}$ (табела 2).



Слика 8. Изливање воде из основног корита Бељанице током 15. маја 2014, (фото: А. Анђелковић)

Figure 8 Water flooded out of the main riverbed of the Beljanica on May 15th 2014 (photo: A. Andjelković)

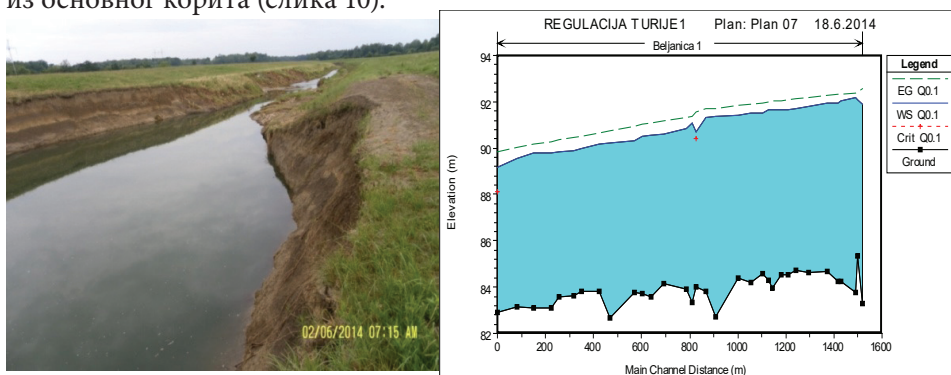
На одабраном профилу бр. 7 km 0+350,37 Сл. 9. се запажа зона изливања велике воде на десној обали са дубином воде од 0,50 m, иста појава регистро-



Слика 9. Профил који су коришћени за тарирање пропусне способности за протицај великих вода „Hec- ras”

Figure 9 The profiles that were used to tare the high water discharge capacity in 'Hec- Ras'

вана је још на неколико профила дуж експерименталне деонице тока. Такође дуж тока се јављају преломи у паду нивелете дна, а такође и изливања из основног корита (слика 10).



Слика 10. Уздужни профил „Hec-Ras“,Изглед протиоцајног профила након поплава (фото: А. Анђелковић)

Figure 10 Longitudinal profile 'Hec-Ras', discharge profile after the floods (photo. A.Andelković)

У табели 7 приказани су резултати хидрауличке анализе, може се констатовати да је режим течења на експерименталној деоници миран ($F_r < 1$), док су средње брзине тока биле у дијапазону $V_{sr} = 2,58 - 3,64 \text{ m}^1 \cdot \text{s}^{-1}$, истовремено дубине воде по профилима крећу се у дијапазону од 6,14-8,56 м док је тангенсијални напон по дну тока ($\tau_0 = 0,0438 - 0,2478 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$) Таб. 7 вредност критичног тангенсијалног напона са тарираним константом „Shildsa“ је у дијапазону ($\tau_{cr} = 0,04149 - 0,0826 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$).

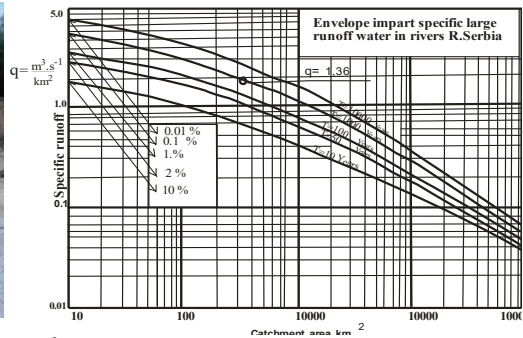
На основу тога може се закључити да су деформације и изливања поплавних вода из протицајног профила лоциране претежно на горњем сектору експерименталне деонице.

Табела 7. Приказ хидрауличких параметара „Нес-ras“ за протицај

$Q_{\max} = 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (извор: оригинал)

Table 7 `Нес-Ras` hydraulic parameters for discharge $Q_{\max} = 400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (source: original)

Profile	Min.Ch.El	W.S.Elev	Wat. depth	E.G.Elev	E.G.Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Wodth	Fraud	Tang. Tens
N ^o	m	m	m	m	m/m	m/s	m ²	m		kN.m ⁻²
33	88.30	91.89	8.56	92.55	0.001926	3.64	115.52	34.05	0.53	0.1886
32	85.34	92.11	6.77	92.42	0.000779	2.61	179.32	56.36	0.38	0.1926
31	83.75	92.17	8.42	92.38	0.000402	2.15	210.33	47.86	0.27	0.2010
30	84.23	92.02	7.75	92.34	0.000736	2.60	172.50	46.61	0.36	0.2019
29	84.26	91.96	7.70	92.33	0.000811	2.90	168.70	45.58	0.38	0.1886
28	84.68	91.95	7.27	92.28	0.000769	2.65	171.32	48.33	0.37	0.0448
27	84.63	91.79	7.16	92.20	0.001026	2.94	150.68	43.40	0.43	0.0438
26	84.71	91.70	6.99	92.14	0.001206	3.04	145.32	45.75	0.46	0.0455
25	84.51	91.67	7.16	92.11	0.000991	3.09	152.55	46.46	0.43	0.0542
24	84.53	91.67	7.13	92.06	0.000939	2.89	157.92	45.87	0.41	0.0468
23	83.95	91.65	7.70	92.03	0.000952	2.77	156.81	46.26	0.41	0.0712
22	84.28	91.67	7.39	91.99	0.000812	2.58	169.69	49.41	0.37	0.0728
21	84.57	91.54	6.97	91.96	0.001054	3.02	153.06	47.49	0.44	0.0677
20	84.22	91.52	7.30	91.90	0.000959	2.85	157.92	46.98	0.41	0.0723
19	84.40	91.40	7.00	91.84	0.001088	3.05	149.14	45.24	0.44	0.0813
18	82.70	91.39	8.69	91.72	0.000772	2.61	167.92	45.54	0.35	0.0705
17	83.81	91.30	7.49	91.69	0.000898	2.82	158.31	46.58	0.40	0.0885
16	83.99	90.71	6.72	91.57	0.003550	4.23	105.24	48.44	0.75	0.1027
15	83.33	91.07	7.74	91.39	0.000770	2.54	168.56	48.99	0.37	0.0827
14	83.95	90.82	6.89	91.34	0.001402	3.25	135.72	46.64	0.49	0.0863
13	84.14	90.59	6.45	91.18	0.001782	3.51	126.69	46.55	0.55	0.0824
12	83.60	90.54	6.94	91.08	0.001562	3.33	132.21	45.71	0.51	0.0874
11	83.74	90.52	6.78	91.02	0.001407	3.18	136.22	48.08	0.49	0.0910
10	83.76	90.32	6.56	90.95	0.001922	3.57	120.88	45.12	0.57	0.0843
9	82.65	90.25	7.60	90.73	0.001613	3.10	135.64	47.74	0.51	0.0847
8	83.80	90.18	6.38	90.65	0.001526	3.06	135.60	47.98	0.51	0.0827
7	83.82	89.96	6.14	90.53	0.001656	3.39	126.50	43.12	0.54	0.2073
6	83.62	89.91	6.29	90.47	0.001610	3.37	129.26	46.35	0.53	0.2105
5	83.57	89.83	6.26	90.35	0.001825	3.23	129.41	46.30	0.55	0.2229
4	83.10	89.80	6.70	90.29	0.001613	3.12	134.95	47.03	0.52	0.2244
3	83.10	89.77	6.67	90.16	0.001152	2.79	151.49	48.28	0.44	0.2438
2	83.15	89.54	6.39	90.05	0.001684	3.24	134.45	46.15	0.49	0.1960
1	82.92	89.18	6.26	89.86	0.002765	3.67	113.38	42.88	0.62	0.2478



Слика 11. Морфолошке промене профила после опадања поплавног таласа, и анvelope специфичних отицаја великих вода на сливовима Србије (Извор: Водопривредна основа РС, 2001)

Figure 11 Morphological changes in the profiles after the flood subsiding and the envelopes of specific large runoff water in the river basins of Serbia (source: Water Management Plan of the RS, 2001)

Без обзира што је био миран режим течења у кориту водотока су се догодиле огромне морфолошке промене због повећаних вучних сила тока. Рачунски модел максималног специфичног отицања, за натпросечне услове влажности позициониран је близу анvelope појаве ($p = 0,1\%$) (слика 11).

3.4. Резултати прорачуна реконструкције поплавног таласа Барајевске реке

Површина слива Барајевске реке на профилу моста у Барајеву износи 39,056 km², стационажа 8+705 km, од ушћа у реку Бељаницу.

Обиље притока у изворишном делу слива Барајевске реке и дуготрајна снажна циклонска активност створиле су коинциденцију великих вода на свим притокама. У доњем и средњем току водотока настале су незабележене поплаве са далекосежним негативним последицама по привреду и друштво, потопљене су приобалне урбане и пољопривредне површине (Ђековић, В., et. al., 2013).

Концентрацијом вода у протицајне профиле водотока формирао се поплазни талас са рушилачким способностима, вучна сила тока без обзира на карактеристике геолошке структуре протицајног профила имала је кључну улогу у откидању и покретању наноса из дна и обала корита.

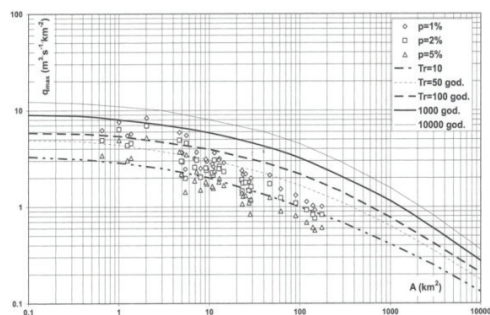
Морфолошке промене речног корита резултат су „ерозије и таложења наноса“ којег водоток периодично покреће, носи или одлаже у протицајном профилу регулисаног или природног водотока. Процес ерозије започиње у фази када атмосферске падавине почињу да се сливају са падина слива (плувијална ерозија) и у тренутку када се формирају први концентрисани токови дуж линија највећег пада, започиње процес флувијалне ерозије (слика 12). Тада се као услов даљих ерозионих појава, јавља енергија формираних токова, која разара структурне агрегате земљишта, поткопава обале, а настали нанос турбулентном снагом тока покреће дуж формираних корита. У вршним деловима сливова, притоке су својом рушилачком снагом иза-

звале оштећења на комуникацијама.

Хидраулички прорачун протицаја великих вода и прорачун осталих хидрауличких параметара изведена је преко диференцијалне једначине неједноликог течења [1]. Основни параметри водотока који су коришћени у прорачуну су морфолошки параметри протицајног профила дуж експерименталне деонице, и регистроване коте нивоа велике воде, као и траса водотока са коефицијентом отпора по контури оквашеног обима. Пад дна је дефинисан уздужним профилем водотока, котама и стационажом.

Хидрауличка анализа обухватила је локалну деоницу водотока у укупној дужини 225 m на којој су прецизно регистровани трагови великих вода. Применом програма „Нес – Ras“ извршен је прорачун пропусне способности корита до регистроване коте велике воде.

Према главном пројекту за регулацију Барајевске реке у зони Барајева, протицај воде вероватноћа појаве једном у 100 година износио је $Q_{1\%} = 55,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, док је протицај воде вероватноће појаве једном у 1000 година $Q_{0,1\%} = 99,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. На основу регистрованих кота великих вода у профилима за време трајања поплава и детаљних геодетских снимања попречних профила, после проласка поплавног таласа извршена је серија прорачуна пропусне способности корита, све док се нису добиле тачне коте нивоа воде у мајским поплавама 2014. године. С обзиром на то да су протицаји хиљадугодишњих великих вода према главном пројекту за регулацију Барајевске реке на овом сектору $Q_{0,1\%} = 99,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Анализом је установљено да се ове воде ни на једном профилу не изливају из основног корита. Изливања се догађају само за $Q = 145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, а што знатно премашује $Q_{0,1\%}$, па се може закључити да се у поплавном таласу 15. маја 2014. формирао поплазни талас са протицајем већим од $Q_{0,1\%}$.



Слика 12. Коинциденција великих вода и специфични отицаји великих вода (за сливове на територији Београда за натпросечним условима влажности) (извор: Хидрологија бујичних токова)

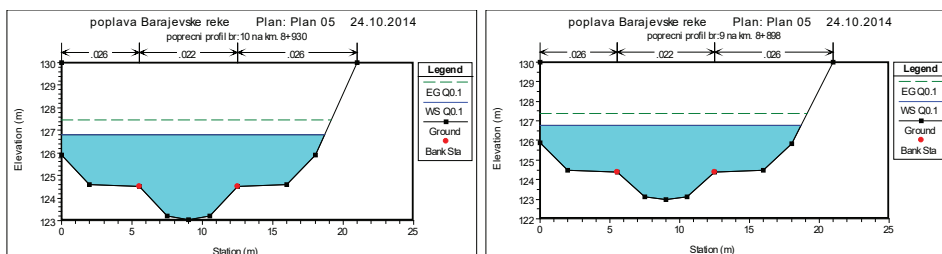
Figure 12 Coincidence of high waters and specific large runoff water (for the basins in Belgrade area with above-average humidity conditions) (source: Hydrology of torrential flows)

На основу анвелопа вероватноће појаве протицаја великих вода при максималном отицају са слива $q = 3,71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$, вероватноћа појаве

великих вода је $> Q_{0.1\%}$.

На основу вероватноће појаве екстремних падавина (табела 2) и стварно регистрованих падавина 14-16. маја 2014. године (табела 2) могло се прелиминарно закључити да су поплаве катастрофалних размера и зато се у завршној анализи користио податак о великим водама појаве $>0.1\%$, $Q = 145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

На одабраном профилу (слика 13) за протицај $Q = 145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, вода се излива из основног регулисаног корита. Запажа се зона изливања велике воде на левој обали од профила бр. 4 са дубином од 0,50 m до 0,85 m у профилима 9 и 10 на левој и десној обали. Иста појава регистрована је још на неколико профила дуж истраживане деонице водотока. Пад дна водотока је уједначен јер је речно корито на овој деоници у доњем току регулисано и обложено ломљеним каменом у цементном малтеру до нивоа средње великих вода. У табели 8. приказани су резултати хидрауличке анализе, може се запазити да је режим течења и на деоници Барајевске реке миран ($F_r < 1$), док су средње брзине тока биле у дијапазону $V_{sr} = 4,02 - 4,65 \text{ m}^1 \cdot \text{s}^{-1}$, истовремено дубине воде по профилима крећу се у дијапазону од 3,48 – 3,78 m, док је тангецијални напон по дну тока ($\tau_0 = 0.2564 - 0,2784 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$).



Слика 13. Профили за тарирање пропусне способности за протицај великих вода “Hec- ras”

Figure 13 Profiles used to tare the discharge capacity of the high water discharge ‘Hec-Ras’

Вредност критичног тангецијалног напона са тарираном константом „Shildsa“ је у дијапазону ($\tau_{cr} = 0.04149 - 0.0826 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$). 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 морфолошке промене и оштећења због повећаних вучних сила тока (табела 8).

На основу тога може се закључити да је водоток у време поплава у мају 2014. године поседовао огромну разорну снагу, способану да покреће и носи ерозиони материјал, и блокове стена крупноће $>0,5 \text{ m}$. Уколико се ради о регулисаном делу водотока где је камена облога са заливеним фугнама у цементном малтеру, тај разорни ефекат се умањило.

Покренути ерозиони материјал из профила водотока и са узводних деоница понашао се као коагулант и преносник многих загађења дуж водо-

тока, тако да после престанка поплавног таласа у свим анализираним водотоцима морају се поплавлени објекти дезинфиковати да би се спречила епидемија (Анђелковић, А. et al., 2013), (Анђелковић, А. et al., 2014).

Табела 8. Хидраулички параметри „Нес-Рас“ за протицај $Q_{max}=145 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$
(извор: оригинал)

Table 8 `Нес-Рас` hydraulic parameters for discharge $Q_{max}=145 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$
(source:original)

Profile	Min.Ch.El	W.S.Elev	Wat. Depth	E.G.Elev	E.G.Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Wodth	Fraud	Tang. Tens
N ^o	m	m	m	m	m/m	m/s	m ²	m		kN.m ⁻²
1	122,51	126,00	3,49	126,81	0,002793	4,60	40,51	19,66	0,84	0,2564
2	122,57	126,05	3,48	126,88	0,002748	4,62	40,08	19,54	0,85	0,2556
3	122,63	126,11	3,48	126,97	0,002808	4,65	39,58	19,00	0,86	0,2556
4	122,69	126,36	3,67	127,04	0,002094	4,19	44,18	19,52	0,75	0,2696
5	122,73	126,30	3,57	127,13	0,002665	4,58	39,89	18,46	0,84	0,2623
6	122,80	126,46	3,66	127,21	0,002434	4,41	41,82	18,79	0,81	0,2689
7	122,86	126,65	3,79	127,28	0,001908	4,06	45,71	19,24	0,71	0,2784
8	122,93	126,69	3,76	127,34	0,001954	4,12	45,04	19,22	0,73	0,2763
9	122,97	126,75	3,78	127,38	0,001826	4,02	45,87	18,67	0,71	0,2777
10	123,05	126,79	3,74	127,44	0,001943	4,10	44,96	18,65	0,73	0,2747

4. ЗАКЉУЧЦИ

Деонице водотока на којима су обављена истраживања, обима и величине поплавних таласа, а који су узроковали плавлeње у Колубарском региону, репрезентативно приказују величину катастрофалних поплава у мају 2014. године. Падавине у време трајања циклонске активности и претходне падавине слабијег интензитета условиле су подизање нивоа подземних вода, zasiћеност земљишта и висок коефицијент отицања. Појава поплава у свим притокама и њихова коинциденција условиле су поплаве у доњем и средњем току Колубаре. Коинциденцијом великих вода на свим притокама, створени су услови за потапање приобалних површина, урбаних насеља, површинских угљенокопа, пољопривредних површина и осталих делова слива.

С обзиром на то да су количине падавина 14 – 16. маја 2014. године, према извештају РХМЗ Србије износиле знатно изнад, падавина појаве 0,01%. На метеоролошким станицама: Пиносава 217,20 mm, Макиш 174,10 mm, Јајинци 217,60 mm, Церак 176,40 mm и Степојевац 293,50 mm, а што превазилази вредност вероватноће појаве 0,01%, за очекивати је било да ће се и протицаји у овом сливу понашати према унапред утврђеним критеријумима. Да би се дефинисала вероватноћа протицаја великих вода у поводњу 14–16. маја 2014. године, извршена су регистравања трагова великих вода на терену у току трајања поплавног таласа. Накнадним геодетским снимањима након проласка поплавног таласа снимљена је морфологија попречних профила, са везом на тригонометријске репере на терену. На свим водотоцима изабране су деонице на којима су регистровани трагови великих вода

и знатна оштећења дна и обала протицајних профила, снимљене су промене морфолошких карактеристика речних корита, као и промене кофицијента рапавости дуж водотока.

На основу једначине бр. 1 по којој је разрађен компјутерски програм за хидрауличке прорачуне (Hes-Ras), извршено је тарирање пропусне способности корита при задатим морфолошким параметрима и коефицијенту рапавости, све док се нису добиле регистроване коте нивоа великих воде на терену у току трајања поводња. С обзиром на то да су унапред дефинисане коте нивоа воде дуж водотока, попречни профили и подужни профили, прорачун је прецизно показао количину воде у поплавном таласу. Хидрауличком анализом је добијен Фрудов број и брзина течења по профилима. Као и многи други параметри, на основу којих се могу извући закључци, о стабилности протицајних 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, установљено је да су речним коритима и речним долинама током трајања поводња, текле воде катастрофалних размера. На основу ове анализе може се закључити да је протицај великих вода у периоду 15 – 16. мај 2014. године био реда величина $> Q_{0,1\%}$. С обзиром да је пројектном документацијом дефинисан степен заштите приобаља на воде претежно појаве $Q_{2\%}$. Након регулационих радова догађале су се сталне промене морфологије протицајних профила са тенденцијом поткопавања и одношења материјала са дна и обала дуж водотока. У међувремену су се димензије протицајних профила вишеструко увећале, тако да данас протицајни профили на свим водотоцима обезбеђују протицај воде $> Q_{1\%}$. Поплавне воде маја 2014. године довеле су до огромних разарања и плавења у доњем току Колубаре, Пештана и Бељанице, а у коинциденцији са осталим водотоцима рекама: *Градац, Љиџ, Тамнава, Тојлица, Ридница, Лукавица*, и др. до потапања површинских копова „Тамнава“, и града Обреновца. Директна штета настала услед катастрофалних поплава које су задесиле Србију 2014. године износиле су 810,1 милиона евра, док индиректни губици износе 661,9 милиона евра, према званичном извештају о процени штете од поплава који је усвојила Влада Србије, а који је презентован на донаторској конференцији у Бриселу 16. јула 2014.

Последице катастрофалних поплава, у мају 2014. године могле су се делимично ублажити, радовима на редовном одржавању регулација, подизању акумулација у сливовима и планском изградњом привредних и стамбених објеката ван плавних зона. Међутим, мајске поплаве превазилазе сва могућа пројектантска решења, и по степену заштите приобаља и меродавним протицајима за димензионисање регулација. Није рационално димензионисати протицајне профиле за воде појаве $> Q_{1\%}$, са циљем заштите пољопривредних површина. Свест обичног човека, тешко може да прихвати чињеницу да се ради о катастрофалним појавама, зато се траже грешке код надлежних органа, а оне не постоје и не постоје оправдане сумње. Морамо да схватимо да се догађају глобалне климатске промене од којих нико није поштеђен, па ни високо развијене земље западне Европе и света.

ЛИТЕРАТУРА

- Александар Анђелковић, Војислав Ђековић, Неђо Милошевић, Јелена Ђековић Керналис, Слободан Миливојевић (2013): Анализа квалитета воде реке Раље, Шумарство 2013, Удружење шумарских инжењера и техничара Србије, Београд
- Анђелковић, А., Ђековић, В., Милошевић, Н. (2014): Контрола квалитета воде и муља палићког језера, Шумарство бр. 3-4, Београд, Удружење шумарских инжењера и техничара Србије, Београд (стр. 44–58)
- Chin, A., Gregor y, K.J. (2005): Managing urban river channel adjustments. *Geomorphology* 69, 28 – 45.
- Ђековић, В., Анђелковић, А., Спалевић, В., Баровић, Г. (2015а): Анализа поплава реке Колубаре у Ваљеву током 2014. године. Часопис Шумарство бр: 3 ДИТ. Србије, Удружење шумарских инжењера и техничара Србије, Београд, стр. 57 – 73
- Ђековић, В., Анђелковић, А., Спалевић, В., Јанић, М. (2015б): Анализа поплава у Србији током маја 2014. године. Часопис Шумарство бр. 4, Удружење шумарских инжењера и техничара Србије, Београд, стр. 49 – 66
- Ђековић, В., Анђелковић, А., Спалевић, В., Миливојевић, С., Милошевић, Н. (2015в): Анализа поплава у сливу Барајевске реке током маја 2014. године. Часопис Шумарство бр. 1–2, Удружење шумарских инжењера и техничара Србије, Београд (стр. 31 – 48)
- Ђековић, В., Анђелковић, А., Милошевић, Н., Спалевић, В. (2014): Реконструкција поплавног таласа на подручју Барајевске реке током маја 2014, Шумарство 1-2, Удружење шумарских инжењера и техничара Србије, Београд (стр. 103 –116)
- Ђековић, В., Анђелковић, А., Милошевић, Н., Гајић, Г., Јанић, М. (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
- Зарић, М. (2014) „Метеоролошка анализа временске непогоде коју је изазвала обилна киша у мају 2014. Године“
- Globevnik, L., Sovinc, A., Fazarinc, R. (1998): Land degradation and environmental changes in the Slovenian sub Mediterranean (the Dragonja river catchment). *Geofkodynamik (Ben-sheim)* XIX, 281 – 291.
- 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 Appraisal Original Research Article *Procedia Engineering*, Volume 70, Pages 1251 – 1260
- Frantar, P., (2013): Floods in the world in 2012 Ministarstvo za obrambo, <http://www.sos112.si/slo/>, 127 – 140
- (2014) РХМЗ – Србије, Извештај о падавинама током циклона „Тамара“, Оперативни хидрометеоролошки билтен, РХМЗ – Србије, 15. мај 2014. године, QF – А – 011, Београд

*Vojislav Đeković,
Aleksandar Anđelković,
Milorad Janić,
Velibor Sapalević*

Summary

The paper presents the results of studying the occurrence of high waters in the Kolubara catchment basin from May 14th to May 16th 2014. The research included field work on recording the high water marks during the cyclone activity and geodetic survey of the morphology of the streamflow profiles after the rain had ceased and the flood subsided. Nearby weather stations provided data on the amount of rainfall. Cyclonic precipitation caused large-scale flooding and created conditions for the simultaneous occurrence of maximum discharges in all tributaries and watercourses of different categories from brooks that dry up in summer months to small and large rivers. In order to get a deeper insight into the conditions that led to the formation of the flood wave, we made field measurements, analyzed the topography of the catchment and studied the way surface runoff was formed in the catchment. We further studied the land use in the catchment and the role of vegetation in capturing rain water and *preventing* 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 surface erosion due to the presence of vegetation. Watercourses were fed by clear and clean water coming from the valleys, and made conditions for channel cutting, bank caving and removal of erosion material along the catchments to the zone of disposal. After the flood cessation, a detailed geodetic survey of the morphology of the watercourse discharge profiles was conducted. The data on the recorded morphological characteristics were used to tare the model and determine discharge in the river beds. The computed discharges were then applied to the discharge envelope curves for the territory of Serbia. The results of these investigation were then used to determine maximum discharges and other hydraulic parameters of the watercourse during the floods, water depths and tractive forces for each profile as well as the mean flow velocity of streamflow profiles using appropriate computer programmes.

This study of the flood wave was aimed at determining the discharge capacity of riverbeds, and thus improve the level of protection of riparian zones from flood waters. These investigations dispelled doubts and dilemmas whether designers had made errors in high water computations, because the flooding that occurred in May 2014 can be characterized as natural disaster with devastating consequences and the probability of occurrence $> 0.1\%$

