

АНАЛИЗА ПОПЛАВА У СЛИВУ БАРАЈЕВСКЕ РЕКЕ ТОКОМ МАЈА 2014. ГОДИНЕ

ВОЈИСЛАВ ЂЕКОВИЋ¹
АЛЕКСАНДАР АНЂЕЛКОВИЋ¹
ВЕЛИБОР СПАЛЕВИЋ²
СЛОБОДАН МИЛИВОЈЕВИЋ³
НЕЂО МИЛОШЕВИЋ¹

Извод: У раду је приказана реконструкција поплавног таласа Барајевске реке, током поплава 15. и 16. маја 2014. године. Истраживања се односе на локацију узводно од насеља Барајево. Реконструкција поплавног таласа извршена је анализом трагова великих вода. Регистравање трагова великих вода извршено је за време поплавног таласа. Снимање морфологије протицајног профила водотока и трасе корита вршено је неколико дана након проласка поплавног таласа. За мерење су коришћени геодеетски инструменти: нивелир, тотална станица и дистомат "TOPCON 3100M". На основу регистрованих трагова великих вода комбинованом методом „Hec-Ras“ одређен је протицај великих вода. Установљено је да је речном долином током трајања поводња протицало $Q = 145 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$. На основу анvelopа великих вода из водопривредне основе Србије 2001. и спроведене анализе у овом раду закључено је, да је протицај великих вода био реда величина $> 0,1\%$. Пројектном документацијом дефинисан је степен заштите приобаља на воде појаве $Q_{2\%}$. Минор корито је обложено док је мајор корито у природном материјалу, у њему су регистроване сталне промене морфологије протицајних профила.

Кључне речи: Барајевска река, реконструкција поплавног таласа, трагови великих вода, бујичне поплаве

ANALYSIS OF THE FLOOD IN THE RIVER BASIN OF THE BARAJEVSKA RIVER IN MAY 2014

This paper presents reconstruction of the flood wave of the Barajevska river during the flooding that occurred on 15 and 16 May 2014. The investigations presented in the paper refer to a location upstream from the town of Barajevo. The flood wave was reconstructed by using the high water marks. The flood marks were registered during the flood on 15 and 16 May 2014. The morphology of the water surface profile and the riverbed route were recorded a few days after the cessation of the flood wave. The following surveying instruments were used for the measurements: a leveler, a total station and a distomat "Topcon 3100M". The discharge of high water was determined on the basis of the recorded high water marks using the 'HEC-RAS' combined method. It was found that during the flood the discharge amounted to $Q = 145 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$. According to the envelopes of high waters from the water

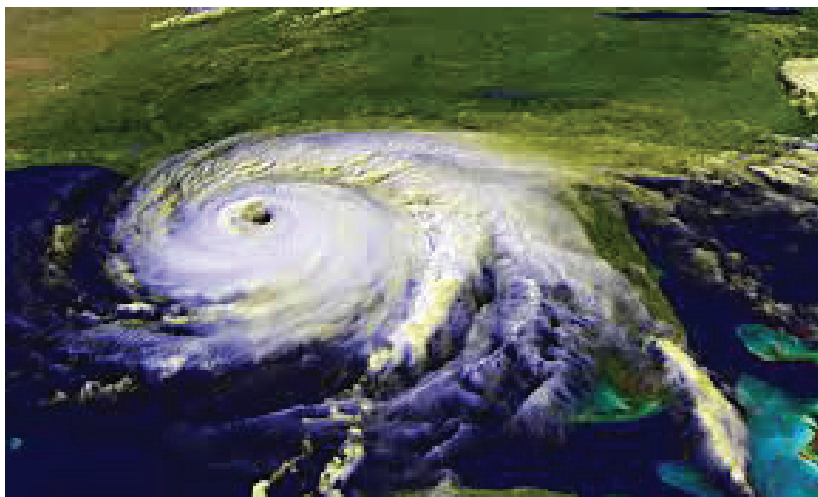
-
- 1 др Војислав Ђековић, ред. проф., Александар Анђелковић, дипл. инж., асистент; Неђо Милошевић, дипл. инж., студент последипломских студија, Универзитет у Београду, Шумарски факултет, Београд;
 - 2 др Велибор Спалевић, Универзитет у Подгорици, Биотехнички факултет, Подгорица, Црба Гора
 - 3 др Слободан Миливојевић, The Institute of Shipping, Navigation and Hazardous Materials, Zetun

management plan of Serbia for 2001 and this study, it can be concluded that the value of the high water discharge was $> 0.1\%$. The project documentation defined the degree of protection of the riparian area against waters of $Q_{2\%}$. Since the minor riverbed was matted and the major bed was in its natural state, constant changes in the morphology of the water surface profile affected the major riverbed.

Keywords: Barajevska river, flood wave reconstruction, high water marks, torrential floods

1. УВОД

Бујичне поплаве спадају у периодичне појаве случајног карактера, кратко трају и имају огромну разорну снагу. Такође, ове поплаве су предвидљива појава, али не и њихов интензитет. Постоји више типова поплава, а у раду је стављен акценат на бујичне поплаве као најучесталију елементарну непогоду у Републици Србији. Бујичне поплаве су најчешће проузроковане обилним падавинама у облику пљускова или наглог отапања снега. Уколико су падавине кратког временског интервала трајања, са екстремним интензитетом, долази до појаве површинског отицања јер земљиште у кратком временском преиоду није у стању да инфилтрира велику количину воде (Williams, P. B., 2001). Покренути ерозиони материјал се енергијом тока креће дуж хидрографске мреже слива до зоне одлагања или акумулације. Бујичне поплаве покрећу огромне количине ерозионог материјала па се често каже да су бујични токови двофазни токови. У том случају се, уз појаву бујичних поплава, може активирати велики број клизишта и одрона, јер вода испирањем глине и колоида смањује везивну способност земљишта (Baker, V.R., 2003).

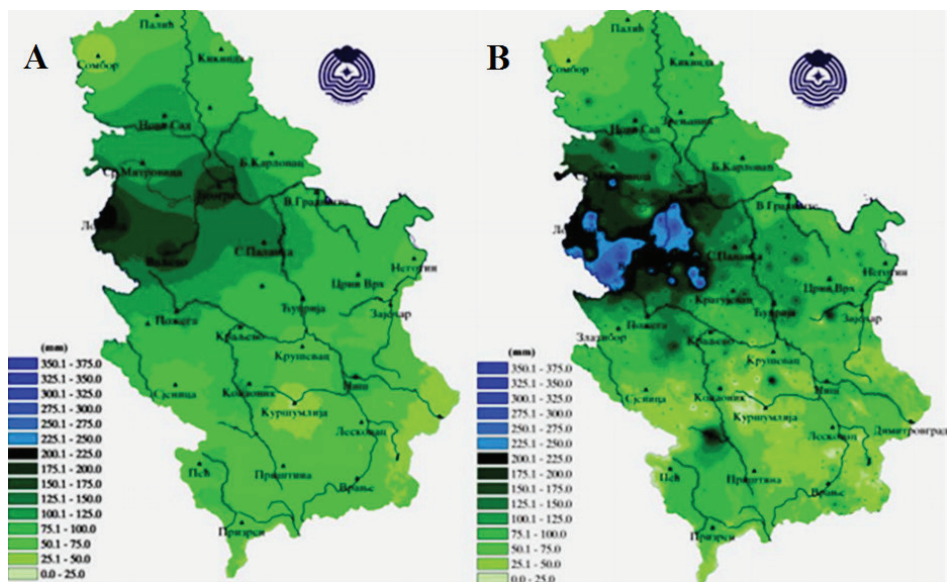


Слика 1. Сателитски снимак циклонске активности на Балкану 13. маја 2014.
(извор: www.google.com)

Figure 1. Satellite image of the cyclone activity in the Balkans on 13th May 2014
(source: www.google.com)

Вучна сила водотокова и разорна моћ поплавних таласа на бујичним рекама омогућава транспорт и премештање крупнијег наноса у низводне деонице слива. Крупан ерозиони материјал причињава велике материјалне штете објектима и представља велику опасност по људске животе (Дјековић, V. *et al.*, 2014). Код бујичних водотокова, поплавни таласи се формирају у кратком временском интервалу (ред величина од највише пар сати, а углавном тај период може бити и краћи). Дефинисање обима и величине поплавног таласа одређено је експерименталним методама на одабраним деоницама водотока (Bettess, R., White W.R., 1987).

Током маја 2014. године дошло је до катастрофалних поплава у региону Балкана. Ове поплаве нису могле да се спрече, нити да се предвиде. Може се рећи да су ове поплаве имале карактер елементарних непогода, са огромним последицама на привреду и друштво, ширих размера. Циклон који је узроковао поплаве на делу Балканског полуострва, назван је “Тамара”. Простирао се на великој хоризонталној површини, вертикалне дебљине до 100 km (слика 1), кроз целу тропосферу (*„Thousands evacuated due to severe flooding in Balkans“* Rs 2014).



Слика 2. Просторна расподела укупних падавина у Србији у периоду 14.05.-16.05. 2014. године, А – главне метеоролошке станице, Б – климатолошке и падавинске станице (извор: RHMZ SR)

Figure 2. The spatial distribution of precipitation in Serbia in the period from 14.05. to 16.05. 2014, A - main meteorological stations, B - climate and precipitation stations (source: RHMZ.SR)

Величина поплава у мају 2014. године превазилази све предвиђене степене заштите приобаља и ова појава спада у незабележене природне катастрофе. На многим водотоцима, поплавни талас имао је ређу појаву од једном у 1.000 година. Поставља се питање да ли су штете могле да се умање?

Последице су могле бити далеко мање, уз бољи и ажурнији начин примене превентивних мера за одбрану од поплава. Најважнији фактор у борби против ерозије и бујица је пошумљеност, која је у Србији незадовољавајућа, испод 27%, као и мали број изграђених акумулација за пријем поплавног таласа и заштиту од поплава низводног сектора (Ђековић, V. *et. al.* 2013). У прилог развоју оваквог поља ниског притиска погодовала је и физичко-географска специфичност Балканског полуострва, састав вегетације и њена очуваност и начин коришћења земљишта (Крстић, М. *et al.*, 2013).

Ванредна ситуација проузрокована поплавама од обилних киша у периоду 13-18. маја 2014. године, у већем делу Србије, северне Босне и источне Хрватске проузроковала је велику материјалну штету на објектима, изгубљени су људски животи, уништен сточни фонд и деградирана животна средина. Влада Републике Србије прогласила је ванредну ситуацију на територији целе државе. Као главни узрок обилних падавина, које су на неким локацијама у Србији и Босни надмашиле трећину укупних годишњих падавина, било је неуобичајено споро премештање дубоког циклона преко Балканског полуострва и Панонске низије.

2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД ИСТРАЖИВАЊА

За реконструкцију поплавног таласа на Барајевској реци коришћена је методологија трагова воде на експерименталним сливовима. У доњем току Барајевске реке, на ограниченом простору регистровани су екстремни протицаји и извршена оцена утицаја на појаву поплава у низводном делу водотока на деградацију корита и приобаља.

Методолошки поступак истраживања реконструкције поплавног таласа у кориту Барајевске реке састојао се у регистровању трагова великих вода, у урбаном делу насеља Барајева, према утврђеној методологији коју су разрадили Јовановић, М., 2008., Chin, A., Gregory, K.J., 2001. Регистровани трагови великих вода на сектору доњег тока послужили су за накнадно геодетско дефинисање морфологије речног корита. Снимањем трагова великих вода одређена је пропусна способности речног корита у дефинисаним морфолошким условима. Теренским радовима регистроване су промене појачаног и попречних профила водотока и зоне поремећаја морфологије речног корита, услед изливања воде из протицајног профила водотока. Такође, вршена су истраживања геомеханичких карактеристика материјала из дна и обала протицајног профила, у циљу сагледавања услова за покретање и транспорт ерозионог материјала у таласу великих вода. Покретање ерозионог материјала има за последицу разарање речног корита и морфолошке промене протицајног профила водотока.

Као радни материјал послужили су подаци теренских истражних радова аутора рада, изведених на простору Барајевске реке, десној притоци реке Бељанице у сливу Колубаре. Аутори су за време трајања поплава регистровали трагове великих вода у протицајним профилима и речној долини водотока. После опадања поплавног таласа великих вода, извршена су геодетска снимања морфологије протицајног профила водотока. За мерење су

коришћени геодетски инструменти: нивелир, тотална станица и дистомат "TOPCON 3100M". Снимљено је 10 профила дуж експерименталне деонице, регистроване су промене морфолошких карактеристика протицајног профила водотока, као и промене коефицијента рапавости дуж водотока и по оквашеном обиму протицајног профила. За реконструкцију поплавног таласа примењена је комбинована метода заснована на траговима великих вода, морфологији корита и рачунском тарирању пропусне способности корита, преко програма „Hes-Ras“. Да би модел био примењив, неопходна су била 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 Барајевске реке, подељено у две фазе:
 - директно регистровање нивоа воде на протицајним профилима водотока у периоду трајања поводња, 15. маја 2014. године;
 - лоцирање мерних профила.
- Теренско рекогносцирање слива, одређивање услова за појаву површинских ерозионих процеса и концентрацију великих вода у главном току.

Задаљу 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 успоравање брзине тока и 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. Накнадна фаза теренских истраживачких радова обухватила је истраживање гранулометријских карактеристика материјала у кориту и обалама водотока, са циљем да се одреде карактеристике критичних и сталних тангентијалних напона по контури оквашеног обима корита при којима долази до мировања или покретања наноса из профила водотока.

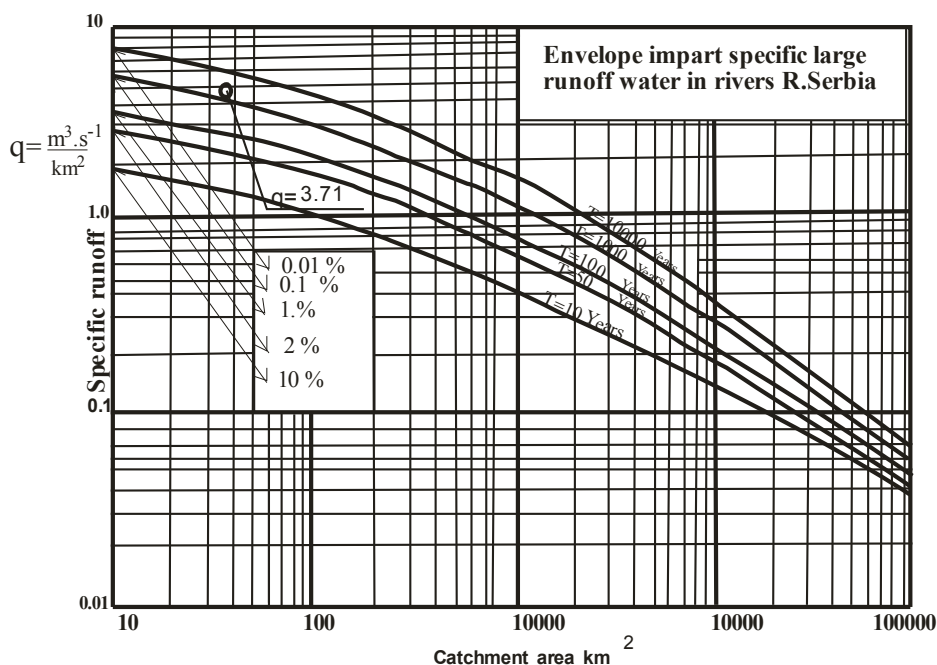
3. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА И ДИСКУСИЈА

3.1. Основне геоморфолошке карактеристике слива Барајевске реке

Барајевска река је десна притока реке Бељанице, која је десна притока Колубаре. Барајевска река настаје спајањем више потока у изворишном делу слива: Хајдучког потока и реке Крчевике, потока Ненадовац, затим левих притока, потока Раковица, Барајевица, Јасеновац и Дубоки поток. На Дубоком потоку налази се истоимена брана и акумулација. Низводно од насеља Барајева, Барајевска река прима Баћевачки поток и, затим, улази у пространу речну долину према Великом Борку и Колубарском Лесковцу. За време мајских поплава 2014. године, у изворишним деловима слива (Хајдучком потоку) регистрован је поплазни талас (слика 7). С обзиром да се ради о вршним деловима слива, где је издвојена површина слива $P=1,62 \text{ km}^2$, коефицијент отицања је већи у односу на укупну површину

слива. Теоријски, као и на основу теренских истраживања, констатовано је да отицање у вршним деловима слива није у сразмери са коефицијентом отицања за цео слив (Летић, Љ. *et al.*, 2014a). Протицај у Хајдучком потоку износио је $Q=15,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, а површина слива $R=1,62 \text{ km}^2$, при томе је пошумљеност слива 83,10% (Ђековић, V. *et al.*, 2014). Рачунски модел максималног специфичног отицања, за натпросечне услове влажности (слика 3) позициониран је између анvelopа појаве ($p=0,1-0,01\%$).

Поред тога што је изворишни део слива Барајевске реке под шумом доброг склопа и покривности, шумски комплекс није умањео врх поплавног таласа, али је заштитио земљиште од површинске и плувијалне ерозије. Током трајања падавина великог интензитета запажено је да из Липовачке шуме дотиче чиста и бистра вода (слика 4), што указује да је вегетација заштитила земљиште од ерозије, али није успела да редукује и умањи количину воде од атмосферских падавина (Летић, Љ. *et al.*, 2014δ).



Слика 3. Анvelopе специфичних отицаја великих вода на рекама Републике Србије, (извор: Водопривредна основа РС 2001)

Figure 3. Envelopes of specific large runoff water in the rivers of Serbia (source: Water Management Plan of the RS 2001)

Са концентрацијом вода дуж линија највећег пада, повећава се њен транспортни енергетски потенцијал за транспорт и покретање постојећих и стварање нових количина ерозионог материјала, у почетној фази то изазива јаружање терена (Нooke, J. M., 2001). 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. Начин коришћења земљишта у сливу има одлучујућу улогу у задржавању и регулисању отицаја (Крстић, М. *et al.*, 2013; Kondolf, G.M. *et al.*, 2002).



Слика 4. Деоница корита на којем су вршена истраживања поплавног таласа (фото: В. Ђековић)

Figure 4. The section of the river bed where the flood wave was studied (photo: V. Đeković)

3.2. Хидрографија

Барајевска река захвата ниско побрђе од Ненадовца, Глумчевог Брда, Липовичке шуме, до Барајева и Великог Борка. У сушном делу године водоток готово да пресушује, а у периоду поводња набуја и плави речну долину (слике 5, 6. и 7).



Слика 5. Поплављено подручје Барајева, Барајевска река, мај 2014. (фото. М. Ковачевић)

Figure 5. The flooded area of Barajevo, Barajevska River in May 2014 (photo. M. Kovacevic)

У протеклих 30 година вршено је више регулационих радова, изградњом насипа дуж главног тока и слива Барајевске реке, у циљу заштите приобаља од изливања великих вода. На свим водотоковима у сливу Колубаре, у мају 2014. године дошло је у равничарским деловима сливова, до изливања великих вода и поплава широких размера. Поплављене површине су претрпеле велику материјалну штету и разарања (слика 9).



Слика 6. Поплављени делови речне долине на сектору низводно од Барајева и извориште Барајевске реке (фото: А. Анђелковић)

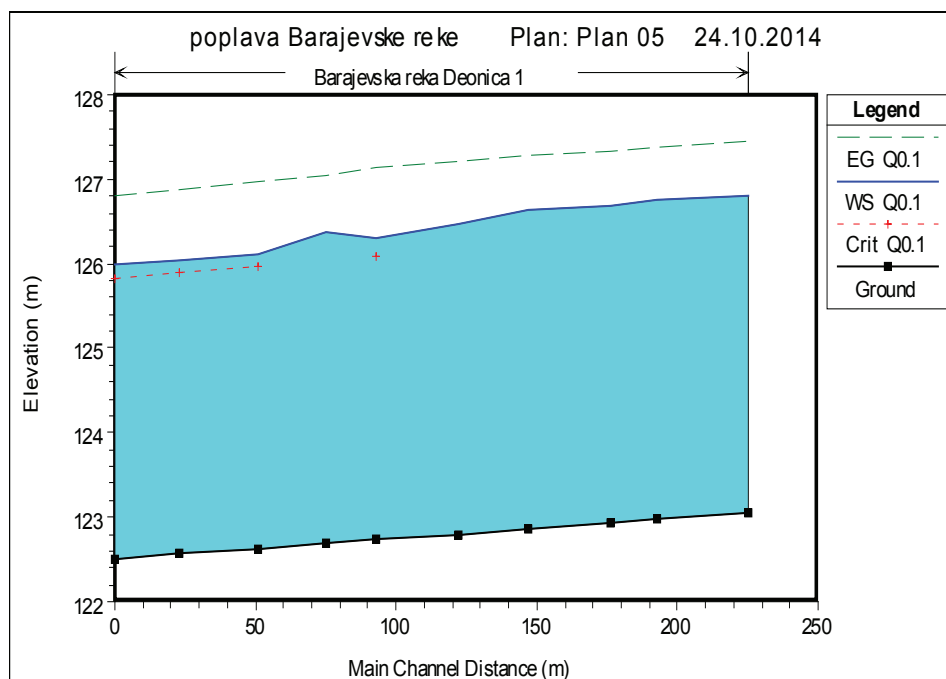
Figures 6. Flooded areas of the river valley on the sector downstream of Barajevo and the source of the Barajevska River (photo: A. Anđelković)

3.3. Карактеристике слива Барајевске реке

Површина слива Барајевске реке на профиле насеља Барајево износи $39,056 \text{ km}^2$, највећа притока је река Крчевица, стационажа на профилу моста у Барајеву је $8+705 \text{ km}$, од ушћа у реку Бељаницу. Обиље притока у изворишном сливу Барајевске реке и дуготрајна снажна циклонска активност створиле су коинциденцију појаве великих вода на свим притокама. У доњем и средњем току водотока, настале су незабележене поплаве са далекосежним последицама по привреду и друштво, потопљене су приобалне пољопривредне и урбане површине (Ђековић, V. *et al.*, 2014). У сливу Барајевске реке, на Дубоком потоку, налази се акумулација која је незнатно ублажила врх поплавног таласа у средњем и доњем току из притоке Дубоки поток (Ђековић, V. *et al.*, 2013). На слици 7 приказан је уздужни профил на експерименталној деоници Барајевске реке у програму „Нес-Ras“. Запажа се уједначен пад дна, при чему се прелом пада дна јавља између профила бр. 5 и 6.

Интензитет атмосферских падавина условио је концентрацију воде у протицајном профилу водотока, што је условило формирање поплавног таласа (слика 8). Вучна сила тока, без обзира на карактеристике геолошке структуре протицајног профила, игра кључну улогу у покретању наноса из обала и са дна корита (Hunt, С.Е., 2000). У таквим условима, речни ток покреће велике количине ерозионог материјала и транспортује га кроз хидрографску мрежу слива (слика 8/6), стварајући деформације протицајног профила водотока (Allen, Р.М. *et al.*, 2002). Морфолошке промене речног корита су резултат „ерозије и таложења наноса“ који водоток периодично

покреће, носи или одлаже у протицајном профилу регулисаног или природног водотока (Surian, N., Rinaldi, M., 2003).



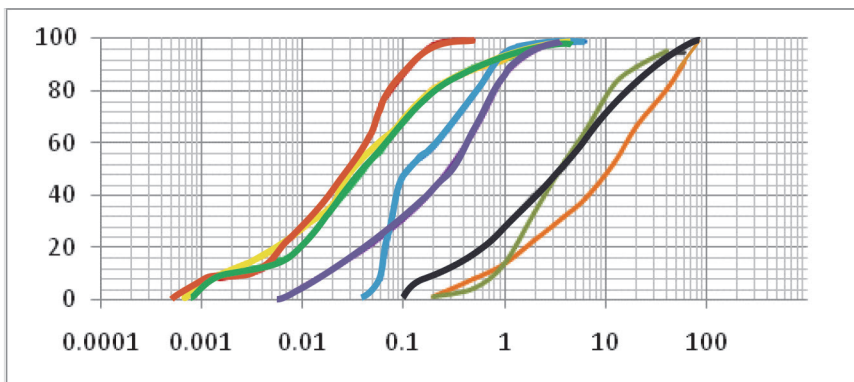
Слика 7. Уздужни профил Барајевске реке на сектору 8+705 km до 8+930 km „Hec-Ras“

Figure 7. Longitudinal profile of the Barajevska river on section 8 + 705 km to 8 km + 930 “Hec-Ras”



Слика 8/а.,8/б. Река Бељаница у коју се улива Барајевска река у време поплава 15. маја 2014. године (фото. А. Анђелковић)

Figure 8 / a., 8 / b. The river Beljanica, with its tributary Barajevska river, during the flood on May 15, 2014. (photo. A. Andjelkovic)



Дијаграм 1. Гранулометријски састава материјала из обала и речног корита
(извор: оригинал)

Diagram 1. Particle size composition of the materials from the banks and the river bed
(source: original)

Гранулометријски састав материјала приказан на дијаграму 1. указује да је структура материјала 50% учешћа у границама од $d_{50\%} = 0,04-10\text{mm}$. То указује да су и критичне вучне силе за покретање материјала из дна и обала у широком дијапазону. Геоморфолошки процес ерозије слива започиње у моменту када атмосферске падавине почињу да се сливају са падина слива по површини (површинска ерозија) и у тренутку када се формирају први концентрисани токови дуж линија највећег пада започиње процес флувијалне (речне ерозије) (Thorne, C.R., Allen, R.G., Simon, A., 1996). Тада се, као услов даљих ерозионих појава, јавља енергија формираних токова која разара структурне агрегате у протицајном профилу водотока, поткопава обале (слика 9), а покренути нанос, турбулентном снагом тока, транспортује дуж формираних корита (Jovanović, M., 2008; Allen, P.M. et al., 2002).

3.4. Реконструкција поплавног таласа

Хидраулички прорачун протицаја великих вода у поплавама од 15. маја 2014. године и прорачун осталих хидрауличких параметара изведени су преко диференцијалне једначине неједноликог течења. Основни параметри водотока, коришћени у прорачуну, су: морфолошки параметри протицајног профила дуж експерименталне деонице, и унапред дефинисане коте нивоа велике воде, забележене на протицајним приофилима за време трајања поплава, као и траса водотока са коефицијентом отпора по контури оквашеног обима. Пад дна је дефинисан уздужним профилем водотока, котама и стационажом:

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

где су:

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

- K - средња вредност модула протицаја;
- V_u^2 и V_n^2 - брзине протицаја на узводном и низводном профилу (од профила до профила);
- ΔL – растојање између профила.

Хидрауличка анализа обухватила је локалну деоницу водотока у укупној дужини 225 m, на којој су прецизно регистровани трагови великих вода, а геодетским иструментима су снимљени попречни профили након проласка поплавног таласа. Применом програма „Hes-Ras“ извршено је тарирање пропусне способности корита до регистроване коте велике воде. (RHMZ-RS, 2014). Према главном пројекту за регулацију Барајевске реке (Koljenšić, A. *et al.*, 1977) у зони Барајева, протицај воде, 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 на Барајевској реци током маја 2014. године, и детаљних геодетских снимања попречних профила, после проласка поплавног таласа извршена је серија прорачуна, пропусне способности корита, све док се нису добиле тачно регистроване коте нивоа воде. С обзиром 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 $Q = 145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, и само тај протицај достиже регистроване коте на траговима у време поводња, а што знатно премашује $Q_{0,1\%}$, па се може закључити да се у поплавног таласу 15. маја 2014 формирао протицај $Q > 0,1\%$.

На основу анvelopа вероватноће појаве протицаја великих вода (Водоприврeнда основа Србије 2001), при максималном секундном отицају са слива $q = 3,71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$, вероватноћа појаве великих вода 15. и 16. маја (слика 3) била је $Q > 0,1\%$. (Ђековић, В. *et al.*, 2014). У раду су приказани сви протицајни профили на којима је дошло до изливања великих вода са котом нивоа воде и линијом енергије тока. Такође су извршене завршне хидрауличке анализе са протицајем од $Q = 145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, што указује на обим и величину ове природне катастрофе. На основу табеле 1, падавине вероватноће појаве једном у 10.000 година износиле су $H=194 \text{ mm}$. Током трајања циклona „Тамара“ на метеоролошкој станици Јајинци (табела 2), која је најближа центру слива, регистровано је $H=217.60 \text{ mm}$ (RHMZ RS 2014).

Количина измерених атмосферских падавина за подручје слива Барајевске реке, током трајања циклонске активности, превазилази појаву једном у 10.000 година, а која према статистичкој вероватноћи појаве износи $H_{0,01\%}=194 \text{ mm}$ (табела 1), док је за подручје Београда у периоду 13-18. маја 2014. године, пало од $H = 176.40 - 217,60 \text{ mm}$. У табели 2. приказани су подаци мерења RHMZ-RS. на метеоролошким станицама у сливу реке Колубаре (RHMZ-RS 2014).

Табела 1. Меровдавне рачунске кише за прорачун великих вода (извор: оригинал)

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

МЕРОДАВНЕ РАЧУНСКЕ КИШЕ ЗА ПРОРАЧУН ВЕЛИКИХ ВОДА			
N ^o	Вероватноћа %	Повратни период	H _d (p)
1.	0,01	10000	194,00 (mm)
2.	0,1	1000	137,00 (mm)
3.	1	100	93,80 (mm)
4.	2	50	82,00 (mm)
Параметри расподеле: P=1,599 C=0,086 C=0,527			

Табела 2. Подаци о падавинама у непосредној близини слива Барајевске реке (извор: RHMZ RS)

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

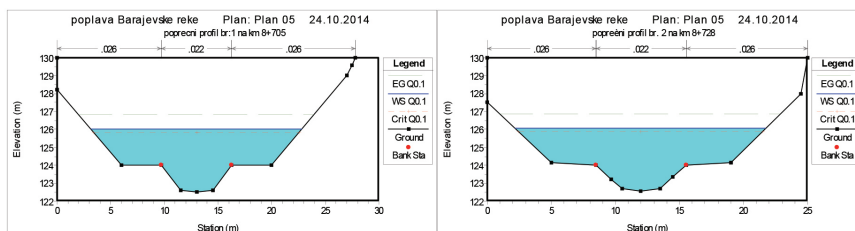
N ^o	Подручје ГМС	Назив Станице	Подаци о падавинама за три дана у (mm)			
			14.5.2014	15.5.2014	16.5.2014	Укупно за три дана
1.	Београд	Пиносава	16.20	129.00	72.20	217.20
2.	Београд	Макиш	31.1	100.80	46.20	178.10
3.	Београд	Јаинци	21.20	148.20	48.20	217.60
4.	Београд	Церак	25.20	104.00	47.20	176.40
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

На основу вероватноће појаве екстремних падавина (табела 1) и стварно регистрованих падавина током 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 $>0.1\%$, $Q = 145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

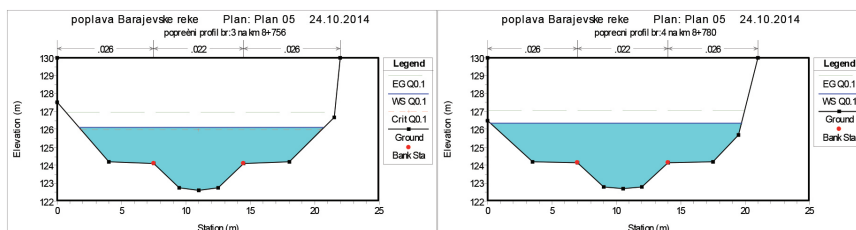
3.5. Тарирање модела и хидраулички прорачун „Нес-Ras“

Тарирање је вршено у више покушаја и у петом покушају су добијени протицаји који достижу мерене коте на траговима великих вода, што је приказано на моделу Нес-Ras (слика 11-15).

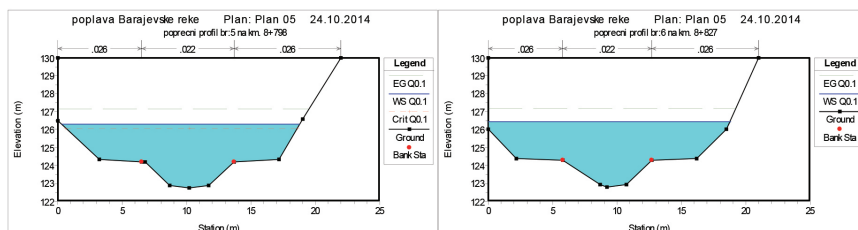
На основу резултата хидрауличног прорачуна може се запазити да се из профила бр. 1, 2, 3, поплазни талас не излива из основног регулисаног корита. Запажа се зона изливања велике воде на левој обали од профила бр. 4, са дубином од 0,50 m, до 0,85 m, у профилу 10 и на левој и десној обали. Вели-



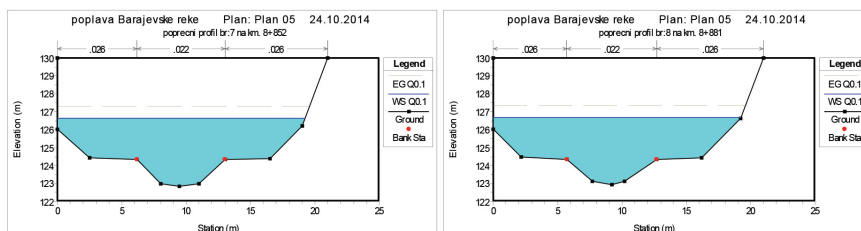
Слика 11. Попречни профили 1. и 2. У програму “Hec-Ras”. (извор: оригинал)
Figure 11. Cross-sections 1 and 2 modelled in 'Hec-Ras' program (source: original)



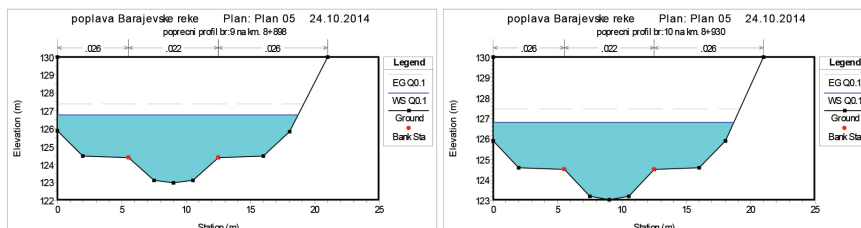
Слика 12. Попречни профили 3. и 4. У програму “Hec-Ras”. (извор: оригинал)
Figure 12. Cross-sections 3 and 4 modelled in 'Hec-Ras' program (source: original)



Слика 13. Попречни профили 5. и 6. У програму “Hec-Ras”. (извор: оригинал)
Figure 13. Cross-sections 5 and 6 modelled in 'Hec-Ras' program (source: original)



Слика 14. Попречни профили 7. и 8. У програму “Hec-Ras”. (извор: оригинал)
Figure 14. Cross-sections 7 and 8 modelled in 'Hec-Ras' program (source: original)



Слика 15. Попречни профили 9. и 10. У програму „Hec-Ras“. (извор: оригинал)
Figure 15. Cross-sections 9 and 10 modelled in 'Hec-Ras' program (source: original)

ке воде су поплавиле речну долину све до пута Ненадовац - Барајево. 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 (минор-корито).

Табела 3. Хидраулички параметри «Нес-Ras» за протицај $Q_{\max} = 145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (извор: оригинал)

Table 3. Hydraulic parameters “Нес-Ras” for discharge $Q_{\max} = 145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (source: original)

Profile	Min.Ch.El	W.S.Elev	Wat. Depth	E.G.Elev	E.G.Slope	Vel Chnl	Flow Area	Top Width	Fraud	Tang. Tens
N^o	M	m	m	m	m/m	m/s	m^2	M		$kN \cdot m^{-2}$
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

У табели 3. приказани су резултати хидрауличке анализе. Може се запазити да је режим течења на истраживаној експерименталној деоници 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 биле се у дијапазону од 3,48–3,79 m, тангентијални напон по дну тока је у границама ($\tau_0 = 0,2564 - 0,2784 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$). Вредност критичног тангентијалног напона са тарираном константом „Shildsa 0,0478“ је у дијапазону ($\tau_{cr} = 0,0478 \cdot g(\rho_s - \rho) d_{sr} = 0,04149 - 0,0826 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$). На основу тога, може се закључити да су деформације протицајног профила лоциране претежно на горњем сектору експерименталне деонице. Без обзира што је био миран режим течења у регулисаном кориту водотока су се догодиле морфолошке промене и оштећења због повећаних вучних сила тока (табела 3, слика 9).

$$(\tau_{cr} = 0,0478 \cdot g(\rho_s - \rho) d_{sr} = \text{kN} \cdot \text{m}^{-2}).$$

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot h \cdot J$$

На основу анализе хидрауличких параметара (тангентијалних напона и критичних тангентијалних напона) могуће је дефинисати крупноћу фракција наноса у протицајном профилу корита, при којима поплазни талас није у стању да их покрене и транспортује дуж водотока:

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot h \cdot J = (\tau_{cr}) = 0,0478 \cdot g(\rho_s - \rho) d_{sr}$$

При максималним дубинама и максималним вучним силама следи да је:

$$0,2784=0,5158d$$

$$d=0,2784/0,5158=0,539m$$

На основу тога може се закључити да је водоток у време поплава током мају 2014. године поседовао огромну разорну снагу, способан да покрене и носи, блокове стена крупноће $>0,5$ m. Пошто се ради о регулисаном делу водотока где је камена облога са заливеним фугнама у цементном малтеру, тај разорни ефекат је умањен. Покренути ерозиони материјал из профила водотока и са узводних деоница понашао се као коагулант и преносник многих загађења дуж водотока, тако да је потребно, после престанка поплавног таласа, извршити прање објеката и комуникација чистом водом, као и њихову стерилизацију, у циљу спречавања епидемија. Директне штете настале услед катастрофалних поплава у мају 2014. године у Србији износи-ле су 810,1 милион евра, док индиректни губици износе 661,9 милиона евра, показао је званични државни извештај о процени штета од поплава који је усвојила Влада Србије, а који је представљен на донаторској коференцији у Бриселу 16. Јула 2014. године.

Све процене о томе да су се овакве поплаве могле избећи, немају основа јер се ради о катастрофалним природним непогодама са вероватноћом појаве једном у 2-3 хиљаде година. Свакако да су последице и штете могле бити умањене, благовременим ангажовањем шире друштвене заједнице, у одржавању регулационих и заштитних објеката на сливовима и водотоковима.

4. ЗАКЉУЧЦИ

Издвојена деоница водотока у средњем току Барајевске реке реално осликава обим и величину катастрофалних поплава током маја 2014. године. Падавине током трајања циклонске активности и претходне падавине слабијег интензитета условиле су засићеност земљишта и висок коефицијент отицања. Појава поплава у свим притокама и њихова коинциденција условиле су поплаве у доњем делу водотока, приобалних површина, пољопривредног и урбаног дела општине Барајево.

С обзиром да су количине падавина током маја 2014, према извештају RNMZ Републике 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 пре-лази вредност вероватноће појаве 0,01%. Да би се дефинисала вероватноћа протицаја великих вода у поводњу 14-16. маја 2014. године, извршена су мптерења трагова великих вода на терену у току трајања поплавног таласа. Снимања су вршена након проласка поплавног таласа, геодетским истру-ментима са везом на тригонометријске репере на терену.

На основу једначине бр. 1, по којој је разрађен компјутерски програм за хидрауличке прорачуне (Hec-Ras), извршено је тарирање пропусне спо-собности 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 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, на основу којих се могу извући закључци о стабилности протицајног профила водотока, режиму течења, степену заштите приобаља регулационим објектима 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 је речним коритом током трајања поводња протицало $Q=145 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. На основу анализе специфичних протицаја великих вода на рекама Републике Србије, може се закључити да је протицај са слива Барајевске реке ($q=3,71 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), у периоду 15-16. маја 2014. године, био реда величина $> 0,1\%$. С обзиром да је пројектном документацијом дефинисан степен заштите приобаља на воде појаве $Q_{2\%}$. Регулационим радовима је делимично извршено облагање само минор корита. Након регулационих радова догађале су се сталне промене морфологије протицајних профила. Изван минор корита оштећења су проузроковала местимична подкопавања и рушење обложног минор корита, са тенденцијом подкопавања и одношења наноса из дна и са обала дуж водотока. У међувремену су се димензије протицајних профила вишеструко увећале тако да данас протицајни профил водотока обезбеђује протицај воде изнад $Q_{0,1\%}$. Протицај великих вода у мајским поплавама 2014. године спада у катастрофалне појаве. Све је то довело до огромних разарања и плављења у доњем току реке Бељанице, а у коинциденцији са осталим водотоцима: Пештаном и Колубаром, до потапања површинских копова „Тамнава“ и града Обреновца.

“Овај рад је реализован у оквиру пројекта „Истраживање климатских промена на животну средину: праћење утицаја, адаптација и ублажавање” (III 43007) и пројекта „Нови биолошки материјали за заштиту земљишта и вода” (TP37002) 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.
- Baker, V.R. (2003): Palaeofloods and extended discharge records. In: Gregory, K.J., Benito, G. (Eds.), Palaeohydrology: Understanding Global Change. Wiley, Chichester, pp. 307–323.
- Bettess, R., White W.R. (1987): *Extremal Hypotheses Applied to River Regime*, Sediment Transport in Gravel-bed Rivers, ed. Thorne, C.R., Bathurst, J.C., Hey R.D., John Wiley,
- Chin, A., Gregory, K.J., 2005: Managing urban river channel adjustments. Geomorphology 69, 28–45.
- Deković, V. et al. (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.
- Ђековић, В. *et al.* (2014): Реконструкција поплавног таласа на изворишном делу Барајевске реке током маја 2014. Шумарство, јул-децембар 2014. УШИТС. Београд. Србија. (стр. 105-118)
- Јовановић, М. (2008): Регулација река, речна хидраулика и морфологија. Универзитетски уџбеник. Универзитет у Београду Грађевински факултет. Београд (стр. 1-500).
- Koljenšić, A., Kostadinović, R. (1977): Glavni projekat regulacije reke Peštan od km 0+000 do km 4+255. Vodoprivredna organizacija "Beograd", Beograd. Србија (стр. 1-320).
- 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 (pp. 35–51).
- Крстић, М., Бабић, В., Кањевац, Б. (2013): Прилог познавању климатско-вегетацијских карактеристика брдског подручја Србије. Шумарство бр. 3-4. УШИТС. Београд. Србија. (стр. 113-124).
- Летић, Љ., З., Никић, Р., Савић, В., Николић, В. (2014а): Утицај вегетационог покривача на ретенцију и отицање воде на подручју Фрушке горе. Шумарство бр. 3-4. УШИТС. Београд. (стр. 98–111).
- Летић, Љ., Савић, Р., Николић, В., Лозјанин, Р. (2014б): Утицај мелиоративних радова на стање шума храста лужњака у Равном Срему. Шумарство бр. 3-4. УШИТС. Београд. (стр.117-130).
- Surian, N., Rinaldi, M. (2003): Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology* 50 (pp. 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. (pp. 469–483).
- Hooke, J. M. (2001): Fluvial processes. In: Higgitt, D.L., Lee, E.M. (Eds.), *Geomorphological Processes and Landscape Change: Britain in the last 1000 years*. Blackwell, Oxford, pp.116–146.
- Hunt, C.E. (2000): New approaches to river management in the United States of America. In: Smits, A.J.M., Nienhuis, P.H., Leuven, R.S.E.W. (Eds.): *New Approaches to River Management*. Backhuys, Leiden (pp. 119–139).
- Chin, A., Gregory, K.J. (2001): Urbanization and adjustment of ephemeral stream channels. *Annals of the Association of American Geographers* 91, 595–608.
- Williams, P.B. (2001): River engineering versus river restoration. ASCE Wetlands Engineering and River Restoration Conference 2001, Reno, Nevada.
- (2014): Izveštaj o padavinama tokom ciklona „Tamara“. RHMZ Republike Srbije.
- (2014): Thousands evacuated due to severe flooding in Balkans.. CNN. Wikipedia 17.05.2014. Приступљено 18. 05.2014.

ANALYSIS OF THE FLOOD IN THE RIVER BASIN OF THE BARAJEVSKA RIVER IN MAY 2014

*Војислав Ђековић
Александар Анђелковић
Велибор Спалевић
Слободан Миливојевић.
Неђо Милошевић*

Summary

The paper studies the occurrence of high waters in the lower course of the Barajevska river during the cyclone "Tamara" from May 14th to May 16th 2014. The research included field work and measurements during the cyclone activity and after the rain had ceased and the flood subsided. Nearby weather stations provided data on the amount of rainfall that had caused the large-scale flooding and created conditions for the simultaneous occurrence of maximum discharges in all watercourses - watercourses of different categories from streams that dry up in summer months to small and large rivers of the Barajevska river drainage basin.

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 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 vapour did not cause the occurrence of surface erosion due to the presence of vegetation. 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 probability of high water occurrence. 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. We determined the value of the critical tractive force for the relevant sediment diameter ($d_{50\%}$), while the further estimates provided the values for the real tractive forces of the streamflow. It was also found that during the flood wave the streamflow could move and carry fractions sized $d = 0,539\text{m}$. Therefore, the May floods can be characterized as large-scale floods with devastating consequences.