

ZBORNIK RADOVA
GRAĐEVINSKO-
ARHITEKTONSKOG
FAKULTETA
NIŠ

broj
36/2021

IZDAVAČ:

**Građevinsko-arhitektonski fakultet
Univerziteta u Nišu,**

Dekan: Prof. dr Slaviša Trajković

**Tel: +38118 588-202
+38118 588-181**

<http://www.gaf.ni.ac.rs/>

UREDNICI:

Prof. dr Miomir Vasov, glavni i odgovorni urednik,

Doc. dr Radovan Cvetković, tehnički urednik.

REDAKCIJA:

Prof. dr Slaviša Trajković,

Prof. dr Danica Stanković,

Prof. dr Zoran Grdić,

Prof. dr Gordana Topličić-Ćurčić,

V. prof. dr Vladan Nikolić.

LEKTOR ZA ENGLISKI JEZIK:

Goran Stevanović, dipl. fil.

Radovi su recenzirani.

ISSN 1452-2845

Tiraž: 250

PREDGOVOR

Poštovani čitaoci, podsećanja radi treba reći da je prvi broj Zbornika izdat 1980. godine. Uprkos najrazličitijim problemima na koje se u proteklom periodu nailazilo, publikovan je i ovaj 36. po redu Zbornik, čime se poštuje dinamika izdavanja jednog broja godišnje. Sadrži osam radova iz skoro svih oblasti građevinarstva i arhitekture. Svi radovi su recenzirani od strane dva priznata stručnjaka iz odgovarajuće naučne oblasti, odnosno discipline.

Koncepcija časopisa je i ovom prilikom ostala nepromenjena, kako u pogledu namene i sadržaja, tako i u pogledu tehničke obrade. Kao i do sada časopis treba da omogući široj naučnoj javnosti uvid u naučno-istraživački rad fakulteta čime bi se njegov ugled i ugled autora više vrednovao, između ostalog i zbog činjenice da u našoj zemlji mali broj fakulteta izdaje sopstvene časopise.

Zbornik je dostupan i putem prezentacije preko Interneta, u saradnji sa Narodnom bibliotekom Srbije u punom obimu. Prema kategorizaciji domaćih naučnih časopisa Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, Odbora za saobraćaj urbanizam i građevinarstvo, Zbornik je svrstan u kategoriju časopisa M53.

I na kraju, kako je to već običaj, pozivamo sve autore koji se bave naučno-istraživačkim radom da i u buduće daju svoj doprinos redovnom izlaženju Zbornika. Ovaj poziv je posebno upućen mladim saradnicima kojima je Zbornik često i prvi časopis u kojem su prezentovali svoj naučno-istraživački rad. Pozivamo i njihove starije kolege i mentore da im u tim nastojanjima pomognu korisnim savetima.

Glavni i odgovorni urednik,

Prof. dr Miomir Vasov, dipl. inž. arh.

Dekan,

Prof. dr Slaviša Trajković, dipl. inž. građ.

SADRŽAJ:

Borislava Blagojević, Vladislava Mihailović, Dragan Radivojević:

OBLICI HIJETOGRAMA DNEVNIH KIŠA U ANALIZI VELIKIH
VODA MALIH NEIZUČENIH SLIVOVA1-17

**Jovana Stanković, Ana Momčilović-Petronijević, Sonja Krasić,
Nastasija Kocić:**

PRIMENA FOTOGRAMETRIJE U CILJU PREZENTACIJE
SPOMENIKA KULTURE SKOBALJIĆ GRAD.....18-33

Žarko Petrović, Slobodan Ranković, Marina Mijalković:

PRIMENA FRP MATERIJALA U OJAČAVANJU ARMIRANO-
BETONSKIH KONSTRUKCIJA 34-46

**Lazar Živković, Biljana Matejević Nikolić, Zoran Grdić, Nenad
Ristić:**

MEHANIČKE KARAKTERISTIKE 3D ŠTAMPANIH BETONA NA
BAZI PORTLAND CEMENTA.....47-58

Mirko Stanimirović, Nemanja Ranđelović, Vukašin Vasić

SPOMEN HRAM U
PORTI VAZNESENJSKOG HRAMA U BEOGRADU.....59-66

Nikola Đokić, Borislava Blagojević, Vladislava Mihailović:

KOMPROMISNA VEROVATNOĆA I KONCEPT PRAGOVA
PERCEPCIJE U ANALIZI VELIKIH VODA67-77

OBLICI HIJETOGRAMA DNEVNIH KIŠA U ANALIZI VELIKIH VODA MALIH NEIZUČENIH SLIVOVA

**UDK : 551.578.1
551.577.21**

**Borislava Blagojević¹, Vladislava Mihailović², Dragan
Radivojević³**

Rezime

Računske velike vode dva mala neizučena sliva u okolini Leskovca, dobijene su modeliranjem procesa padavine-oticađ preko računskih kiša i dva modela direktnog oticaja: racionalnom metodom i metodom sintetičkog jediničnog hidrograma. Kod racionalne metode, korišćena je kiša trajanja jednakog procenjenom vremenu koncentracije sliva, dok je jednočasovni sintetički hidrogram oblika trougla primenjen na složenu računsku kišu trajanja 24 časa, podeljenu u blokove trajanja 1 čas. Složena računsa kiša je razmatrana u pet varijanti statističkog oblika kiše. Primenjeni model za dobijanje efektivne kiše u ovom slučaju je SCS-CN. Proračuni su prikazani za povratne periode velikih voda od 50 i 100 godina, pod pretpostavkom da povratni period kiše odgovara povratnom periodu oticaja koji izaziva. Cilj rada je prikaz mogućnosti ocene kvantila velikih voda pomoću dnevnih kiša i poređenje sa rezultima dobijenim na osnovu ravnomerne kiše nerealnog trajanja prema racionalnoj metodi.

Ključne reči: *Velike vode, Neizučen sliv, Dnevne kiše, Oblik hijetograma*

¹ Borislava Blagojević, dr docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, borislava.blagojevic@gaf.ni.ac.rs

² Vladislava Mihailović, dr docent, Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, vladislava.mihailovic@sfb.bg.ac.rs

³ Dragan Radivojević, dr docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, dragan.radivojevic@gaf.ni.ac.rs

HYETOGRAM FORMS OF DAILY RAINFALL IN THE ANALYSIS OF HIGH WATERS OF SMALL UNEXPLORED RIVER BASINS

Abstract

The calculated high waters of two small unexplored river basins in the vicinity of Leskovac were obtained by modeling the precipitation-runoff process through the calculated rainfall and two models of direct runoff: using the rational method and the synthetic unit hydrograph method. In the rational method, the rainfall having a duration equal to the estimated time of basin concentration was used, while a one - hour synthetic hydrograph of triangle shape was applied to a complex computational rainfall in the duration of 24 hours, divided into blocks of 1 hour. The complex computational rainfall is considered in five variants of the statistical form of rainfall. The applied model for obtaining the effective rainfall in this case is SCS-CN. Calculations are shown for the high water return periods of 50 and 100 years, assuming that the return period of rainfall corresponds to the return period of the runoff it causes. The aim of this paper is to present the possibility of estimating the high water quantile using daily rainfall and to compare with the results obtained on the basis of uniform rainfall of unrealistic duration according to the rational method.

Key words: *High waters, Unexplored river basin, Daily rainfall, hyetogram form*

1. UVOD

Analizom malih, srednjih i velikih voda u okviru izrade hidrološke studije, dobijaju se karakteristike odgovarajućih hidroloških režima. Na osnovu njih se definišu uslovi za planiranje i izgradnju objekata i sprovođenje radova u postupku izdavanja vodnih uslova [1]. Izbor metoda analiza i proračuna zavisi od zadatka koji se rešava i stepena izučenosti područja ili lokacije za koju se rade.

U radu je prikazan postupak analize velikih voda za dimenzionisanje objekata u dva različita slučaja: 1) za propust na malom vodotoku i 2) kod primene strukturne mere za odbranu od poplava, tj. izgradnje rasteretnog kanala vodotoka [2], [3], [4]. U oba slučaja, merodavna veličina je protok, odnosno vršni protok talasa velikih voda. Prema stepenu izučenosti područja, slivovi oba vodotoka spadaju u neizučene slivove.

Ocena velikih voda u neizučenim slivovima spada u rutinske zadatke u hidrotehničkoj praksi. Metode koje se primenjuju za ocenu velikih voda, po pravilu preko računskih kiša, obično se primenjuju nekritički, a retko se razmatra više varijanti računskih protoka na osnovu kojih se usvaja merodavni protok. U radu je pokazana primena dve najčešće korišćene metode, racionalne metode i sintetičkog jediničnog hidrograma. Ukazano je na nekoliko bitnih detalja u proračunima: ograničenja u izvedenim izrazima za ocenu vremena koncentracije, razmatranje različitih statističkih oblika kiše, a pokazani su i rezultati ocene protoka na osnovu ravnomerne kiše nerealnog trajanja za primenu u racionalnoj metodi. Najviše pažnje posvećeno je primeni različitih statističkih oblika kiše koji omogućavaju korišćenje dnevnih kiša kao ulaznih podataka.

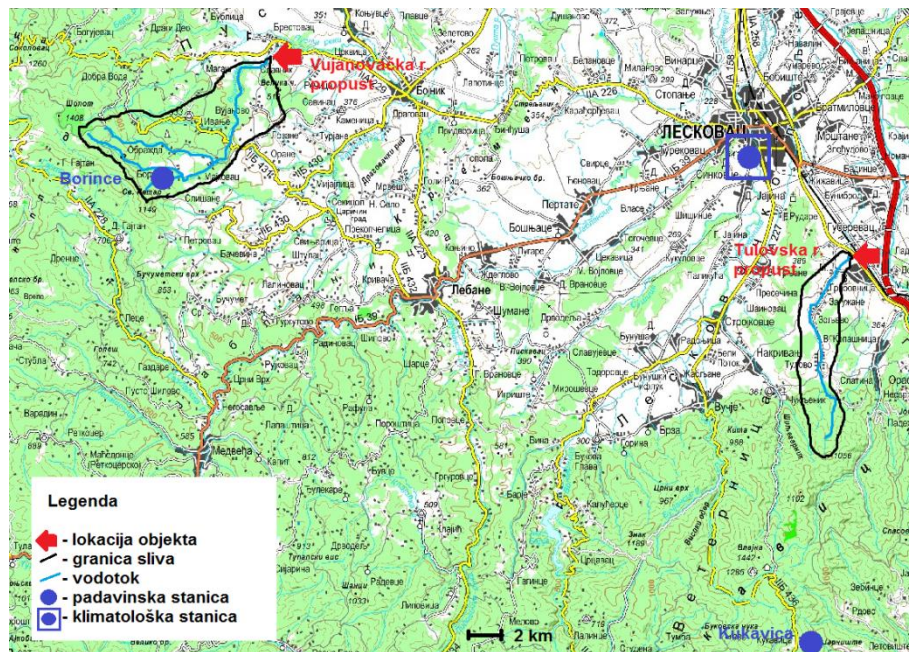
2. METODOLOGIJA

2.1. Podloge

Osnovne podloge korišćene u radu su sledeće: 1) Topografske karte R=1:25 000 kopija karata iz 1978 godine, sadržaj iz 1971; 2) Hidrogeološka karta SR Srbije, izvor: Vodoprivredna osnova Republike Srbije 1996; 3) Pedološka karta Narodne Republike Srbije R=1:600 000; 4) Satelitski snimci sa stanjem iz 2019. i 2020. godine © 2019, 2020 Google; 5) Meteorološki godišnjaci 1. Klimatološki podaci 1949-2017; 6) Hidrološki godišnjaci 1. Površinske vode 1948-2017; 7) Obilasci terena 2019. i 2020. godine.

2.2. Osnovne karakteristike područja i lokacija

Istraživano područje je šira okolini grada Leskovca (Slika 1). Lokacije planiranih objekata su na Tulovskoj i Vujanovačkoj reci, koje pripadaju slivu Južne Morave.



Slika 1. Istraživano područje - Lokacije objekata na vodotokovima, granice pripadajućih slivnih površina i lokacije padavinskih i klimatoloških stanica korišćenih u analizama. (Izvor: GeoSrbija)

Tulovska reka je leva pritoka Južne Morave prvog reda. Formira se na severnim i istočnim obroncima planine Kukavice od Goleme i Male reke, pritoka Slaniške doline i Janičarske reke kao leve pritoke i niza manjih pritoka. Vodotok je bujičnog karaktera i većim delom godine je u svom ravničarskom delu sa malim protokom vode u koritu. Sliv Tulovske reke nalazi se na teritoriji opštine Leskovac (Slika 1).

Vujanovačka reka pripada slivu Južne Morave, podslivu Puste reke i njena je desna pritoka prvog reda. Formira se na severoistočnoj padini planine Radan. Vodotok je bujičnog karaktera i većim delom godine je sa malim protokom vode u koritu, a u malovodnom periodu presušuje. Sliv Vujanovačke reke nalazi se na teritoriji opštine Bojnik. Površine sliva i druge morfometrijske karakteristike oba sliva su prikazane u Tabeli 1 za profile planiranih objekata.

Tabela 1. Morfometrijske karakteristike sliva i toka u profilu I – Tulovska reka, propust na ž. Pruzi Beograd-Solun, II- Vujanovačka reka, pločasti propust na lokalnom putu kod s. Brestovac.

Profil	Karakteristike sliva					Karakteristike toka			
	A (km ²)	H_{sr} (mm)	IsI (%)	Ls (km)	SsI (m/m)	Lt (km)	It (%)	Iur (%)	Lc (km)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
I	20.8	429	20.9	11.72	0.068	12.63	4.0	1.93	5.76
II	37.2	646	13.12	10.82	0.083	16.75	5.34	3.15	8.11

Značenje veličina u kolonama: 1-Površina, 2- Srednja nadmorska visina, 3- Srednji nagib padina, 4- Dužina, 5- Srednji nagib, 6- Dužina, 7- Srednji nagib, 8- Uravnati nagib, 9- Odstojanje do težišta.

Klimatske karakteristike slivnog područja odgovaraju prelaznom tipu između kontinentalnog i modificovanog sredozemnog režima padavina, uz pojavu letnjih lokalnih depresija sa nepogodama i pljuskovima [2], [3], [4].

Imajući u vidu prostornu raspodelu padavina i temperature vazduha, udaljenost, ekspoziciju i visinski položaj stanica u odnosu na sliv Tulovske i Vujanovačke reke, zatim ostale raspoložive podatke i informacije o jakim kišama, glavna klimatološka stanica Leskovac je merodavna za obe lokacije. Kada su u pitanju visine dnevnih kiša, za Tulovsku reku je merodavna stanica Kukavica [2], a za Vujanovačku, Borince [3].

Statistička analiza ekstrema - maksimalnih dnevnih padavina ($P_{max,dn}$), urađena je za stanice Leskovac (period 1949-2017), Kukavica (period 1954-2016) i Borince (period 1954-2016). Vrednosti su preuzete iz Meteoroloških godišnjaka RHMZS ili dobijene u okviru projekata [2], [3]. Podaci osmatranja za RC Kukavica (1438) i Kukavica (1250) su spojeni u jedan niz, radi dobijanja reprezentativnog niza za statističku analizu. Kvantili padavina su ocenjeni uobičajenim teorijskim raspodelama koje se koriste za ekstremne padavine. Usvojene raspodele verovatnoća dobijene su na osnovu testova saglasnosti (Kolmogorov-Smirnov, $n\omega^2$) i srednje kvadratne greške odstupanja teorijske od empirijske funkcije raspodele. Tabela 2 prikazuje karakteristične kvantile $P_{max,dnT}$ za razmatrane povratne periode na reprezentativnim stanicama.

Tabela 2. Kvantili dnevnih padavina $P_{max,dnT}$ (mm) dobijeni za naznačene teorijske raspodele verovatnoća na karakterističnim stanicama

T (год)	Leskovac (GEV)	Borince (GUMB)	Kukavica (GUMB)
10	54.6	51.5	73.8
20	63.7	56.2	83.2
50	77.1	62.3	95.3
100	88.4	66.8	104.3

Krive visina kiše (P) – trajanje kiše (tk) – povratni period (T) preuzete su iz literature [5] za stanicu Leskovac (ordinate raspodele verovatnoće sloja kiše - $P(tk, T)$). Definisani oblik kiše u vremenu na stanici Leskovac takođe je preuzet iz literature [5] – teorijske bezdimenzionalne sumarne krive jakih kiša verovatnoća pojave: 10%, 20%, 50%, 80%, 90%.

Sagledavanjem geološke građe, pedoloških karakteristika - zemljišta i vegetacionog pokrivača iz dostupnih podloga, utvrđeni su kompleksni hidrološko-zemljišno-biljni brojevi (CN) koji se koriste u modelu za određivanje efektivnih kiša. U proračunima su korišćeni uslovi nadprosečne vlažnosti zemljišta. Na slivu Tulovske reke do razmatranog profila, dobijen je broj $CN(III) = 87$, a Vujanovačke reke, $CN(III) = 82$.

2.3. Računske kiše

Postupak proračuna bruto i efektivnih kiša primenjen za sliv Tulovske i Vujanovačke reke se sastoji od sledećih koraka:

1. Preuzimanje definisanih krivih: visina kiše (P) – trajanje kiše (tk) – povratni period (T) iz literature [5] za stanicu Leskovac (ordinate raspodele verovatnoće sloja kiše - $P(tk, T)$);

2. Proračun bezdimenzionalnih – redukcionih krivih kiša za stanicu Leskovac, na osnovu kvantila dnevnih kiša ($P_{max,dn}(T)$) definisanih u literaturi [4]

$$R(t_k, T) = P(t_k, T) / P_{max, dn}(T), \quad (1)$$

3. Dobijanje visina kiše različitih trajanja $P(t_k, T)$ za sliv Tulovske (j-na 2 a) i Vujanovačke reke (j-na 2 b) primenom računskih visina dnevnih kiša za stanicu Kukavica odn. Borince, na ordinate redukcione krive jakih kiša za stanicu Leskovac

$$P(t_k, T)_{Tulovska} = R(t_k, T)_{Le} \cdot P_{max, dn}(T)_{Kukavica} \quad (2a)$$

$$P(t_k, T)_{Vujanovačka} = R(t_k, T)_{Le} \cdot P_{max, dn}(T)_{Borince} \quad (2b)$$

4. Preuzimanje definisanih oblika kiše u vremenu sa stanice Leskovac iz literature [4] – teorijskih bezdimenzionalnih sumarnih krivih jakih kiša sledećih verovatnoća pojave: 10%, 20%, 50%, 80%, 90%, pri čemu su kod ovako definisane verovatnoće, oblici napredne kiše 90% i 80%, oblik prosečne kiše je 50%, a zakasnele 20% i 10%;

5. Formiranje ordinata 24-časovnih kiša navedenih statističkih oblika kiše u vremenu $P_{24h(t, T)_{Tulovska, oblik r(h)}}$ i $P_{24h(t, T)_{Vujanovačka, oblik r(h)}}$;

6. Određivanje efektivne kiše metodom SCS-CN svih formiranih 24-časovnih kiša $Pe_{24h(t, T)_{Tulovska, oblik r(h)}}$ i $Pe_{24h(t, T)_{Vujanovačka, oblik r(h)}}$;

7. Proračun visine efektivne kiše u blokovima trajanja 1 čas svih formiranih 24-časovnih kiša $Pe_{24h(t, T)_{Tulovska, oblik r(h)}}$ i $Pe_{24h(t, T)_{Vujanovačka, oblik r(h)}}$.

2.4. Racionalna metoda

Vršna ordinata hidrograma oticaja u racionalnoj metodi se dobija poznatim izrazom:

$$Q = C \cdot i \cdot A, \text{ za } t_k \geq t_c$$

$$Q = C \cdot i \cdot A \cdot t_k / t_c, \text{ za } t_k < t_c \quad (3)$$

gde su: C – koeficijent oticaja, i – intenzitet kiše, A – površina sliva, a t_k i t_c su trajanje kiše i vreme koncentracije, redom.

Kompozitni koeficijent oticaja na slivu je određen iz tablica koje uz namenu površina, uzimaju u obzir i povratni period padavina, hidrološku grupu zemljišta i nagib terena [6]. Vrednosti koeficijenta oticaja C za sliv Tulovske reke su: 0.18 za kiše povratnog perioda T manjeg od 25 godina i 0.24 za kiše povratnog perioda T većeg od 25 godina.

Primena racionalne metode se ne preporučuje za slivove veće od 25 km². Prema tome, može se primeniti za sliv Tulovske reke,

površine 20.8 km², a ne može za sliv Vujanovačke reke površine 37.2 km².

Metoda je izvedena pod pretpostavkom o ravnomernom intenzitetu kiše, što se ne može zadovoljiti za kiše dužih trajanja. Primenjena varijanta proračuna vršne ordinate hidrograma oticaja Tulovske reke je za trajanje kiše jednako vremenu koncentracije.

Vreme koncentracije je procenjeno na osnovu niza izraza, od kojih je najpoznatiji izraz Kirpiča:

$$t_c = 0.0195 \cdot Lt^{0.77} \cdot Ssl^{-0.385} \quad (4)$$

gde su: Lt – dužina toka od izvora do izlaza (m) i Ssl – prosečan nagib sliva (m/m), a t_c se dobija u minutima (min). Izraz je izveden za ruralne slivove sa jasno izraženim rečnim tokovima i strmim nagibima.

Ostale primenjene jednačine za proračun vremena koncentracije su dobijene za bujične slivove na teritoriji Srbije [7]. Svi izrazi su dimenziono uređeni tako da se t_c dobija u časovima (h).

$$t_c = 0.0316 \cdot Lt^{0.933} \quad (5)$$

$$t_c = 0.502 \cdot A^{0.506} \quad (6)$$

$$t_c = 0.819 \cdot (Lt \cdot Lc / lur^{0.5})^{0.376} \quad (7)$$

$$t_c = 0.47 \cdot Lt^{0.826} \cdot lur^{-0.127} \quad (8)$$

$$t_c = 0.609 \cdot Lt^{0.898} \cdot Isl^{-0.17} \quad (9)$$

$$t_c = 0.56 \cdot Lt^{0.846} \cdot lur^{-0.084} \cdot Isl^{-0.08} \quad (10)$$

gde su: Lt – dužina toka od izvora do izlaznog profila (km), A – površina sliva (km²), Lc - odstojanje od projekcije težišta sliva na glavni tok do izlaznog profila (km), lur - uravnati nagib korita (%), Isl – prosečan nagib terena – srednji nagib padina u slivu (%).

Raspon vrednosti za pojedine parametre, na osnovu kojih su zavisnosti izvedene [7], iznosi: površina sliva $A=10-1268$ km²; dužina sliva po glavnom toku $Lt=6.40-93.20$ km; odstojanje od tačke u rečnom koritu, najbliže težištu sliva, do izlaznog profila $Lc=3.4-46.5$ km; uravnati pad dna rečnog korita $lur=0.26-4.66$ %; srednji nagib terena u slivu $Isl=8.98-47.0$ % i odnos $Lt/Lc=1.41-3.15$. Morfometrijske karakteristike sliva Tulovske reke nalaze se unutar svih navedenih raspona vrednosti parametara.

2.5. Sintetički jedinični hidrogram

Sintetički jedinični hidrogram (SJH) oblika trougla za određeno trajanje kiše, konstruiše se za neizučene slivove na osnovu sledećih karakteristika: vremena podizanja (T_p) i vremena opadanja (T_r) koja čine bazu hidrograma (T_b) i maksimalne ordinate hidrograma (u_{max}). Vreme kašnjenja (t_p) definiše se kao rastojanje između težišta hijetograma efektivne kiše i maksimalne ordinate SJH, što znači da je vreme podizanja hidrograma:

$$T_p = t_p + t_k/2 \quad (11)$$

Vreme kašnjenja se kod neizučenih slivova može dobiti na osnovu regionalnih veza između morfometrijskih karakteristika sliva i karakteristika SJH. Zbog primene regionalnih veza, za sliv Tulovske reke je korišćena modifikovana varijanta SCS sintetičkog jediničnog hidrograma oblika trougla po Jovanoviću i Brajkoviću .

Vreme kašnjenja je sračunato pomoću izraza [8]:

$$t_p = a \cdot t_p + t_0, \quad (12)$$

$$t_0 = 0.4 \cdot L_t (L_t \cdot L_c / l_{ur}^{0.5})^{0.086} \quad (13)$$

gde se vrednosti morfometrijskih karakteristika unose u sledećim jedinicama: L_t , L_c (km), l_{ur} (%), a t_0 i t_p dobijaju u časovima (h); a je koeficijent koji zavisi od površine sliva.

Zatim se za razmatrano trajanje kiše računa vreme podizanja SJH prema izrazu (11), koje je povezano sa vremenom opadanja preko odnosa r , a time i sa bazom hidrograma:

$$T_r = r \cdot T_p, \quad (14)$$

$$T_b = (1+r) T_p \quad (15)$$

Maksimalna ordinata SJH dobija se u $m^3/s/mm$ na bazi izraza:

$$u_{max} = 0.56 \cdot T_b/A \quad (16)$$

gde su vrednosti T_b u časovima, a A u km^2 .

2.6. Hidrogram oticaja od složene kiše

Konstruisani 1-časovni SJH može se primeniti na računsku kišu trajanja 24 sata, za koju su određene visine efektivne kiše u blokovima trajanja 1 sat za sve povratne periode i oblike računске kiše. Ordinate

hidrograma direktnog oticaja dobijaju se superpozicijom 24 elementarna hidrograma direktnog oticaja (zbirom konvolucije):

$$Qd_k = \sum_{j=1}^{24} u_{k-j+1} \cdot Pe_j, k=1, n+m-1 \quad (17)$$

gde je k – redni broj ordinate ($k=1, n+m+1$), u_j – ordinata 1-časovnog SJH ($j=1, m$), Pe_j – visina efektivne kiše u časovnom bloku ($j=1, 24$).

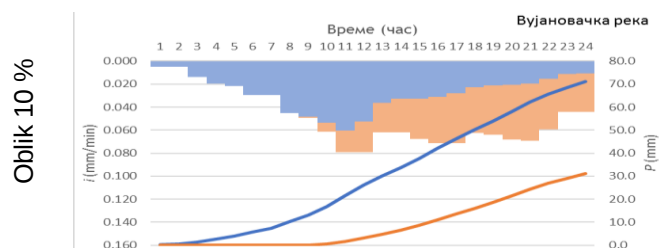
3. REZULTATI I DISKUSIJA ANALIZA I PRORAČUNA

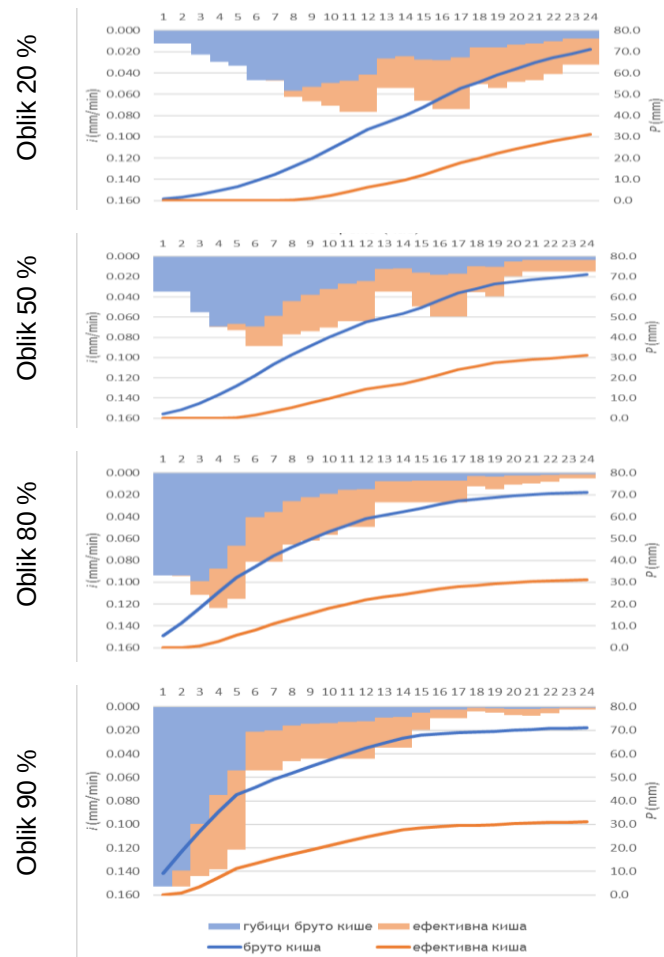
3.1. Računske kiše

Računske kiše za sliv Vujanovačke i Tulovske reke koje se koriste za ocenu velikih voda, predstavljaju kompromis u prostorno-vremenskom sagledavanju jakih kiša kraćih trajanja. Ključne su za analizu velikih voda na slivovima bez dugih podataka osmatranja padavina: visine maksimalnih dnevnih kiša su usvojene za stanicu Borince odn. Kukavica, a redukciona kriva jakih kiša i oblik kiše u vremenu za stanicu Leskovac.

Na Slici 2 prikazani su hijetogrami računskih bruto i neto kiša različitih oblika u vremenu i odgovarajuće sumarne linije bruto i neto kiša. Ilustracija je prikazana za povratni period 100 godina na Vujanovačkoj reci.

Napominje se da je za dobijanje efektivne kiše prema SCS-CN modelu, korišćen CN broj za uslove povećane prethodne vlažnosti, CN(III).





Slika 2. Hijetogrami računskih bruto i neto kiša različitih oblika dnevnih kiša na slivu Vujanovačke reke, povratni period 100 godina

3.2. Racionalna metoda

Tabela 3 sadrži vrednosti sračunate za vreme koncentracije Tulovske reke na osnovu izraza (4)-(10). Usvojena vrednost sa kojom je urađen proračun racionalnom metodom iznosi 3.5 h.

Tabela 3. Vreme koncentracije dobijeno prema različitim izrazima i usvojeno vreme u profilu I – Tulovska reka, propust na ž. Pruzi Beograd-Solun.

Profil	Vreme koncentracije t_c (h) prema jednačini							Usvojeno
	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	
I	1.32	3.37	2.33	3.63	3.51	3.54	3.55	3.50

Vršne ordinate hidrograma oticaja od kiše trajanja 3.5 sata, sračunate za sve razmatrane povratne periode prikazuje Tabela 4. Visina računске kiše trajanja 3.5 sata, dobijena je preko odgovarajuće redukcione krive jakih kiša kraćih trajanja za stanicu Leskovac, primenjene na računsku visinu dnevne kiše na stanici Kukavica za svaki od razmatranih povratnih perioda.

Tabela 4. Vršne ordinate hidrograma velikih voda i drugi bitni elementi proračuna racionalnom metodom u profilu I – Tulovska reka, propust na ž. Pruzi Beograd-Solun.

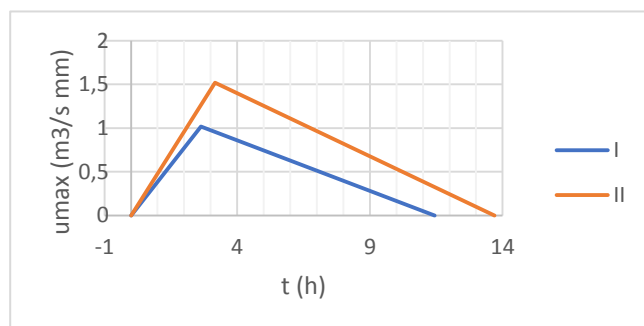
T (god)	100	50	20	10
C	0.24	0.24	0.18	0.18
$P_{max, dn}(T)$ (mm)	104.3	95.3	83.2	73.8
$R(3.5 h, T)$	0.692	0.686	0.675	0.664
$P(3.5 h, T)$ (mm)	72.2	65.3	56.2	49.0
i (mm/h)	20.6	18.7	16.0	14.0
Q_{max} (m ³ /s)	28.5	25.8	16.6	14.5

Dobijene vrednosti vršnih protoka po racionalnoj metodi mogu biti jedino indikativne, zbog dugačkog trajanja kiše (3.5 h) koje ne može zadovoljiti pretpostavku o ravnomernom intenzitetu kiše tokom trajanja kišne epizode.

3.3. Sintetički jedinični hidrogram

Slika 3 ilustruje dobijeni 1-časovni SJH Tulovsku i Vujanovačku reku, dok Tabela 5 sadrži vrednosti sračunatih karakteristika 1-časovnog SJH na bazi izraza (11)-(16). Vrednost koeficijenta a koji zavisi od površine sliva je očitana iz odgovarajućeg dijagrama [8], dok je za r usvojena vrednost preporučena za ruralne slivove velikog

nagiba. Morfometrijske karakteristike sliva koje su korišćene u proračunu, navedene su u Tabeli 1.



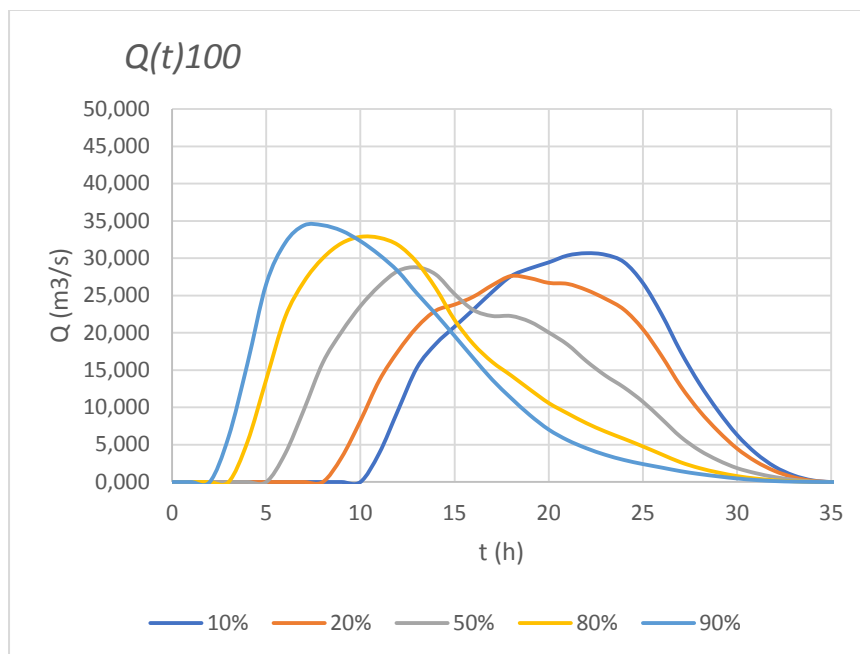
Slika 3. 1-časovni SJH za I - Tulovsku i II – Vujanovačku reku

Tabela 5. Elementi i rezultati proračuna karakteristika 1-časovnog SJH prema Jovanoviću i Brajkoviću

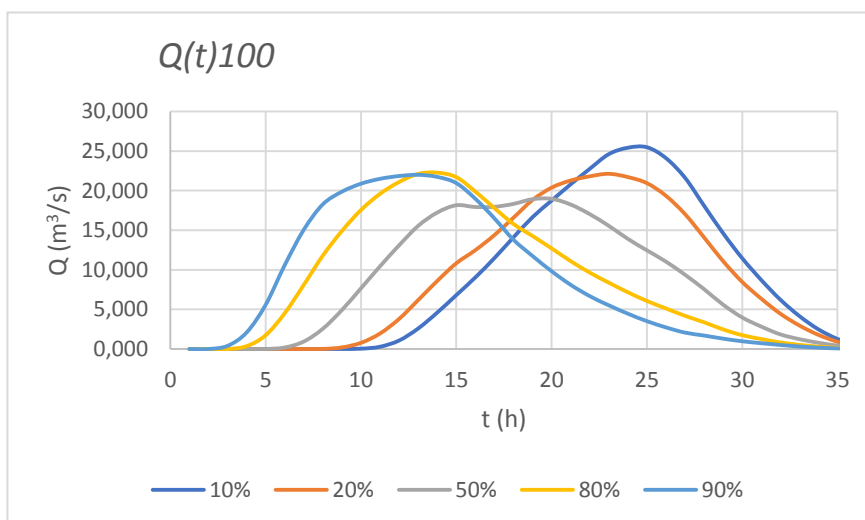
Profil	A	a	r	tk	t ₀	tp	Tp	Tb	u _{max}
	(km ²)	(-)	(-)	(h)	(h)	(h)	(h)	(h)	(m ³ /s mm)
I	20.8	0.325	3.33	1	1.82	2.14	2.64	11.44	1.018
II	37.2	0.34	3.33	1	2.32	2.66	3.16	13.70	1.520

3.4. Hidrogrami oticaja od složene kiše

Na Slici 4 i Slici 5 prikazani su hidrogrami dobijeni na osnovu konstruisanih 1-časovni SJH i računskih kiša trajanja 24 sata. Visine efektivne kiše u blokovima trajanja 1 sat za sve povratne periode i oblike računske kiše dobijene su metodom SCS-CN. Ordinate hidrograma direktnog oticaja dobijene superpozicijom 24 elementarna hidrograma direktnog oticaja, a računate su sa računskim korakom od 10 min, radi postizanja veće tačnosti proračuna.



Slika 4. Računski hidrografi velike vode povratnog perioda 100 godina za različite oblike kiše u vremenu, Tulovska reka



Slika 5. Računski hidrografi velike vode povratnog perioda 100 godina za različite oblike kiše u vremenu, Vujanovačka reka

3.5. Merodavni vršni protok hidrograma oticaja od složene kiše

Prema zadacima koji se rešavaju u dva razmatrana profila, veličina koja je bitna za dimenzionisanje objekata jeste maksimalni – vršni protok hidrograma oticaja. Kada je u pitanju povratni period merodavnog protoka, to je 50 godina za dimenzionisanje objekta i 100 godina za kontrolni proračun. U Tabeli 6 su navedeni računski protoci dobijeni za složenu kišu trajanja 24 h, za dva karakteristična povratna perioda i sve razmatrane oblike kiše.

Tabela 6. Vršni računski protoci razmatranih povratnih perioda QT od složene kiše trajanja 24 sata, za različite statističke oblike kiše u vremenu I- Tulovska, II- Vujanovačka reka

Profil	Oblik kiše	10%	20%	50%	80%	90%
I	Q50 (m ³ /s)	27.6	25.4	25.3	29.0	30.1
	Q100 (m ³ /s)	31.1	28.0	29.2	33.3	34.9
II	Q50 (m ³ /s)	22.7	19.6	16.8	19.6	19.4
	Q100 (m ³ /s)	25.5	22.1	19.0	22.4	22.1

Merodavni protoci za dimenzionisanje objekata na Tulovskoj i Vujanovačkoj reci su istaknuti podebljanjem vrednosti u Tabeli 6 i predstavljaju najveće dobijene vrednosti za sve oblike kiše u vremenu.

4. ZAKLJUČAK

Visine maksimalnih dnevnih kiša predstavljaju podatak osmatranja koji se često koristi u analizi velikih voda. Korišćenje kvantila dnevnih kiša u modelima padavine-otica na malim neizučnim slivovima, zahteva detaljniju obradu i prelazak na računski kiše kraćih trajanja. U radu je prikazan proračun za dva mala neizučna sliva, u kome je primenjen i oblik kiše u vremenu za dobijanje hidrograma oticaja od složene dnevne kiše. Zavisno od primenjenog oblika hijetograma efektivne kiše, rezultati modeliranja protoka u okviru povratnih perioda 50 i 100 godina, međusobno se razlikuju do 30%, zavisno od primenjenog oblika kiše.

U profilu na Tulovskoj reci, za koju je primenjena i racionalna metoda, dobijene vrednosti pedesetogodišnje i stogodišnje velike vode odgovaraju najmanjim vrednostima dobijenim vodeći računa o obliku dnevne kiše. Dakle, razlikuju se do 30% u odnosu na najveće, usvojene vrednosti. Uzrok pojave ove razlike je obično nerealno dugo

trajanje kiše (3.5 h) u kome se ne može obezbediti ravnomeran intenzitet kiše - pretpostavka pod kojom je metoda izvedena, ali i različite metode za ocenu vremena koncentracije, koje diktiraju trajanje kiše.

U radu je pokazano da se dobijeni rezultati ocene protoka mogu značajno razlikovati i u okviru jedne metode, ako se ne vodi računa o vremenskoj raspodeli računske kiše. Međutim, trebalo bi imati na umu i sledeće: "... Metode za neizučene slivove mogu dati samo grube, orijentacione ocene računskih velikih voda za profile na kojima nisu vršena merenja. Na takvim profilima, još u fazi studije, treba postaviti limnigraf i pluviograf u slivu. Dovoljno je 2 do 3 godine osmatranja da se odredi empirijski jedinični hidrogram, a time i mnogo pouzdanije ocene merodavnih velikih voda." 8

5. IZJAVA

Istraživanja prikazana u radu su delom finansirana u okviru projekata Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

6. LITERATURA

- [1] Zakon o vodama <https://www.mgsi.gov.rs/lat/dokumenti/zakon-o-vodama>
- [2] Radivojević, D., Blagojević, B., Mihailović, V., Blagojević, J. (2019): Hidrološka studija - Hidrološke podloge za potrebe izrade rasteretnog kanala Tulovske reke. Institut za građevinarstvo i arhitekturu Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu.
- [3] Radivojević, D., Blagojević, B., Mihailović, V. (2020): Hidrološka studija Vujanovačke reke do profila lokacije propusta na ukrštanju kp.br.7956 i kp.br.7941 i kp.br.7944 KO Brestovac, Bojnik, Consult biro, Niš.
- [4] Blagojević, B., Potić, O. i Radivojević, D. (2008) Korišćenje hidroloških metoda za neizučene slivove na primeru proračuna velikih voda Tulovske reke, Nauka i praksa br. 11, str. 75-82
- [5] Prohaska, S., Bartoš-Divac, V., Koprivica, A., Đukić, D., Ilić, A., Đatović, S., Kapor, B., Marjanović, S., Vukelić, V., Božinović, N. (2014): Intenziteti jakih kiša u Srbiji. Institut za vodoprivredu 'Jaroslav Černi'. Beograd

- [6] Letić, Lj., Ristić, R., Malušević, I. (2004): Proračun merodavne količine vode za evakuacione objekte šumskih puteva. Šumarstvo br. 4, Oktobar-decembar 2004, str. 87-95
- [7] Ristić, R. (2006): Vreme koncentracije na bujičnim slivovima u Srbiji. Glasnik Šumarskog fakulteta, Beograd. 2006. br. 93. str. 7-21
- [8] Jovanović, S. (1989): Hidrologija. Tehničar 6. Građevinski priručnik. Građevinska knjiga, Beograd.

PRIMENA FOTOGRAMETRIJE U CILJU PREZENTACIJE SPOMENIKA KULTURE SKOBALJIĆ GRAD

UDK : 725.94:005.922.52.004.932(497.11)

Jovana Stanković⁴, Ana Momčilović-Petronijević⁵, Sonja
Krasić⁶, Nastasija Kocić⁷

Rezime

Stanje graditeljskog nasleđa u Srbiji je jako loše. Svakodnevno se gube dragocena arhitektonska ostvarenja iz prošlosti i prepuštaju zaboravu. Beleženje podataka o njima i izrada dokumentacije u digitalnoj formi prepoznati su kao ključni deo očuvanja graditeljskog nasleđa i osnova za postupak njihove zaštite, prezentacije i promocije. U ovom radu je predstavljena primena poluautomatske metode fotogrametrije na primeru napuštenog spomenika kulture Skobaljić grad u Vučju, Leskovac. Rezultat istraživanja je rekonstruisan 3D model spomenika kulture iz perioda srednjeg veka, koji će doprineti prezentaciji i promociji ovog objekta graditeljskog nasleđa, podsticanju razvoja turizma juga Srbije, edukaciji budućih generacija i podizanju svesti ljudi o zaštiti graditeljskog nasleđa.

Ključne reči: Skobaljić grad, Leskovac, fotogrametrija, rekonstrukcija, zaštita graditeljskog nasleđa, prezentacija i promocija graditeljskog nasleđa

PHOTOGRAMMETRY APPROACH FOR PRESENTATION OF CULTURAL HERITAGE SKOBALJIĆ GRAD

Abstract

The condition of the architectural heritage in Serbia is very bad. Precious architectural achievements from the past are lost every day and left to oblivion. Recording data on them and creating documentation in digital form are recognized as a key part of preserving the architectural heritage and the basis for the process of their protection, presentation and promotion. This paper

⁴ Jovana Stanković, mast. inž. arh., doktorand, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, jovana.stankovic@gaf.ni.ac.rs

⁵ Ana Momčilović-Petronijević, doktor nauka, vanredni profesor, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, ana.momcilovic.petronijevic@gaf.ni.ac.rs

⁶ Sonja Krasić, doktor nauka, vanredni profesor, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, sonja.krasic@gaf.ni.ac.rs

⁷ Nastasija Kocić, mast. inž. arh., doktorand, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, nastasija.kocic@gaf.ni.ac.rs

presents the application of the semi-automatic photogrammetric method on the example of an abandoned cultural monument Skobaljić grad in Vučje, Leskovac. The result of the research is a reconstructed 3D model from the Middle Ages, which will contribute to the presentation and promotion of this architectural heritage site, provide an opportunity for the development of tourism in southern Serbia, education of future generations and raising people's awareness of the protection of architectural heritage.

Key words: *Skobaljić grad, Leskovac, photogrammetry, reconstruction, protection of architectural heritage, presentation and promotion of architectural heritage*

1. UVOD

Srbija je zemlja sa burnom i bogatom istorijom, čemu svedoči veliki broj objekata graditeljskog nasleđa, kao najvažniji materijalni dokaz o razvoju i opstanku jednog naroda i njegove kulture na određenom području u određenom vremenskom periodu [9]. Prema podacima Republičkog Zavoda za zaštitu spomenika kulture Beograd [20], u Centralnom registru upisano je 2596 nepokretnih kulturnih dobara, od toga 2236 spomenika kulture, 87 prostorno kulturno-istorijskih celina, 194 arheoloških nalazišta i 79 znamenitih mesta.

Tretman državnih institucija, društva i na kraju svakog pojedinca prema graditeljskom nasleđu doveo je do jako lošeg stanja brojnih nepokretnih kulturnih dobara, koje se manifestuje integracijom vegetacije u originalne arhitektonske strukture, odvajanjem građevinskog materijala itd. [10]. Ovakvim postupcima se gube dragocena arhitektonska ostvarenja iz prošlosti i prepuštaju zaboravu. Beleženje podataka o njima i izrada tehničke dokumentacije prepoznati su kao ključni deo očuvanja graditeljskog nasleđa i osnova za postupak njihove zaštite, prezentacije i promocije [8].

Digitalizacija graditeljskog nasleđa je aktuelna u savremenom svetu zbog svojih nesumnjivih prednosti [17]. Beleženje podataka o nekom objektu ili celini na papiru, kao i izrada tehničke dokumentacije ručnim crtanjem i merenjem zamenjuje se procesom u digitalnoj formi i na taj način stvara digitalna baza podataka. Arheolozima i arhitektama se digitalizacijom graditeljskog nasleđa posebno olakšava proces istraživanja i projektovanja, jer im pruža uvid u prethodne studije zgrade i celine, dnevnike i izveštaje o sprovedenim arheološkim radovima itd. Prema I. Bjelić i S. Krasić [1], najfleksibilniji oblik digitalnog zapisa graditeljskog nasleđa je trodimenzionalni model. Sa prethodno rečenim se slaže autorski tim P. Pejić i dr. [14] i dodaje da se digitalni 3D modeli mogu koristiti u svrhu dokumentovanja i arhiviranja njihove fizičke strukture, sprovođenja različitih analiza, restauracije, rekonstrukcije ili

revitalizacije i na kraju, vizuelne prezentacije. Samim tim, stvaranje digitalnih modela graditeljskog nasleđa predstavlja vrlo efikasan i kvalitetan način zaštite, prezentacije i promocije široj javnosti [8].

Jedna od najrasprostranjenijih metoda savremenih tehnologija za digitalno dokumentovanje graditeljskog nasleđa u vidu 3D modela je metoda digitalne fotogrametrije, koja se može definisati kao tehnika dobijanja trodimenzionalnih podataka sa dvodimenzionalnih fotografija [12]. Set fotografija sa poklapanjem odgovarajućih tačaka i jedna relevantna dimenzija sa terena dovoljne su za izradu 3D modela bilo kog objekta. Važno je napomenuti da je za proces fotogrametrije bitno posedovati što veći broj grafičkih i pisanih izvora kako bi se dobio precizniji 3D model. Postoji više metoda fotogrametrije, pri čemu izbor zavisi od cilja istraživanja, zahtevane geometrijske preciznosti i vizuelnog kvaliteta, fizičkih karakteristika objekta i neposredne okoline i finansijske podrške [6]. Samim tim, razlikuju se poluautomatska i automatska metoda prema zastupljenosti ljudskog faktora, tj. savremene tehnologije, a terestrijalna i aerofotogrametrija prema položaju tačke snimanja. U cilju vizuelne prezentacije graditeljskog nasleđa i njegove promocije široj javnosti, nije potrebno izraditi model sa najvišim stepenom preciznosti, što bi značilo da mogu postojati manja odstupanja dimenzija, zanemarljiva u odnosu na celu strukturu. Prema P. Pejić i dr. [14], u ovom slučaju poluautomatska terestrijalna metoda se smatra najpogodnijom zbog vizuelizacije malih objekata, fotorealističnog modela i male veličine dokumenta za digitalnu prezentaciju.

Primena fotogrametrije je izuzetno značajna za digitalnu rekonstrukciju graditeljskog nasleđa, kao metode tehničke zaštite i postupka pomoću kog se objektima i celinama graditeljskog nasleđa mogu izmeniti prostorni i konstruktivni elementi ili delovi, pri čemu se menjaju tehnički parametri u cilju potpune ili što približnije sličnosti sa izvornim oblicima. Rekonstrukcija može biti tačna (na bazi dokumentacije o građevini), analogna (na bazi upoređivanja i određivanja sličnosti sa nekim drugim predmetom) i hipotetička (na bazi pretpostavke o obliku elemenata i delova građevine koje nema više, a koja će se ponovo izgraditi) [16]. Metodom fotogrametrije se mogu rekonstruisati potpuno ili delimično porušeni objekti, pri čemu je potrebno posedovati neki vid dokumentacije prethodnih studija. Samim tim, dokumentacija je neophodna za prenošenje kulturnog nasleđa sa generacije na generaciju, korišćenje zgrade u savremenom uslovima, dobijanje tačnih podataka o zgradi, utvrđivanje problema na istorijskom lokalitetu itd. [19].

U ovom radu je predstavljena primena poluautomatske metode fotogrametrije na primeru napuštenog spomenika kulture Skobaljić grad,

koji se nalazi u Vučju, na 15 km od Leskovca. Detaljnom analizom dokumentacije o spomeniku kulture kroz istoriju, primenom principa analogne rekonstrukcije i digitalne fotogrametrije moguće je napraviti rekonstruisan model ovog utvrđenja iz perioda srednjeg veka, koji će pomoći prezentaciji, turističkoj promociji, njegovom uključivanju u savremeni život, daljim naučnim istraživanjima, edukaciji i podizanju svesti ljudi o zaštiti graditeljskog nasleđa, prvenstveno ovakvih utvrđenja kojih u Srbiji ima mnogo zahvaljujući bogatoj istoriji.

2. SPOMENIK KULTURE SKOBALJIĆ GRAD

Skobaljić grad se nalazi na strmoj i nepristupačnoj lokaciji planine Kukavica, jugozapadno i iznad Vučja, na levoj obali kanjona reke Vučjanke, 15 km južno od Leskovca. Arhitektonski ostaci utvrđenja vezuju se za Nikolu Skobaljića, vlastelina despota Đurđa Brankovića, koji je sredinom XV veka vodio dve bitke protiv Turaka u predelu Banje i kraj planina Trepanje, kod mesta Kisline u oblasti Dubočice [5]. Strateški položaj lokaliteta doprineo je jakom utvrđenju, koje je imalo pogled ka Leskovačkoj kotlini, prirodni sistem odbrane i fortifikacione zidine, ali i branilo veliku oblast srednjovekovne Dubočice i važan trgovački put pravca Beograd-Solun.

Prve radove na Skobaljić gradu sproveo je Narodni muzej u Leskovcu 1954. godine. Tada je organizovano čišćenje grada od rastinja i naslaga šuta kao i postavljanje spomen ploče na ulazu u utvrđenje. Sve do 1984. godine nisu preduzimane aktivnosti na zaštiti lokaliteta od propadanja. Te 1984. godine su počela arheološka istraživanja, a završila se 1990. godine zbog nepovoljne političke situacije u zemlji i problema finansiranja projekta. Svega 144 m² od 4400 m² ukupne površine kompleksa je istraženo, odrađena je tehnička i foto dokumentacija, i publikovano je nekoliko otkrića. Jedno od njih jeste postojanje 4 sloja različitih boja i konzistencije na dubini od 3 m [4]. Najstariji (4. sloj) pripada periodu eneolita, 3. sloj ranoj fazi bronzanog doba, 2. kasnoantičkom-ranovizantijskom periodu, a poslednji najmlađi sloj srednjem veku. Uočeni su tragovi gradnje iz bronzanog doba i pronađen je arheološki materijal koji odgovara periodu kasne antike-rane vizantije. Takođe se došlo da saznanja da je utvrđenje stradalo u požaru krajem VI-početkom VII veka u najezdi Slovena, a nakon toga je obnovom i ojačanjem sačuvanih bedema u periodu od X-XIV veka nastalo srednjovekovno utvrđenje.

Na osnovu Odluke Skupštine Opštine Leskovac br. 06-22/86-01 od 24.06.1986. godine, Skobaljić grad (Zelen grad [2]) je proglašen za nepokretno kulturno dobro – spomenik kulture na katastarskim

parcelama KP br 4323 i 4327 KO Vučje pod imenom srednjovekovno utvrđenje. Ovo višeslojno nalazište je jedinstven spomenik kulture u Srbiji i kao takav se može zaštititi (sl. 1) i sačuvati primenom poluautomatske metode fotogrametrije.



Slika 1. (a) Fotografija severnog bedema Skobaljić grada danas; (b) Fotografija donžon kule Skobaljić grad danas (foto: autorski tim Jovana Stanković i dr.)

3. PROCES POLUATOMATSKE METODE FOTOGRAMETRIJE SKOBALJIĆ GRADA

Proces poluautomatske metode fotogrametrije Skobaljić grada se sastoji iz sledećih faza:

- prikupljanje podataka;
- izrada 3D modela;
- skaliranje modela;
- modelovanje detalja [13] i
- vizuelizacija objekta.

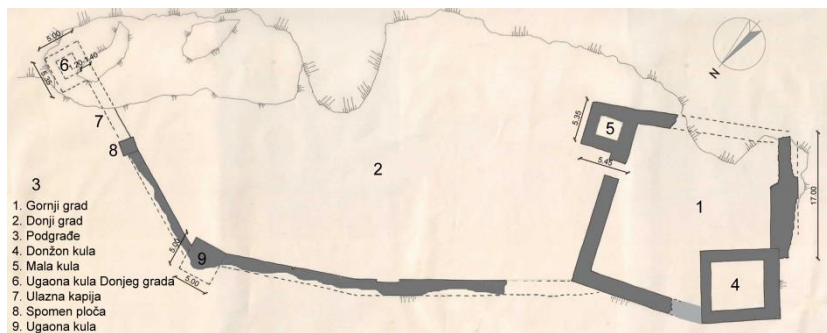
3.1. Prikupljanje podataka

U cilju formiranja preciznijeg 3D modela rekonstruisanog spomenika kulture Skobaljić grad, potrebno je prikupiti sve postojeće podatke u vidu tekstualne, tehničke i fotografske dokumentacije. Za ove potrebe koristiće se prethodna istraživanja lokaliteta od strane arheološkog tima dokumentovana u Dnevnicima i Izveštajima arheoloških iskopavanja 1984-1990. godine, Plan detaljne regulacije spomenika kulture Skobaljić grad sa Studijom zaštite spomenika kulture Skobaljić grad i maketa, tj. replika izrađena prema saznanjima angažovanog arheološkog tima, koja je element stalne postavke Narodnog muzeja Leskovac.

3.1.1. Prethodna istraživanja

Za vreme arheoloških istraživanja u periodu od 1984-1990. godine, istraživački tim je došao do sledećih saznanja dokumentovanih na slici 2 koja će se koristiti za proces poluautomatske metode fotogrametrije [21-31]:

Utvrđenje je nepravilne osnove, koja prati konfiguraciju terena, i sastoji se od Gornjeg i Donjeg grada i podgrađa (pogledati objekte br. 1, 2 i 3 na sl. 2). Gornji grad je približno kvadratnog oblika osnove i nalazi se na zapadnoj strani utvrđenja. U severozapadnom uglu postoje ostaci donžon kule (pogledati objekat br. 4 na sl. 2) od lomljenog i pritesanog kamena vezanog vrućim krečnim malterom. Od ove kule južno se pruža zapadni bedem u dužini od 17 m. Pod pravim uglom u odnosu na prethodno pomenuti bedem nadovezuje se južni bedem Gornjeg grada i mala kula (pogledati objekat br. 5 na sl. 2) postavljena dijagonalno u odnosu na donžon kulu dimenzija 5,35 m x 5,45 m. Pored ove kule nalazi se otvor koji omogućava prelazak iz Gornjeg u Donji grad. Donji grad je opasan bedemima sa severne strane dužine oko 65 m i jugoistočne strane, dok je sa južne strane izostavljen zbog velikog nagiba terena. Položaj podgrađa, svojstvenog ovakvoj vrsti utvrđenja za boravak civilnog stanovništva i njihovo uzgajanje poljoprivrednih resursa, pretpostavlja se severno od severnog bedema na znatno nižoj koti terena. Detaljnim čišćenjem jugoistočnog bedema Donjeg grada utvrđeno je postojanje ugaone kule (pogledati objekat br. 6 na sl. 2) na kraju bedema dimenzija 5,30 m x 5 m od opeke većeg formata sa debljinom zidova od 1,20-1,40 m fundiranim na stenovitoj podlozi. Istraživanjem ove linije odbrane severno od prethodno pomenute kule, otkriven je južni dovratnik ulaza u grad (pogledati objekat br. 7 na sl. 2). Za postojanje severnog dovratnika se ne može sa sigurnošću tvrditi, jer je na njegovom mogućem mestu 1954. godine postavljena spomen ploča (pogledati objekat br. 8 na sl. 2). U severoistočnom uglu Donjeg grada otkrivena je kula (pogledati objekat br. 9 na sl. 2) kvadratne osnove 5 x 5 m debljine zidova 1,10-1,35 m podignuta na steni koja se kaskadno spušta ka istoku.

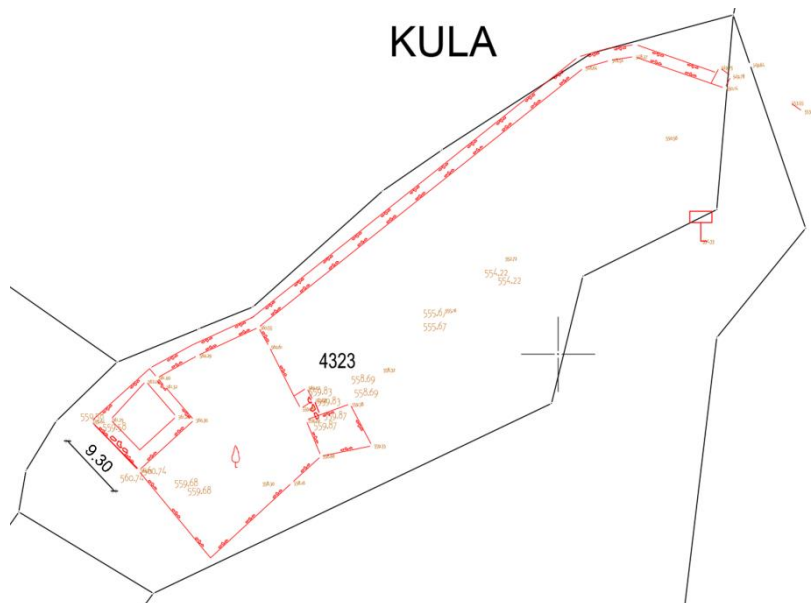


Slika 2. Skica Skobaljić grada sa označenom legendom objekata utvrđenja (Situacioni plan, Zavod za zaštitu spomenika Niš, 1985. godine, http://studije-zastite.zzs-knis.rs/assets/images/skobaljić/situacioni_plan.jpg)

3.1.2. Plan detaljne regulacije

Plan detaljne regulacije Skobaljić grad usvojen je jula 2020. godine i njime je definisan je planski osnov organizacije, korišćenja i uređenja prostora kompleksa baziran na osnovnim postavkama planske i strateške dokumentacije višeg reda [15]. Za potrebe Plana izrađena je Studija zaštite spomenika kulture Skobaljić grad od strane Zavoda za zaštitu spomenika Niš sa ciljem podsticanja izrade drugih dokumenata u procesu rehabilitacije spomenika kulture (studija izvodljivosti, plan upravljanja, biznis plan, projektno-tehnička dokumentacija i sl.), ukazivanja na neophodnost izrade projektne dokumentacije za hitne i neodložne radove na sanaciji ugroženih struktura, predstavljanja smernica za sprovođenje rehabilitacije spomenika, podizanja svesti o vrednosti nasleđa za samu zajednicu i donosiocima odluka i uključivanja civilnog sektora i ostalih zainteresovanih strana u poslove zaštite i očuvanja spomenika kulture [18].

Plan detaljne regulacije spomenika kulture Skobaljić grad se završava tehničkom dokumentacijom sa sledećim grafičkim priložima: Katastarsko-topografski plan; Granica obuhvata i položaj u gradu Leskovcu na orto-podlozi; Izvod iz Prostornog plana grada Leskovca; Postojeće stanje; Plan namene površina; Plan regulacije i nivelacije sa infrastrukturom; Plan građevinskih parcela javne namene i Plan zone zaštite [15]. Od grafičke dokumentacije za potrebe poluautomatske metode fotogrametrije koristiće se Katastarsko-topografski plan (sl. 3) kao prikaz postojećeg stanja spomenika kulture.



Slika 3. Katastarsko-topografski plan Skobaljić grada sa označenom dimenzijom donžon kule [15]

3.1.3. Maketa u Narodnom muzeju Leskovac

Prema J. Pavličić [11], najvažniji deo procesa očuvanja i brige o uništenim ili oštećenim objektima graditeljskog nasleđa jeste proizvodnja novih dokumenata koji će svedočiti o aktuelnom stanju baštine, ali i o njenom doživljaju, percepciji unutar neke zajednice, o istoriji korišćenja, promeni stanja itd., a arhitektonske makete se smatraju pogodnim za ovu svrhu. Upravo je arheološki tim, u periodu istraživanja spomenika kulture Skobaljić grad, izradio arhitektonsku maketu srednjovekovnog utvrđenja, kao zamenski predmet pri komparaciji, vizuelizaciji teorijskih pretpostavki i utvrđivanja sleda događaja i slojevitosti spomenika. Prema I. Maroević [7], ovakva vrsta makete nije uvek verna replika, već se oblikuje prema poznatim činjenicama i nivoima oštećenja originalnog predmeta, tako da predstavlja rekonstrukciju originalnog arhitektonskog objekta graditeljskog nasleđa.

Maketa Skobaljić grada (sl. 4 i 5) je primer analogne rekonstrukcije, pri čemu je tim kao materijal koristio sopstvene rezultate istraživanja i upoređivao sa drugim očuvanim utvrđenjima nastalim u tom periodu poput tvrđave Markovo kale kod Vranja, tvrđave u Vučitrnu, Bovan kod Aleksinca, Trubačevo na Moravi kod Stalaća itd. Ova maketa je element stalne postavke Narodnog muzeja Leskovac i njene fotografije će poslužiti kao materijal za postupak fotogrametrije.



Slika 4. Fotografija 1 makete Skobaljić grada, elementa stalne postavke Narodnog muzeja Leskovac (foto: autorski tim Jovana Stanković i dr.)

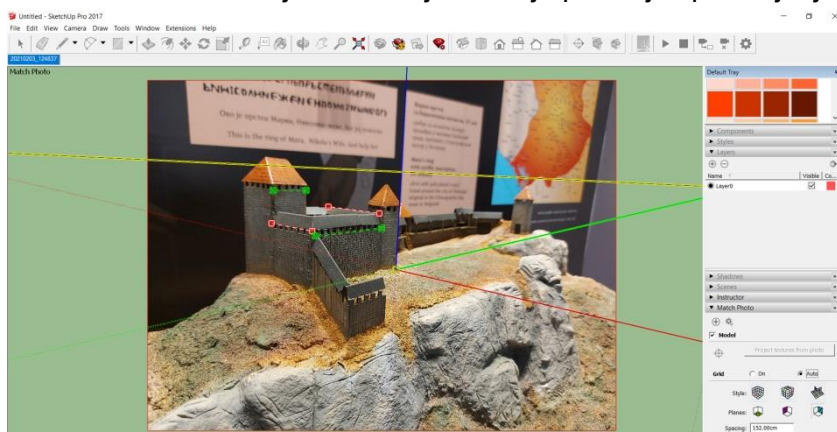


Slika 5. Fotografija 2 makete Skobaljić grada, elementa stalne postavke Narodnog muzeja Leskovac (foto: autorski tim Jovana Stanković i dr.)

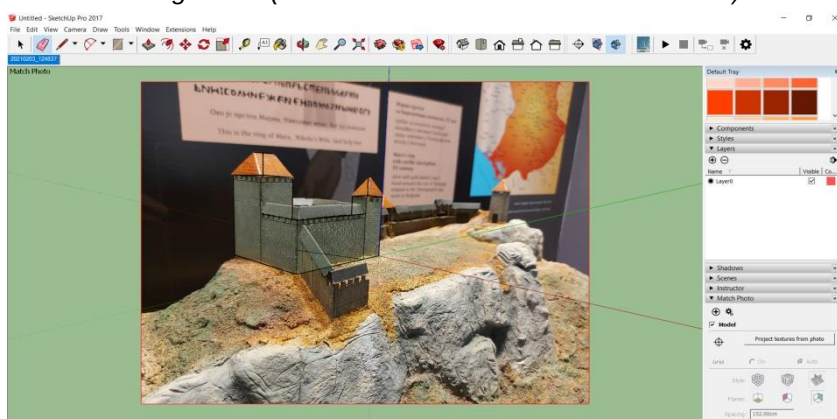
3.2. Izrada modela

Inicijalni korak u ovom procesu poluautomatske metode fotogrametrije je odabir podataka za bazu fotogrametrijskog modelovanja, pri čemu je neophodno preklapanje fotografija, jer svaki geometrijski element, čiji položaj želimo da odredimo, mora biti vidljiv na bar dve fotografije [17]. Ulazni podaci za proces fotogrametrije biće fotografske slike makete srednjovekovnog utvrđenja koje imaju osobine perspektivnog preslikavanja prostorne strukture na ravan i jedna dimenzija sa terena.

Za izradu 3D modela koristiće se softverski program *SketchUp*. Adekvatan set fotografija makete iz različitih uglova, tačnije njih 4, uvozi se u program opcijama *File-Import-Import as a New Matched Photo* i na njima obeležavaju nedogledi pravaca a, b i c, tj. tačke Na, Nb i Nc (sl. 6), predstavljene redom crvenom, zelenom i plavom bojom. Zatim sledi obeležavanje kontrolnih tačaka, pri čemu je njihova distribucija i broj, tzv. oblak tačaka od izuzetne važnosti. Prvenstveno se obeležavaju tačke donžon i male kule i bedema Gornjeg grada (sl. 7), a zatim bedema i kula u Donjem gradu i njihovim povezivanjem pravama dobijaju ravni elementi. Ako se neki element ne vidi na dve fotografije, njegov položaj se određuje korišćenjem veze sa poznatim elementima [17]. Analiza i uvođenje relacija je ključ procesa modelovanja sa orijentisanih fotografija [17]. Od relacija u ovom procesu koriste se relacije incidencije, relacije položaja i ponavljanja.



Slika 6. Importovana fotografija u „SketchUp“-u sa označenim osama i nedogledima (foto: autorski tim Jovana Stanković i dr.)



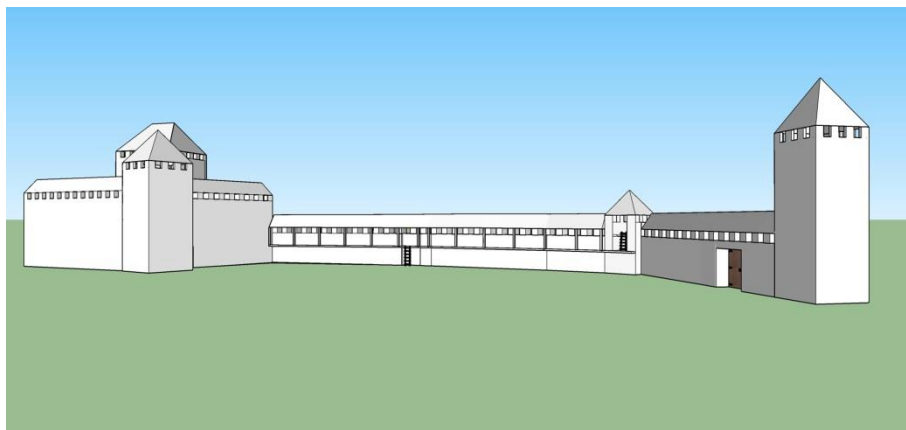
Slika 7. Fotografija sa iscrtanim bedemima i kulama Gornjeg grada (foto: autorski tim Jovana Stanković i dr.)

3.3. Skaliranje modela

Skaliranje modela objekta se ostvaruje opcijom *Tape Measure*, pri čemu će kao referenca poslužiti spoljna dužina donžon kule od 9,30 m sa Katastarsko-topografskog plana dokumentacije Plana detaljne regulacije Skobaljić grad (pogledati sl. 3). Nakon skaliranja, 3D model se postavlja na skicu iz 1985. godine (pogledati sl. 2), jer se na njoj najbolje uočavaju svi istraženi arhitektonski elementi srednjovekovnog utvrđenja u osnovi. Veliki uticaj ljudskog faktora u procesu fotogrametrije doveo je do malog procenta nepodudarnosti sa skicom, tako da je usledilo pomeranje pojedinih tačaka i ravni utvrđenja. Potrebno je naglasiti da su zapadni bedem i kula u severoistočnom uglu utvrđenja modelovani prema prikupljenoj grafičkoj dokumentaciji.

3.4. Modelovanje detalja

Izlazni podatak ove faze procesa fotogrametrije je 3D model sa jednostavnim geometrijskim telima, koji predstavlja polazište za izradu detalja konstrukcije i materijalizacije. Kod predstojeće faze je potrebno naglasiti da su izrazito korišćene relacije ponavljanja za modelovanje stubova, strelnica sa zupcima za zaštitu strelaca, stubova šetnih staza i stepenica. Ovde se takođe dodaju ulazna kapija u Gornji i Donji grad i krovne ravni kula i bedemskih platana (sl. 8).



Slika 8. Izgled 3D modela sa detaljima konstrukcije (foto: autorski tim Jovana Stanković i dr.)

3.5. Vizuelizacija modela

U cilju dobijanja fotorealističnog modela za prezentaciju i promociju lokaliteta Skobaljić grada, 3D model je podvrgnut vizuelizaciji u softverskom programu *Lumion*, pri čemu su dodati materijali svojstveni

ovakvoj vrsti objekta. Krajnji rezultat jeste realistična rekonstrukcija, tj. digitalna interpretacija spomenika kulture Skobaljić grad iz perioda srednjeg veka (sl. 9 i 10).



Slika 9 i 10. Konačni izgled 3D modela nakon vizuelizacije u „Lumion“-u

4. DISKUSIJA

Trodimenzijsalni digitalni model rekonstruisanog spomenika kulture Skobaljić grad predstavlja fleksibilan vid dokumentacije, koji može imati primenu u turističkoj prezentaciji i promociji kulturnog dobra. Analizom Plana detaljne regulacije spomenika kulture Skobaljić grad sa Studijom zaštite došlo se do saznanja da su aktivnosti dve faze rehabilitacije

utvrđenja ustanovljene, dok aktivnosti treće faze (uređenje, prezentacija i promocija) nisu detaljno definisane. Autorski tim je došao do zaključka da ovaj rad može poslužiti upravo definisanju aktivnosti te faze, tj. može dati svoj doprinos adekvatnom prezentacijom i promocijom koristeći upravo 3D model analogne rekonstrukcije proisteklog procesom poluautomatske metode fotogrametrije.

U svetu savremene tehnologije aktuelna je tema virtuelne i proširene realnosti, pri čemu se virtuelna definiše kao stvaranje novog okruženja kroz koji se korisnik kreće, a proširena kao ubacivanje digitalnih objekata u realno okruženje. Prema C. Garau [3], pametni telefoni i računarski tableti sa omogućenom proširenom realnošću mogu se koristiti u zaštiti kulturnog nasleđa integrišući virtuelne elemente sa onim što se pojavljuje na lokaciji kroz vizuelizaciju prvobitnih arhitektonskih struktura koje pomažu u povećanju svesti o mestu na osnovu njegove istorijske (za razliku od samo vidljive) osobenosti. Upravo izrađen 3D model može poslužiti u turističkom razgledanju lokaliteta Skobaljić grada pri čemu će se, nakon konzervacije i restauracije ostataka utvrđenja, aplikacijom na telefonu i usmeravanjem ka lokalitetu prikazivati arhitektonske strukture srednjovekovnog utvrđenja, tj. prethodno izrađen model procesom poluautomatske fotogrametrije. Ova tema će biti predmet budućih istraživanja.

5. ZAKLJUČAK I BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

Srednjovekovno utvrđenje Skobaljić grad je spomenik kulture od izuzetnog značaja za turističku ponudu Vučja i grada Leskovca. Ovo višeslojno nalazište je jedinstveno u celoj Srbiji, jer prve građevine datiraju iz perioda praistorije, a najmlađe se vezuju za srednji vek i istorijsku ličnost Nikolu Skobaljića, vlastelina ovog utvrđenja.

Neizvršavanje opštih mera zaštite dovelo je do katastrofalnog stanja spomenika, tj. neprepoznatljivosti arhitektonskih struktura utvrđenja i mogućnosti propadanja. Najveći problem jeste finansiranje zaštite. Savremeni pristup u zaštiti spomenika ističe značaj odabira metode zaštite i uključivanje spomenika u savremene tokove koji vode održivom razvoju, samim tim, finansiranju spomenika. Ovde je neophodna dobra promocija i prezentacija kulturnog dobra, koja se ostvaruje primenom novih savremenih tehnologija.

Digitalizacija kulturnog nasleđa je tema današnjice, pri čemu se digitalni 3D model smatra najfleksibilnijim oblikom zapisa i može primeniti u pedagoške, naučne i na kraju, turističke svrhe. Fotogrametrija je jedna od savremenih metoda primenjivih u

digitalizaciji kulturnog nasleđa, pri čemu je potrebna određena dokumentacija o objektu. Istorijskom metodom je prikupljena i analizirana sva dokumentacija o ovom utvrđenju, Plan detaljne regulacije spomenika kulture Skobaljić grad izrađen od strane Direkcije za urbanizam i izgradnju Leskovac 2020. godine sa Studijom zaštite spomenika kulture Skobaljić grada izrađenom od strane Zavoda za zaštitu spomenika Niš 2019. godine i maketa utvrđenja izrađena od strane arheološkog tima, koja je element stalne postavke Narodnog muzeja Leskovac. Tekstualnom i grafičkom dokumentacijom su definisane sve aktivnosti i mere zaštite koje treba preduzeti, sem aktivnosti uređenja, promocije i prezentacije utvrđenja kao treće faze, koje će biti objavljene nakon realizacije prethodnih.

Fotografije makete, katastarsko-topografski plan i skica utvrđenja iz 1985. godine poslužile su za izradu 3D modela u programu *SketchUp*, nakon čega su izrađeni detalji, a kasnije materijalizacija i vizuelizacija u programu *Lumion*. Rezultat jeste rekonstruisan model spomenika kulture iz perioda srednjeg veka procesuiran poluautomatskom metodom fotogrametrije.

Ovaj model upravo može poslužiti u trećoj fazi programa rehabilitacije utvrđenja, koja se odnosi na uređenje, promociju i prezentaciju spomenika kulture. Primena proširene realnosti u turističkoj ponudi na ovom lokalitetu biće predmet sledećeg istraživanja.

Cilj istraživanja jeste primenom savremenih digitalnih tehnologija osnažiti mogućnosti za razvoj turizma ovog dela Srbije, edukovati buduće generacije i podići svest ljudi o zaštiti graditeljskog nasleđa, prvenstveno ovakvih utvrđenja kojih u Srbiji ima mnogo zahvaljujući bogatoj istoriji.

6. LITERATURA

- [1] Bjelić, I. and Krasić, S. „*Significance of digital fotogrametry in protection of cultural heritage*“, in: Proceedings of International conference MoNGeometrija 2012, 21-24th June 2012, Novi Sad, eds. R. Obradović, Faculty of Technical Sciences, University in Novi Sad, Novi Sad, 2012, pp 75-85.
- [2] Deroko, A. *Srednjovekovni gradovi u Srbiji, Crnoj Gori i Makedoniji*, Prosveta, Beograd, 1950.
- [3] Garau, C. „*From territory to smartphone: Smart fruition of cultural heritage for dynamic tourism development*“. Planning Practice and Research 29.3, 2014, pp 238-255.
- [4] Janković, Đ. „*Uloga i značaj grada Nikole Skobaljića u srednjem veku*“, u: Leskovački zbornik XXXI, 1991, str. 39-43.

- [5] Jocić, M. i Janković, Đ. „Rezultati istraživanja na srednjovekovnom utvrđenju Skobaljić grad“, u: Leskovački zbornik XXVII, 1987, str. 61-68.
- [6] Krasić, S. and Pejić, P. „Comparative Analysis of Terrestrial Semi-automatic and Automatic Photogrammetry in 3D Modelling Process“, Nexus Network Journal, vol. 16, 2014, pp 273-283.
- [7] Maroević, I. „Zamjena za muzejske predmete (tipologija i definicija)“, Informatica museologica, Vol. 16 No. 3–4 (Zagreb), 1985, str. 5–6.
- [8] Momčilović-Petronijević, A. et al. „Documentation of historical objects as an aspect of architectural education“, in: Conference Proceedings 6th International conference contemporary achievements in Civil Engineering, Subotica, 20th April 2018, eds. M. Belešević et al., Faculty of Civil Engineering Subotica, Subotica, 2018, pp 505-514.
- [9] Nenadović, S. *Zaštita graditeljskog nasleđa*, Arhitektonski fakultet u Beogradu, Beograd, 1980.
- [10] Nikolić, M. *Primena principa zaštite i prezentacije graditeljskog nasleđa na srednjovekovnim utvrđenim gradovima u Srbiji (doktorska disertacija)*, Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2014.
- [11] Pavličić, J. „Drvene makete srpskih srednjovekovnih crkava učitelja Petra D. Petrovića: Prilog proučavanju“, u: Zbornik radova: Prva međunarodna konferencija Smartart – Umetnost i nauka u primeni- Od inspiracije do interakcije, 28-30. novembar 2019, Beograd, ur. M. Prosen, Fakultet primenjenih umetnosti, Beograd, 2020, str.312-322.
- [12] Pejić, P., Krasić, S. and Bjelić, I. „Comparative Study on Photogrammetric Methods for 3D Modeling of Building Heritage“, in: Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timisoara, 58(72), eds. Politehnica Publishing House, Timisoara, 2013, pp 87-91.
- [13] Pejić, P. and Krasić, S. „Creation of virtual 3D models of the existing architectonic structures using the web resources“, SPATIUM, No. 35, June 2016, (Belgrade), pp 30-36.
- [14] Pejić, P. et al. „3D virtual modelling of existing objects by terrestrial photogrammetric methods - case study of barutana“, Technical Gazette, Vol. 24 No. Supplement 1, 2017, pp 233-239.
- [15] *Plan detaljne regulacije za spomenik kulture Skobaljić grad*, prir. Direkcija za urbanizam i izgradnju Leskovac, Službeni glasnik grada Leskovca 42/20, Leskovac, 2020.
- [16] *Predavanja iz predmeta Zaštita graditeljskog nasleđa*, prir. N. Kurtović Folić, Građevinsko arhitektonski fakultet Niš, Niš
- [17] Stojaković, V. Generisanje prostora na osnovu perspektivnih slika i primena u oblasti graditeljskog nasleđa (doktorska disertacija), Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, Novi Sad, 2011.

- [18] *Studija zaštite spomenika kulture Skobaljić grad*, Vučje, Grad Leskovac, prir. I. Cvetković i Đ. Stošić, Zavod za zaštitu spomenika kulture Niš, Niš, 2019 <http://studije-zastite.zzsknis.rs/skobaljic-grad/>
- [19] Yilmaz, H. M. et al. „Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage“, *Journal of Cultural Heritage*, 8(4), 2007, pp 428-433.
- [20] http://heritage.gov.rs/latinica/nepokretna_kulturna_dobra.php

7. IZVORI

Arhiv Zavoda za zaštitu spomenika kulture Niš

- [21] Skobaljić grad 1984, 02 br. 34/1, *Izveštaj sa arheoloških istraživanja na Skobaljić gradu 1984. godine*, pr. D. Maksimović, 23.01.1985. (izdato od strane Narodnog muzeja Leskovac)
- [22] Skobaljić grad 1985, br. 45/1, *Izveštaj o istraživačkim radovima u 1985. godini*, pr. D. Maksimović, 22.01.1986. (izdato od strane Narodnog muzeja Leskovac)
- [23] Skobaljić grad 1985, *Dnevnik arheoloških iskopavanja na Skobaljić gradu 1985. godine* (izdato od strane Narodnog muzeja Leskovac)

Arhiv Narodnog muzeja Leskovac

- [24] Skobaljić grad 1986, br. 147/1, *Izveštaj o arheološkim radovima u 1986. godini*, pr. M. Jocić, 02.09. 1986.
- [25] Skobaljić grad 1986, *Dnevnik arheoloških iskopavanja na Skobaljić gradu 1986. godine*
- [26] Skobaljić grad 1987, br. 154/1, *Izveštaj o izvršenim arheološkim radovima u 1987. godini*, pr. M. Jocić, 23.11. 1987.
- [27] Skobaljić grad 1987, *Dnevnik iskopavanja srednjovekovne tvrđave Skobaljić gradu u 1987. godini*
- [28] Skobaljić grad 1988, br. 168/1, *Izveštaj o izvedenim radovima na arheološkom lokalitetu Skobaljić grad kod Vučja u 1988. godini*, pr. M. Jocić, 01.12. 1988.
- [29] Skobaljić grad 1988, *Dnevnik istraživanja Skobaljić grada u 1988. godini*
- [30] Skobaljić grad 1989, *Dnevnik iskopavanja na Skobaljić gradu 1989. godine*
- [31] Skobaljić grad 1990, *Dnevnik iskopavanja višeslojnog arheološkog nalazišta Skobaljić grad u 1990. godini*

Posebnu zahvalnost autorski tim duguje Narodnom muzeju Leskovac i Zavodu za zaštitu spomenika kulture Niš na ustupljenoj dokumentaciji, koja je bila od ključnog značaja za sprovođenje istraživanja i pisanje naučnog rada.

PRIMENA FRP MATERIJALA U OJAČAVANJU ARMIRANO-BETONSKIH KONSTRUKCIJA

UDK : 624.012.45.059.3
678.7

Žarko Petrović⁸, Slobodan Ranković⁹, Marina Mijalković¹⁰

Rezime

Najčešći razlozi ojačavanja ili obnavljanja elemenata armirano-betonskih (AB) konstrukcija su oštećenja konstrukcija usled zemljotresa, promena namene konstrukcija i implementacija dodatnih opterećenja, kao i zadovoljavanje novih propisa i standarda, zbog čega se javlja problem smanjene ili nedovoljne nosivosti konstrukcijskih elemenata ili konstrukcije u celini. U poslednjih tridesetak godina metode bazirane na upotrebi vlaknima armiranim polimernim (Fiber reinforced polymer – FRP) materijalima postale su osnovne metode u ojačavanju AB konstrukcija.

Ključne reči: ojačavanje, armirano-betonske konstrukcije, FRP materijali

APPLICATION OF FRP MATERIALS IN STRENGTHENING OF RC STRUCTURES

Abstract

The most common reasons for strengthening or renewing elements of reinforced concrete (RC) structures are damage to structures due to earthquakes, change of purpose of structures and implementation of additional loads, as well as meeting new regulations and standards, which causes the problem of reduced or insufficient load-bearing elements. In the last thirty years, methods based on the use of fiber reinforced polymer (FRP) materials have become the basic methods in strengthening RC structures.

Key words: strengthening, reinforced concrete structures, FRP materials

⁸ Žarko Petrović, dr, docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu

⁹ Slobodan Ranković, dr, docent, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu

¹⁰ Marina Mijalković, dr, redovni profesor, Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu

1. UVOD

Građevinskom industrijom su tokom istorije dominirala četiri tradicionalna materijala: kamen, drvo, beton i čelik. Do pre nekoliko stotina godina, kamen i drvo su bili osnovni materijali za izgradnju građevinskih konstrukcija. U proteklih dvesta godina, konstrukcijski čelik i armirani beton su postali vodeći konstrukcijski materijali, tako da je većina modernih konstrukcija izrađena od ovih materijala.

Međutim, višedecenijsko nesavesno i prekomerno korišćenje konstrukcija od čelika i betona rezultiralo je situacijom koja se približava globalnoj infrastrukturnoj krizi. Postojeća javna infrastruktura u Evropi, Sjedinjenim Američkim Državama, Kanadi i ostalim razvijenim zemljama je u nezadovoljavajućem stanju sa mnogih aspekata a bez javnih sredstava potrebnih za zamenu postojećih konstrukcija ili izgradnju novih [9]. U Srbiji je situacija takva da postoji ogromna potreba za sanacijama i ojačavanjem postojećih objekata, naročito infrastrukturnih, tako da oko 1500 mostova u zemlji zahteva proveru nosivosti po važećim propisima i konstruktivne intervencije [12].

Ojačavanje betonskih konstrukcija moguće je postići na više načina: smanjenjem statičkih uticaja, povećanjem nosivosti preseka, promenom stanja naprezanja itd. Povećanje nosivosti preseka je najčešći vid ojačanja betonskih konstrukcija i može se ostvariti povećanjem dimenzija betonskog preseka, dodavanjem čelične armature ili dodavanjem armature od kompozitnih materijala.

Vlaknima armirani polimeri (Fiber Reinforced Polymer – FRP) su podgrupa klase materijala koji se nazivaju kompoziti ili kompozitni materijali. Kompozitni materijali su napravljeni od dva ili više materijala koji formiraju nov materijal sa poboljšanim osobinama koje su superiorne u odnosu na osobine individualnih sastojaka pojedinačno. Iako se o kompozitnim materijalima najčešće razmišlja kao o savremenim materijalima razvijenim u novije vreme, mnogi kompoziti kao što je recimo beton, kompozitni materijal sastavljen od šljunka, peska i cementne paste, koriste se u građevinarstvu već nekoliko stotina godina.

Glavni cilj rada je prikaz primena FRP materijala u ojačavanju AB konstrukcija sa akcentom na ojačavanju AB grednih nosača.

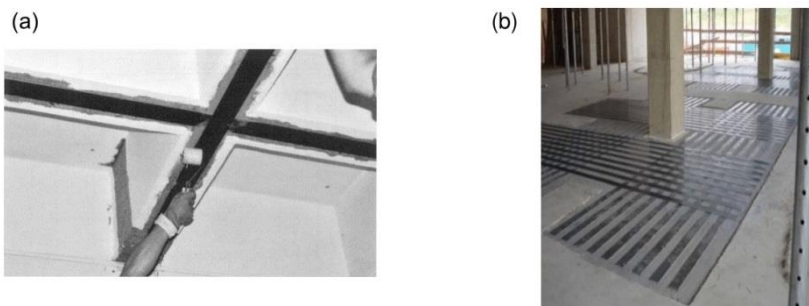
2. NAJČEŠĆE PRIMENE FRP MATERIJALA U OJAČAVANJU ELEMENATA AB KONSTRUKCIJA

FRP materijali se kao spoljašnja armatura u ojačavanju ili obnavljanju AB konstrukcija najčešće koriste za [8]:

- povećavanje nosivosti AB elemenata opterećenih na savijanje,
- povećavanje nosivosti AB elemenata opterećenih na smicanje,
- povećavanje nosivosti aksijalno pritisnutih AB stubova.

2.1. Povećanje nosivosti AB elemenata opterećenih na savijanje

Kod povećavanja nosivosti AB elemenata opterećenih na savijanje FRP sistem za ojačanje se postavlja na zategnutoj i/ili bočnoj strani kao dodatna zategnuta armatura (Slika 1). Detaljniji opis povećavanja nosivosti AB greda opterećenih na savijanje dat je u delu 2.4.



Slika 1. Ojačavanje AB elemenata opterećenih na savijanje korišćenjem spolja zalepljene FRP armature (a) [7] (b) [10]

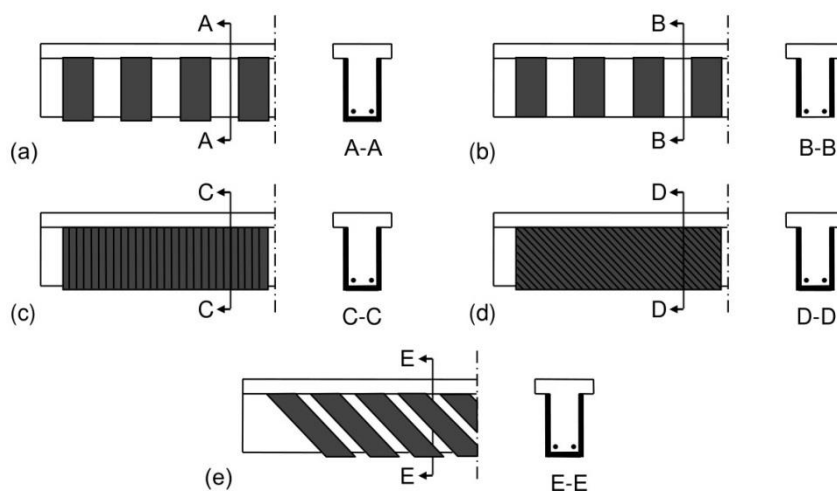
2.2. Povećanje nosivosti AB elemenata opterećenih na smicanje

U slučaju povećavanja nosivosti AB greda opterećenih na smicanje, FRP materijali se lepe na bočne strane grede kao što je prikazano na Slici 2. Na taj način se povećava nosivost AB greda na smicanje.



Slika 2. Ojačavanje AB greda na savijanje i smicanje [5]

U ovom slučaju vlakna mogu biti orijentisana pod bilo kojim uglom u odnosu na podužnu osu grede. Elementi od FRP materijala mogu biti primenjeni samo na bočnoj strani (Slika 3a) ili u obliku U-omotača (Slika 3b) koji su kontinualni i nalaze se i na donjoj strani grede.



Slika 3. Različiti načini povećavanja nosivosti AB greda opterećenih na smicanje spoljašnjim lepljenjem FRP armature

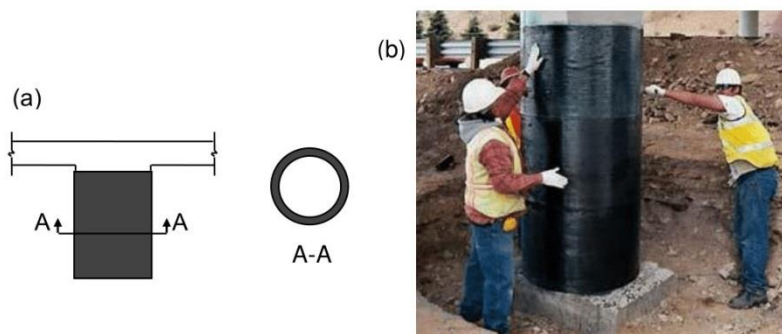
U-omotači imaju dodatnu prednost u poboljšanju sidrenja FRP armature u slučaju povećavanja nosivosti greda opterećenih na savijanje kada su postavljeni preko te armature. FRP armatura u slučaju povećavanja nosivosti na smicanje može se primeniti i u vidu kontinualnih traka konačne širine. Spolja zalepljena FRP armatura radi na način sličan unutrašnjim čeličnim uzengijama čime se povećava nosivost na smicanje betona.

Kako je dužina na kojoj se FRP uzengije mogu ankerisati (sidriti) ograničena visinom grede, kvalitet postojećeg betona je od presudnog značaja. Pored toga, nekad je neophodno postaviti podužnu FRP traku kako bi se poboljšalo sidrenje armature kojom se povećava nosivost na smicanje. Kako bi se izbegao moguć lom FRP traka usled koncentracije napona u uglovima greda, uglove bi trebalo zaobliti sa minimalnim poluprečnikom od 15 mm [5].

Za razliku od primena povećavanja nosivosti na savijanje spolja zalepljenom FRP armaturom, kada je lom uglavnom duktilan, lom usled smicanja je krt i javlja se iznenada. Kako bi se izbegao iznenadni lom konstrukcije usled smicanja, najbitnija je kontrola deformacija FRP sistema za ojačanje.

2.3. Povećanje nosivosti aksijalno pritisnutih stubova

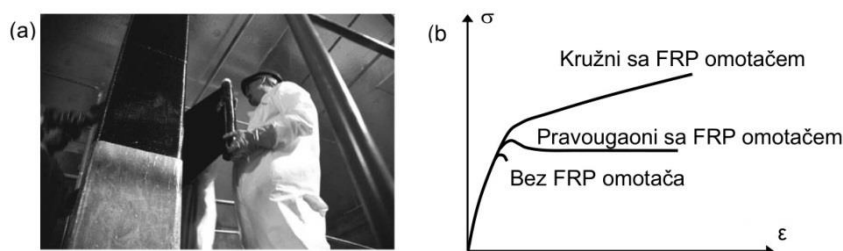
Postojeći betonski stubovi izloženi opterećenju pritiska mogu se ojačati spolja zalepljenim FRP omotačima (platnima) obmotavanjem stubova (Slika 4). Kada je stub izložen aksijalnom pritisku, skraćuje se podužno ali se širi bočno. Ovo širenje izaziva pojavu napona zatezanja u FRP omotaču koji uteže (confine) beton u kome se javlja prostorno stanje napona. Kao posledice ovog stanja napona je i povećanje nosivosti, odnosno jači i duktilniji konstrukcijski elementi.



Slika 4. (a) Ojačanje kružnog AB stuba korišćenjem spolja zalepljene FRP armature; (b) Upotreba FRP platna u ojačavanju kružnog AB stuba [15]

Spolja zalepljena FRP platna se takođe mogu koristiti i za povećavanje nosivosti kratkih aksijalno napregnutih pravougaonih AB stubova (Slika 5a). Međutim, ima veoma malo eksperimentalnih podataka o ponašanju ovih elemenata, a obmotavanje FRP platnima je

znatno manje efikasno sa stanovišta povećanja nosivosti kod stubova koji nisu kružnog poprečnog preseka (Slika 5b).

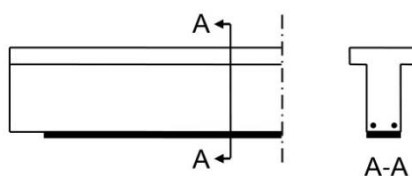


Slika 5. (a) Obmotavanje pravougaonog stuba FRP platnom [5]; (b) Upoređenje kriva σ - ϵ zavisnosti kružnog i pravougaonog AB stuba sa i bez ojačanja

Spolja zalepljena FRP armatura se može koristiti i za povećanje nosivosti na smicanje i kružnih i pravougaonih AB stubova korišćenjem istih principa kao i onih za povećavanja nosivosti AB greda opterećenih na smicanje.

2.4. Povećanje nosivosti AB greda opterećenih na savijanje

Povećanje nosivosti (ojačavanje) AB greda opterećenih na savijanje postiže se postavljanjem FRP sistema za ojačanje na zategnutoj površini grede (ili dela grede) kako bi se povećala ukupna sila zatezanja u elementu, a samim tim i granični moment savijanja (moment nosivosti). U slučaju ojačanja AB greda, vlakna FRP armature su paralelna sa pravcem dominantnog napona zatezanja, tj. paralelna sa podužnom osom grede (Slika 6).



Slika 6. Ojačavanje armiranobetonske T grede opterećene na savijanje

Analiza greda ojačanih na savijanje može se sprovesti prema postupku koji se koristi kod analize greda od armiranog betona uz uslov

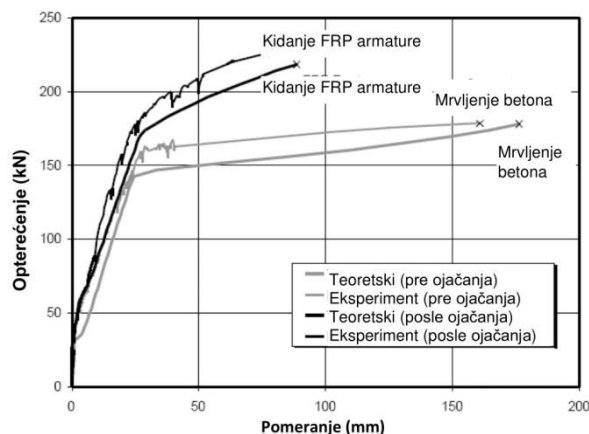
da se uticaj spoljašnje FRP armature uzme u obzir na adekvatan način i da je specijalna pažnja posvećena problemu veze između betona i FRP armature. Primena dve najčešće metode za povećanje nosivosti AB greda opterećenih na savijanje prikazana je na Slici 7.



Slika 7. Povećanje nosivosti AB elemenata opterećenih na savijanje [4]

Povećanje nosivosti AB greda opterećenih na savijanje FRP sistemima je analogno dodavanju čeličnih traka ili lamela za ojačanje na zategnutoj površini grede. Međutim, postoje dve glavne razlike: FRP armatura se ponaša na linearno-elastičan način i nema tečenja i, FRP sistemi za ojačavanje su osetljiviji u odnosu na sisteme za ojačanje čeličnim pločama na lom odvajanjem (debonding, delamination).

Razlog tome leži u činjenici da se tečenje čeličnih ploča javlja pri sličnoj dilataciji kao i tečenje unutrašnje čelične armature tako da je nivo napona u sistemu ojačanja čelikom ograničen a pri tome se čelične ploče najčešće ankerišu čeličnim zavrtnjima ili samo na krajevima ili celom dužinom ploče. Za razliku od ojačavanja čeličnim pločama, kod ojačavanja FRP sistemima koji imaju čvrstoću pri zatezanju veću od 2000 MPa i modul elastičnosti veći od 280 GPa, nivo napona u FRP armaturi može biti značajno veći. Zbog toga povećanje nosivosti na savijanje koje se dobija FRP sistemom za ojačanje može biti znatno veće u odnosu na primenu čeličnih sistema. Ukoliko se tečenje unutrašnje čelične armature kod ojačane AB grede javi pre bilo kog oblika loma FRP sistema za ojačanje (što je poželjno), FRP sistem će „prihvatiti“ opterećenje koje je veće od opterećenja tečenja unutrašnjeg čelika. Velika sila zatezanja u FRP sistemima ojačanja, kao i velika pomeranja posle pojave tečenja armaturnog čelika u elementu često prouzrokuju odvajanje FRP sistema za ojačanje od betona. Zbog toga se maksimalni napon i dilatacija u FRP armaturi najčešće ne mogu postići i oni su ograničeni u postupku projektovanja kako bi se izbegla pojava odvajanja FRP sistema.



Slika 8. Krive zavisnosti između opterećenja i pomeranja preseka u sredini AB gred [4]

Karakteristična kriva zavisnosti između opterećenja i pomeranja preseka na sredini AB grede ojačane FRP sistemom prikazana je na Slici 8 [4].

U početku se greda ponaša kao i konvencionalna AB greda sa unutrašnjom čeličnom armaturom koja nosi većinu sile zatezanja u preseku. U nekom trenutku počinje tečenje zategnute čelične armature posle čega ona ne može da primi dodatnu silu zatezanja što se manifestuje na dijagramu kao promena nagiba krive zavisnosti između opterećenja i pomeranja. Dodatnu silu zatezanja prima FRP sistem čime se postiže povećanje nosivosti elementa. Na kraju, pri određenom nivou opterećenja dolazi do loma ojačane grede usled nekog od različitih oblika loma koji se mogu javiti kod ovakvih nosača [4].

Bez obzira na problem odvajanja koji je pomenut ranije, analiza i projektovanje FRP sistema za ojačanje na savijanje prema uputstvu američkog instituta za beton [1], kao i prema uputstvima međunarodnog udruženja za beton [7], bazirano je na tradicionalnim pretpostavkama projektovanja armiranog betona koje obuhvataju linearnu raspodelu dilatacija po visini preseka i ravnotežu unutrašnjih sila u bilo kom preseku AB grede. Ovo podrazumeva da relativno aksijalno pomeranje (klizanje) između FRP sistema i betona ne postoji (tj. postoji kompatibilnost aksijalnih dilatacija na dodirnoj površini) i da ne postoji deformacija na smicanje lepka pri prenošenju sile od betona na FRP sistem za ojačanje. Ove pretpostavke važe i kada počne tečenje

zategnute čelične armature, a i kada betonski zaštitni sloj između čelične armature i FRP sistema za ojačanje značajno ispuca.

Ojačanje elemenata opterećenog na savijanje je moguće samo ukoliko postoji dodatni kapacitet pritisnutog dela betonskog preseka koji bi dozvolio povećanje unutrašnjeg momenta u preseku. Zbog toga je ojačavanje na savijanje najpogodnije kod betonskih greda koje su umereno armirane, sa procentom armiranja u opsegu 20 do 40% od procenta armiranja pri kome dolazi do simultanog loma (jednovremeni lom po betonu i armaturi), što nije neuobičajeno u AB elementima, pogotovo kod starijih konstrukcija. Pored toga, ojačanje se može postići FRP sistemima samo ukoliko je beton u zaštitnom sloju za koji je FRP zalepljen u zadovoljavajućem stanju da omogući prenos sila u preseku iznad zategnute čelične armature. U mnogim starijim AB gredama kod kojih je čelična armatura korodirala, betonski zaštitni sloj generalno nije u dovoljno dobrom stanju da ispuni ovu funkciju i potrebno je obnoviti beton pre primene FRP sistema ojačanja.

3. METODE OJAČAVANJA ELEMENATA AB KONSTRUKCIJA FRP MATERIJALIMA

Postoje dve osnovne metode pri korišćenju FRP materijala za ojačavanje kako armiranobetonskih, tako i zidanih, drvenih, pa čak i metalnih konstrukcija. Prva metoda se zasniva na lepljenju laminata (laminata) od kompozitnih materijala na površinu AB elementa (EB metoda). Poslednjih godina se razvila nova metoda ojačavanja u kojoj se FRP šipke (bars) ili trake (strips) postavljaju u podužne proreze, u zaštitnom sloju betona, kao dodatna armatura i zatapaju u epoksidne ili cemetne smole (NSM metoda).

3.1. Ojačavanje spoljašnjim lepljenjem FRP armature – EB metoda (Externally Bonded)

Postupak ugradnje EB FRP sistema ojačanja je najčešće dat od strane proizvođača sistema. Postoje razlike u postupku ugradnje različitih sistema ojačanja, ali i kod primene istog sistema ojačanja pri različitim stanjima betonskog elementa. U zavisnosti od postupka ugradnje, sistemi ojačanja se mogu podeliti na sisteme formirane na licu mesta (wet lay-up, cured in-situ) i prefabrikovane sisteme (prefab, precured).

Najčešće korišćena tehnika ojačanja je manuelna ugradnja FRP sistema formiranih na licu mesta ili prefabrikovanih sistema lepljenjem FRP armature pri čemu se veza između armature i betonske podloge ostvaruje dvokomponentnim lepkom (najčešće epoksidnim). Tipična primena ugradnje sistema formiranog na licu mesta je prikazana na Slici 1a. Osnovni delovi FRP sistema ojačanja od kojih zavisi ponašanje ojačane grede su: betonska podloga, lepak/smola i FRP armatura.

Ojačanje AB greda EB metodom se izvodi na sledeći način:

1. Površina grede kao i FRP laminata se čisti kako bi se uklonile prašina, masnoće itd, nakon čega se betonska površina impregnira odgovarajućim prajmerom. U slučaju korišćenja epoksidnog lepka, neophodno je da površine budu suve pre ugradnje FRP sistema za ojačanje;
2. Dvokomponentni lepak se nanosi u debljini od 1mm i na FRP laminatu, kao i na površini betonske grede.
3. Nakon povezivanja, valjkom se istiskuje vazduh i odstranjuje višak epoksidnog lepka.

3.2. Metoda ojačanja ugradnjom FRP armature u betonskom zaštitnom sloju (u blizini površine) – NSM metoda (Near Surface Mounted)

Ugradnja FRP armature u betonskom zaštitnom sloju je atraktivna metoda za povećanje nosivosti na savijanje i smicanje AB konstrukcija i konstrukcija od prethodno napregnutog betona [3,6], kao i za ojačavanje nearmiranih zidova [14].

NSM metoda ojačanja se sastoji iz sledećih koraka [13]:

1. Isecanje proreza u zaštitnom sloju betona, u zavisnosti od njegove debljine i dimenzija FRP kompozitne armature koja se koristi;
2. Pažljivo čišćenje proreza upotrebom vazduha ili vode pod pritiskom kako bi se uklonili svi ostaci od sečenja u prorezima;
3. Ukoliko se koristi epoksidni lepak prorez mora biti suv pre ugradnje. Ukoliko se koristi cementni malter preporuka je da površina proreza bude vlažna u vreme njegove ugradnje;
4. Ugrađuje se epoksidni lepak ili cementni malter;
5. Ugrađuje se FRP armatura u prorez i uklanja se višak epoksidnog lepka ili cementnog maltera.

Preporuka je da se FRP armatura očisti pre ugradnje ako nema zaštitnu foliju koja se skida neposredno pre aplikacije, kao i da se epoksidni lepak nanese na armaturu pre ugradnje. Pored toga, viskoznost lepka u slučaju ojačavanja zona pozitivnih momenata kod AB greda i ploča mora se povećati zbog lakše ugradnje. U nekim istraživanjima, povećanje viskoznosti je postignuto dodavanjem male količine inertnog filera epoksidnoj ispuni pri čemu nije uočeno smanjenje kvaliteta veze [2].

4. ZAKLJUČAK

Intezivnije korišćenje FRP materijala u konstrukcijskom inženjerstvu u prethodnih nekoliko decenija može se pripisati velikom broju prednosti ovih materijala u poređenju sa konvencionalnim materijalima za ojačavanje kao što su: visok odnos čvrstoće prema težini, izvrsna trajnost, laka i brza ugradnja, elektromagnetna neutralnost, izvrsne osobine nekih vrsta na zamor, kao i niska termička provodljivost, itd.

FRP materijali takođe imaju i brojne potencijalne nedostatke kao što su: početna cena materijala, koja je znatno veća nego cena čelika, linearno-elastično ponašanje koje utiče na smanjenje duktilnosti, nekompatibilan koeficijent termičke dilatacije sa betonom nekih FRP materijala, prevremeno raspadanje pri izlaganju visokoj temperaturi (u slučaju požara), itd.

Zbog svega ovog FRP materijali se ne mogu smatrati slepom zamenom za čelik koji se na sličan način koristi u konstrukcijskim intervencijama, već se njihove prednosti moraju upoređivati sa nedostacima u svakom pojedinačnom slučaju.

Kada je u pitanju primena FRP materijala u ojačavanju AB konstrukcija, na osnovu brojnih, pre svega eksperimentalnih [11,12], a zatim teorijskih i numeričkih istraživanja uočeno je da se kapacitet nosivosti AB elemenata značajno povećava njihovim ojačavanjem armaturom od FRP materijala. Zbog toga je jedan od ciljeva rada bio da se ojačavanje pre svega AB grednih nosača armaturom od FRP materijala dodatno približi naučnoj i stručnoj javnosti u oblasti građevinskog konstrukterstva.

5. LITERATURA

- [1] ACI (2002). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, ACI 440.2R-02. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. ACI 440.2R-02.
- [2] Aidoo, J., Harries, K. A., and Petrou, M. F. (2006). *Full-scale experimental investigation of repair of reinforced concrete interstate bridge using CFRP materials*. Journal Bridge Engineering, 11(3), pp. 350–358.
- [3] Alkhrdaji, T., Nanni, A., Chen, G. and Barker, M., (1999). *Upgrading the Transportation Infrastructure: Solid RC Decks Strengthened with FRP*, Concrete International: Design and Construction, 21(10), pp. 37-41.
- [4] Alkhrdaji, T., Nanni, A. and Mayo, R. (2000). *Upgrading Missouri Transportation Infrastructure: Solid Reinforced-Concrete Decks Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Systems*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1740, pp.157-163.
- [5] Bank, L. (2006). *Composites for construction*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- [6] De Lorenzis; L., Nanni, A. and La Tegola A. (2000). *Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods*. In. Advancing with Composites. Milan, Italy. International Meeting on Composite Materials, PLAST 2000, pp. 9-11.
- [7] fib bulletin 14, 2001, *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report on the design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures*. International Federation for Structural Concrete, Lausanne.
- [8] ISIS Educational Module 4, (2004). *An Introduction to FRP Strengthening of Concrete Structures*. A Canadian Network of Centres of Excellence.
- [9] ISIS Educational Module 2, (2006). *An Introduction to FRP Composites for Construction*. A Canadian Network of Centres of Excellence.
- [10] Motavalli, M., Czaderski, C. (2007) *FRP Composites for Retrofitting of Existing Civil Structures in Europe: State-of-the-Art Review*, Composites and Polycon, American Composites Manufacturers Association, October 17-19, Tampa, FL USA.
- [11] Petrović, Ž. (2016). *Eksperimentalno-teorijska analiza graničnih stanja armiranobetonskih kontinualnih greda od samougrađujućeg betona ojačanih vlaknima armiranim polimerima (Fiber-reinforced polymer-FRP)*, Doktorska

- disertacija, Građevinsko-arhitektonski fakultet Niš, Univerzitet u Nišu.
- [12] Ranković, S. (2011). *Eksperimentalno-teorijska analiza graničnih stanja armiranobetonskih linijskih nosača ojačanih sprezanjem sa NSM vlaknastim kompozitima*. Doktorska disertacija. Građevinsko-arhitektonski fakultet Niš, Univerzitet u Nišu.
- [13] Täljsten, B., Carolin, A. and Nordin, H. (2003). *Concrete structures strengthened with near surface mounted reinforcement of CFRP*. AN International Journal, 6(3), pp. 201-213.
- [14] Tumialan, J. G., Morbin, A., Nanni, A. and Modena, C. (2001). *Shear strengthening of masonry walls with FRP composites*. COMPOSITES 2001, Convention and Trade Show, Composites Fabricators Association, Tampa, FL USA
- [15] <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/116371391EN6>

MEHANIČKE KARAKTERISTIKE 3D ŠTAMPANIH BETONA NA BAZI PORTLAND CEMENTA

UDK : 691.32:655.36

Lazar Živković¹¹, Biljana Matejević Nikolić¹², Zoran Grdić¹³,
Nenad Ristić¹⁴

Rezime

Automatizovana gradnja objekata tehnologijom 3D štampe zadobila je sve veću pažnju poslednjih godina. Potencijalno, to može u velikoj meri unaprediti građevinsku industriju. Takođe, građevinski otpad predstavlja još jedan problem ove grane industrije. Građevinski objekat je danas moguće izgraditi sa visokim stepenom produktivnosti i sa minimalnim građevinskim opadom metodom 3D štampe. Ova metoda izrade elemenata i objekata nudi značajno smanjenje vremena izgradnje i potrebne radne brigade. U radu je sprovedena analiza sastava betona koji se koristi prilikom 3D štampe. Analiza je obavljena na osnovu osam različitih ispitivanja cementnih betona u svežem i očvrslom stanju. Prikazane su postignute minimalne i maksimalne vrednosti čvrstoće pri pritisku takvih betona.

Ključne reči: 3D štampani beton, portland cement, čvrstoća pri pritisku, receptura betona

MECHANICAL PROPERTIES OF 3D PRINTING CONCRETE BASED ON PORTLAND CEMENT

Abstract

Automated construction of buildings with 3D printing technology has gained increasing attention in recent years. Potentially, it can greatly improve the construction industry. Also, construction waste is another problem of this industry field. Today, a building can be built with a high degree of productivity

¹¹ Lazar Živković, mast. inž. građ., Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, lazar.zivkovic@gaf.ni.ac.rs

¹² Dr Biljana Matejević Nikolić, docent, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, biljana.matejevic@gaf.ni.ac.rs

¹³ Dr Zoran Grdić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, zoran.grdic@gaf.ni.ac.rs

¹⁴ Dr Nenad Ristić, vanredni profesor, Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, nenad.ristic@gaf.ni.ac.rs

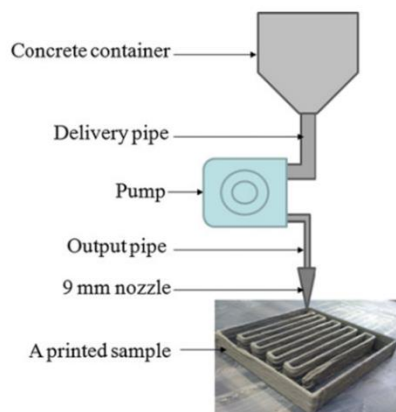
and with minimal construction waste by the method of 3D printing. This method of making elements and buildings offers a significant reduction in construction time and the required work brigade. The paper analyses the mixture compositions of concrete used in 3D printing. The analysis was performed on the eight different experiments of cement concrete in fresh and hardened state. The achieved minimum and maximum values of compressive strength of such concretes are shown.

Key words: 3D printing concrete, portland cement, compressive strength, mix design

1. UVOD

3D štampani beton je beton posebne recepture, uglavnom ojačan vlaknima, koji se kroz mlaznicu 3D štampača nanosi u slojevima (horizontalno sloj po sloj). Beton, kao materijal, sklon je stalnom "usavršavanju" u pogledu jednostavnosti i ekonomičnosti ugradnje. Tako, da se beton ne bi sabijao prilikom ugradnje, razvijeni su samougradivi i prskani betoni. Dalji napredak predviđa izostavljanje oplata. Za potrebe izgradnje betonske konstrukcije je potrebna još jedna (drvena) konstrukcija - oplata. Prema [2] oko 15% troškova izgradnje betonskih konstrukcija vezani su za oplatu. Građevinski sektor doživljava nedostatak produktivnosti u poređenju s drugim sektorima. Stoga, bilo je nekoliko pokušaja da se trenutni način gradnje zameni alternativama sa manjim troškovima. Glavna prednost štampanog betona i tehnologije ugradnje je izrada elemenata bez oplata, povećanje arhitektonske slobode i smanjenje troškova i roka izgradnje.

Štampanje betona je inovativni postupak za proizvodnju betonskih komponenti koristeći tehniku proizvodnje na bazi slojeva, koje se nazivaju i konstrukcije sa slobodnom formom. Ova metoda može se koristiti za izradu složenih geometrijskih oblika bez oplata i tako ima jedinstvenu prednost u odnosu na konvencionalne metode gradnje. Proces proizvodnog procesa se odvija kroz tri faze: priprema podataka (koordinata nanošenja slojeva, model buduće konstrukcije, itd.), priprema betona i štampanje elementa [1].



Slika 1. Šematski prikaz postupka štampanja betona, prema [1]

Betonska smeša mora imati konzistenciju takvu da se može istisnuti kroz mlaznicu štampača i da formira tanku liniju sloja betona. Ta vlakna moraju biti kontinuirana na istoj visini (jedan sloj) kako bi se na njih nadgradio sledeći. Takođe, mora imati dovoljnu čvrstoću kako bi ostao na mestu ugradnje, prihvatio i obezbedio dobru vezu sa narednim slojem. Na osnovu istraživanja u [1] ciljane čvrstoća pri pritisku ovakvog betona je oko 100 MPa. Zbog slojevite strukture elemenata proizvedenih ovom metodom suštinski su manje čvrstoće od uobičajenog betona. Rezultati ispitivanja u [2] su takođe pokazali da proces nanošenja sloj po sloj negativno utiče na čvrstoću. Svojstva svežeg betona, pravac i vreme štampanja imaju značajan uticaj na ukupnu nosivost štampanih elemenata [4].

Znanje o raznim tehnikama 3D štampe se naglo povećalo tokom poslednjih nekoliko godina, ali mnoga tehnološka pitanja su i dalje otvorena i treba ih naučno istražiti. Pojava takozvanih „hladnih spojeva“ između štampanih slojeva jedno je od takvih problema. U mnogim slučajevima ti spojevi su najslabije karike u celoj strukturi. Takođe se radi na poboljšanju čvrstoće veze između slojeva, upotrebom raznih premaza posle štampanja svakog sloja [5].



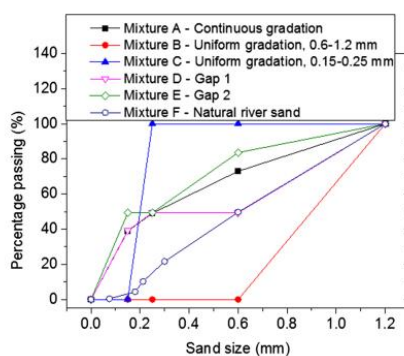
Slika 2. "Hladni spojevi" na jednom uzorku, prema [5]

2. MATERIJALI

Materijali koji se koriste za spravljanje cementnih betona, kojim se putem 3D štampe izrađuju objekti, su pesak, portland cement, leteći pepeo, silicijum dioksid, aditivi i voda. Kao agregat koristi se veoma sitan pesak, sa najvećim prečnikom zrna od 2 mm. Različite vrste portland cementa se upotrebljavaju kao vezivo. Portland cementu se može dodati leteći pepeo i silicijum dioksid. Kao aditivi se najčešće primenjuju superplastifikatori, plastifikatori i usporivači.

2.1. Agregat

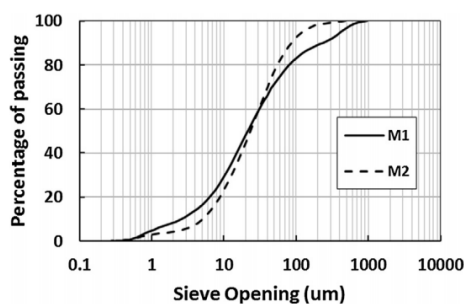
U radu [1] korišćen je pesak sa najkrupnijim zrnom prečnika 2 mm, dok je u radu [3] korišćen rečni pesak i silikatni pesak frakcija 0,6/1,2, 0,25/0,6, 0,15/0,25 i zrna čiji je prečnik manji od 0,15 mm.



Slika 3. Granulometrijske krive za različite smeše peska, prema [3]

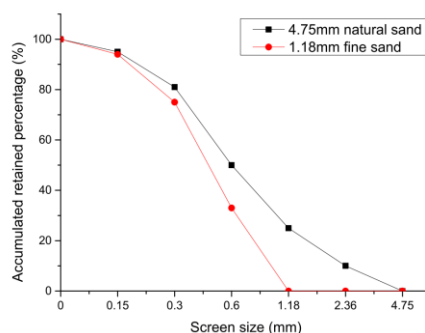
Granulacija peska za smešu A je određena prema Fulerovoj granulometrijskoj krivi da bi se osigurao kontinuirani sisem gradacije. Tako je, od ukupne količine peska, 39,23 % sa frakcijom 0/0.15 mm, 10,14 % sa frakcijom 0.15/0.25, 23,84 % sa frakcijom 0.25/0.6 i 26,8 % sa frakcijom 0.6/1.2 mm. Pesak za smešu B ima uniformnu gradaciju, tj. upotrljen je samo pesak frakcije 0.6/1.2 mm, a za smešu C 0.15/0.25 mm. Granulacije ovih i ostalih smeša prikazane su na slici 3.

U radu [4] korišćen je pesak sa najvećim zrnom prečnika 1 mm. Granulometrijski sastav dve mešavine korišćene u radu prikazan je na slici 4.



Slika 4. Granulometrijske krive peska, prema [4]

U radu [5] korišćene su tri frakcije peska i to: 0,06-0,2 mm, 0-1 mm (rečni agregat) i 0-2mm (rečni agregat). Frakcije peska dodavane su u razmeri 0,2:0,2:0,6 za frakcije 1, 2 i 3, redom.



Slika 5. Granulometrijske krive peska, prema [8]

Za potrebe istraživanja u [8] korišćene su tri vrste peska sa frakcijama 0/4,75 mm prirodnog peska, 0/1,18 i 0/2,36 mm. Na slici 5 prikazane su granulometrijske krive peska za frakcije 0/4,75 mm i 0/1,18 mm. Sav agregat bio je prethodno osušen u rerni i spakovan u zatvorenoj plastičnoj kanti. Na osnovu toga agregat se smatra suvim i ne doprinosi sadržaju vode u smeši.

2.2. Veziva

Za potrebe istraživanja u [1] kao veziva su upotrebljeni cement klase CEM I 52.5, leteći pepeo i silicijum dioksid. U studiji rada [3] korišćen je običan portland cement CEM I 42.5, leteći pepo i silicijum dioksid. U radu [5] upotrebljen je portland cement CEM I 52.5R za mešavinu 1, a u mešavini 2 su na račun portland cementa dodati i leteći pepeo i silicijum dioksid. U studiji spovedenoj u [8] korišćen je portland cement CEM II 42.5 R.

Tabela 1. Hemijski sastav letećeg pepela i portland cementa, prema [3] i [7]

Sastav	Učešće [%]			
	Leteći pepeo, [3]	Cement, [3]	Leteći pepeo, [7]	Cement, [7]
SiO ₂	58,59	24,27	59,32	19,01
Al ₂ O ₃	30,44	4,56	29,95	4,17
Fe ₂ O ₃	4,66	3,95	4,32	3,89
TiO ₂	2,02	0,55	/	/
K ₂ O	1,51	0,61	/	/
CaO	1,21	62,2	1,28	64,59
MgO	0,776	3,34	0,61	0,88
P ₂ O ₅	0,531	0,15	/	/
Na ₂ O	/	0,21	0,16	0,16
SO ₃	0,0914	/	/	/
ZrO ₂	0,04	/	/	/
MnO	0,0351	/	/	/
Cr ₂ O ₃	0,027	/	/	/
CuO	0,0254	/	/	/
ZnO	0,0229	/	/	/

2.3. Aditivi

Kao aditivi, najčešće se koriste superplastifikatori na bazi polikarboksilata kako bi se poboljšala obradivost i čvrstoća betona. Prema [5] dodaju se u količinama od 0,75% (za smešu 1) i 2,0% (za smešu 2) u odnosu na količinu veziva.

Usporivači (retarderi), dodaju se kako bi se osigurao konstantan protok smese kroz mlaznicu u toku štampanja. To su usporivači na bazi amino kiselina, limunske kiseline i formaldehida [1].

Takođe, prave se i smese betona sa dodatkom ubrzivača, (akceleratora) sačinjeni od sumporne, aluminijumske soli i dietonolamina.

U radu [4] za obe mešavine kao plastifikator upotrebljen je natrijum ligno sulfonat kako bi se redukovala količina vode u betonskoj smeši.

U [7] su svi parametri smeše sem superplastifikatora bili fiksni. Probalo se sa različitim količinama kako bi se dobila podobna konzistencija. Pri dozi od 0,08% u odnosu na vezivo, materijal je bio krut te je došlo do blokade prilikom istiskivanja iz mlaznice štampača. Sa količinom od 0,09% se delimično uspelo, tj. u početku je štampa bila moguća, ali kratko. Pri dozi od 0,10% kontinuirano istiskivanje materijala bez blokada je bilo moguće.

Za poboljšanje konzistencije betonske smeše u istraživanju sprovedenom u [8] namenjen je superplastifikator na bazi polikarboksilata.

2.4. Ojačanja

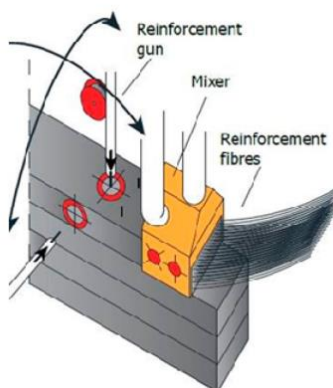
Kao ojačanja (armatura) koriste se mikro vlakna. Vlakna se razlikuju po prečniku, materijalu i dužini zavisno od autora i sprovedenih ispitivanja. Konkretno u [1] su korišćena polipropilenska mikro vlakna dužine 12mm i prečnika 0,18 mm. Preporučena količina u smesi je cca 1,2 kg/m³. Ona se dodaju kako bi se smanjile deformacije u plastičnom stanju.

Radi poboljšanja karakteristika betona pri savijanju, u radu [4] korišćena su staklena vlakna dužina 6mm.

Prema [6] klasičan način postavljanja šipki armature u 3D štampanom elementu nije inovativno. Uz to, verovatno bi smetalo interakciji između slojeva betona. Umesto toga predviđa se „pištolj“ za

armaturu, kojim se u svežem betonu nakon izrade sloja ostavi praznina kroz koju se kasnije postavi armaturna šipka.

U smeši betona spravljenog u [7] dodavana su polipropilenska vlakna dužine 12 mm i debljine 40 μ m (1,8 kg/m³) kako bi se prihvatili naponi skupljanja betona.



Slika 6. Obezbeđivanje mesta ugradnje armature u 3D štampanom element, prema [6]

3. RECEPTURA BETONA

Recepture za spravljanje betona se razlikuju između autora. Takođe za potrebe istraživanja su sami autori menjali prororciju između sastojaka. U tabeli 2 prikazane su količine pojedinačnih materijala za spravljanje 3D štampanih, cementnih betona.

Tabela 2. Receptura spravljanja betona

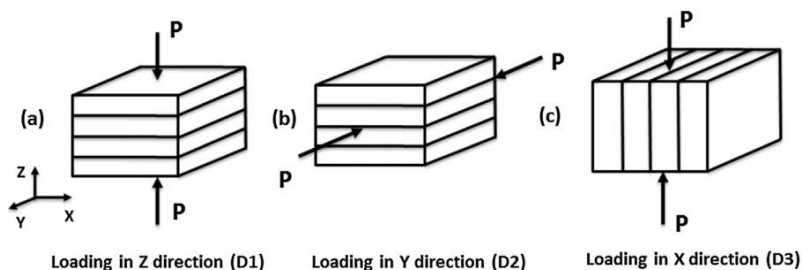
Sastav	Učešće [kg/m ³]					
	Rad [1]	Rad [3]	Rad [4]	Rad [5]	Rad [7]	Rad [8]
Cement	376-643	793	289-290	627-391	663	598-782
Pesak	1612-1123	397	1209-1211	1391-1260	1243	1455-1195
Leteći pepeo	107-184	793	277-278	0-213	165,7	/
Silicijum dioksid	54-92	79	145	0-213	/	52-68
Superplasti-fikator	5,4-9,2	1,3	/	4,7-16,3	0,83	5,2-6,8
Plastifikator	/	/	7-9	/	/	/
Voda	150-257	234	284-285	263-343	265,2	170-183
Armatura	1,2	/	13,5	/	1,8	/

Autori su u [1] i [8] analizirali pet mešavina. U tabeli 2, u poljima gde postoje dve vrednosti spojene crticom (-), prvi broj je je količina sastojaka za mešavinu 1, a poslednja za 5. Za mešavine između sledi interpolacija. U radu [4], kao i u radu [5] istraživane su dve mešavine.

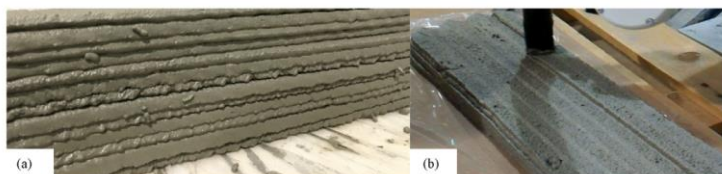
4. ČVRSTOĆA PRI PRITISKU BETONA

Za potrebe primene 3D tehnologije štampanja u građevinarstvu poželjni su građevinski materijali visokih performansi. Takođe pravac delovanja opterećenja (upravno ili paralelno pravcu prižanja slojeva) utiče na svojstva čvrstoće uzorka.

U radu [4] testirani su uzorci kocke ivice 50 mm, prema standardu EN 196-1: 2016 [9]. Uzorci (kocke ivice 50 mm) su vađeni iz 3D štampanog elementa i ispitivani na čvrstoću pri pritisku posle 7, 14 i 28 dana. Ispitivano je ukupno 9 uzoraka za jedan period, po 3 za svaki pravac (D1, D2, D3). Elementi iz kojih su vađeni uzorci bili su dimenzija 500 x 150 x 200mm (dužina, širina i visina). Nakon završenog procesa štampanja, elementi su ostavljeni na temperaturi od $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$ i relativnoj vlažnosti vazduha $\text{RH } 65 \pm 5\%$.



Slika 7. Definicija pravaca opterećenja, prema [4], [6]

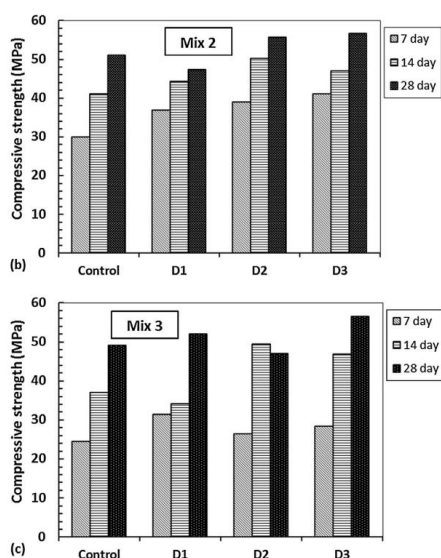


Slika 8. Element za vađenje uzorka, (a) izgled sa strane i (b) odozgo, prema [4]

Sa slike 9 se jasno utvrđuje da smer štampanja itekako utiče na mehanička svojstva štampanih uzoraka. Uočava se da je čvrstoća pri pritisku posle 28 dana oko 50 MPa, kao i da je pri opterećenju iz pravaca D3 dostignuta najveća čvrstoća (57 MPa).

U radu [5] je takođe ispitivana čvrstoća pri pritisku uzoraka posle 1 i 28 dana od izrade uzoraka. Čvrstoća pri pritisku ispitivana na uzorku starosti 1 dan, kretala se u granicama od 29,0 MPa (smeša sa dodatkom letećeg pepela i silicijum dioksida) do 42,2 MPa (smeša gde je kao vezivo korišćen isključivo portland cement), a na uzorku starosti 28 dana od 71,4 MPa (smeša gde je kao vezivo korišćen isključivo portland cement) do 102,1 MPa (smeša sa dodatkom letećeg pepela i silicijum dioksida).

Čvrstoća pri pritisku na uzorcima u [7] bila je 70,9, 71,7 i 67,4 MPa.



Slika 9. Čvrstoća pri pritisku na uzorcima kocke ivice 50mm, prema [4]

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je ukratko prikazan koncept 3D štampanih betonskih elemenata. Istražen je sastav 3D cementnih maltera. Zavisno od autora razlikuje se vrsta samog portland cementa, kao i količina potrebna za spravljanje 1 m³ betona. Količina cementa u istraženim radovima kretala se je od 289 do 782 kg/m³. Količina agregata (peska) je takođe različita u zavisnosti od autora, kao i veličina zrna. Upotrebljene količine agregata bile su između 397 i 1612 kg/m³. Leteći pepeo se je koristio u granicama 0-793 kg/m³, a razne vrste plastifikatora i superplastifikatora u opsegu 0,83-16,3 kg/m³. Upotrebljena količina vode bila je između 150 i 343 kg/m³. Za potrebe eksperimenata neki autori su dodavali i armaturna vlakna na bazi stakla, čelika, itd. u količinama do 13,5 kg/m³.

Ustanovljeno je da je potrebno napraviti beton visokih performansi i odgovarajuće konzistencije. Zahtevana čvrstoća pri pritisku betona je preko 60 MPa. Veće čvrstoće pri pritisku betona postižu se dodavanjem letećeg pepela i silicijum dioksida. Čvrstoće pri pritisku se razlikuju u zavisnosti od smera pružanja slojeva. Pored osobina očvrslog betona, veoma su bitne i karakteristike svežeg betona. Prilikom 3D štampe betona od velike je važnosti da svaki izrađeni sloj bude identičnih dimenzija. Kako bi se to ostvarilo od važnosti je veličina prečnika same mlaznice štampača kroz koju se istiskuje beton, brzina glave štampača, protok betona i veličina sleganja svežeg betona.

3D štampa se može koristiti za štampanje velikih objekata. Međutim, manja je potražnja za automatizovanim proizvodima u građevinskoj industriji u poređenju sa ostalim industrijama. Pored toga, potrebno je poboljšati materijale (tj. beton) tako da konstruktivni elementi koji se horizontalno pružaju mogu takođe biti štampani.

7. LITERATURA

- [1] Lee, T. T.; Austin, S. A.; Lim, S.; Buswell, R. A.; Gibb, A. G. F.; Thorpe, T.: *Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete*, Materials and Structures, Vol. 45, 2012, str. 1221-1232, DOI 10.1617/s11527-012-9828-z
- [2] Al-Quatifi, S.; Nazari, A.; Bagheri, A.: *Mechanical properties of layered geopolymer structures applicable in concrete 3D-printing*, Construction and Building Materials, Vol. 176, 2018, str. 690-699, DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.195

- [3] Weng, Y.; Li, M.; Jen Tan, M.; Qian, S.: *Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model*, Construction and Building Materials, Vol.163, 2018, str. 600-610, DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112
- [4] Paul, S. C.; Tai, Y. W. D.; Panda, B.; Jen Tan, M.: *Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 18, 2018, str. 311-319, DOI 10.1016/j.acme.2017.02.008
- [5] Narella, V. N.; Hempel, S.; Mechtcherine, V.: *Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing*, Construction and Building Materials, Vol.205, 2019, str. 586-601, DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.235
- [6] Tay, Y. W. D.; Panda, B.; Paul, S. C.; Mohamed, N. A. N.; Jen Tan, M.; Leong, K. F.: *3D printing trends in building and construction industry: a review*, Virtual and Physical Prototyping, Vol. 12, No 3, 2017, str. 261-276, DOI 10.1080/17452759.2017.1326724
- [7] Rahul, A. V.; Santhanam, M.; Meena, H.; Ghani, Z.: *3D printable concrete: Mixture design and test methods*, Cement and Concrete Composites, Vol. 97, 2019, str. 13-23, DOI 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014
- [8] Zang, C.; Hou, Z.; Chen, C.; Zhang, Y.; Mechtcherine, V.; Sun Z.: *Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content*, Cement and Concrete Composites, Vol. 104, 2019, str. 1-10, DOI 10.1016/j.cemconcomp.2019.103406
- [9] EN 196-1:2016: *Methods of testing cements – Part 1: Determination of strength*, CEN, 2016.
- [10] Wu, P.; Wang, J.; Wang, X.: *A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry*, Automation in Construction, Vol. 68, 2016, str. 21-31, DOI 10.1016/j.autcon.2016.04.005

SPOMEN HRAM U PORTI VAZNESENJSKOG HRAMA U BEOGRADU

UDK : 726.71(497.11 Beograd)

Mirko Stanimirović¹⁵, Nemanja Randelović¹⁶ i Vukašin
Vasić¹⁷

Rezime

U ovom radu prikazano je naše rešenje urađeno u okviru Konkursa za izradu rešenja spomen-hrama i parternog uređenja, na mestu krsnog znamenja stradalima prilikom bombardovanja 6. aprila 1941. godine, u porti Vaznesenjskog hrama u ulici Admirala Geprata 19 u opštini Savski venac u Beogradu. Konkurs je završen u septembru 2020. godine, ali žiriranje još uvek nije završeno usled promene u sastavu žirija. U okviru javne prezentacije rešenja, naveli smo razloge zbog kojih smo umesto spomen-hrama projektovali spomen mesto.

Ključne reči: Konkurs, sakralna arhitektura, hram, spomen mesto

MEMORIAL TEMPLE IN THE PORT OF THE ASSUMPTION TEMPLE IN BELGRADE

Abstract

This paper presents our solution made within the Competition for the design of the memorial temple and ground floor, at the site of the cross flag of the victims of the bombing on April 6, 1941, at the gate of the Ascension Church at 19 Admirala Geprata Street in Savski Venac municipality in Belgrade. The competition ended in September 2020, but the judging has not been completed yet due to a change in the composition of the jury. Within the public presentation of the solution, we stated the reasons why we designed a memorial place instead of a memorial temple.

Key words: Competition, sacral architecture, temple, memorial site

¹⁵ Mirko Stanimirović, dr, docent Građevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu

¹⁶ Nemanja Randelović, saradnik u nastavi, nemanjarandjelovic@gmail.com, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu.

¹⁷ Vukašin Vasić, d.i.a, saradnik u nastavi, vukasin.vasic@gmail.com, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu.

1. KONKURS ZA SPOMEN-HRAM

Srpska pravoslavna crkva, Arhiepiskopija beogradsko-karlovačka i hram Svetog Vaznesenja Gospodnjeg u Beogradu objavili su u oktobru 2019. godine javni idejni jednostepeni neanonimni programski arhitektonsko – urbanistički konkurs za izradu rešenja spomen-hrama i parternog uređenja, na mestu krsnog znamenja stradalima prilikom bombardovanja 6. aprila 1941. godine, u porti Vaznesenjskog hrama. U okviru raspisa konkursa, koji je objavljen na sajtu Vaznesenjske crkve [1] jasno su bili navedeni uslovi, predmet i cilj konkursa. Navedene su i preporuke za projektovanje, kao i sadržaj i oprema konkursnog rada, rokovi za predaju radova i kriterijumi za vrednovanje radova. Nagrade nisu bile definisane raspisom, kao ni sastav žirija. Na kraju raspisa su navedena prava i obaveze naručioca i autora nagrađenih radova. Smatramo da su najvažnije sledeće:

1. Autor prvonagrađenog rada stiče potencijalno pravo realizacije glavnog projekta.
2. Svi radovi stiču potencijalnu mogućnost da, uz suglasnost sa autorom, budu izvedeni na drugoj lokaciji prema potrebama Srpske pravoslavne crkve.

U toku konkursa prof. Branko Mišić je u funkciji predstavnika raspisivača konkursa nesebično odgovarao na sva pitanja učesnika. Smatramo da uspešnost ovog konkursa leži u njegovom ogromnom angažovanju, jer su mnogu radovi završeni i predati zahvaljujući njegovom negovanju kontinuiteta u dijalogu kandidata i raspisivača.

Rok za predaju radova usled pandemije pomeran je više puta. Krajem juna su svi ranije prijavljeni učesnici dostavili svoja rešenja u formi plakata, prezentacija i elaborata. Javne prezentacije radova su održane 10.10.2020. godine, u hramu Svetog Vaznesenja, gde je bila priređena i izložba konkursnih plakata. Izložbu je pratio katalog 19 konkursnih radova, sa navedenim imenima autora i njihovim izložbenim brojevima. Dodela nagrada i zahvalnica, kao i rad žirija su odloženi usled upokoljenja Patrijarha srpskog Irineja. Vrednovanje konkursnih radova će biti realizovano po formiranju novih članova žirija, nakon ustoličenja novog Patrijarha 19. februara 2021. godine.

Raspis konkursa je pratio detaljan programski zadatak konkursa. Posebna pažnja je data zatečenim uslovljenostima, koje su postavljene prema cilju konkursa, ali i istorijatu Vaznesenjske crkve [4].

Bombardovanje 6. aprila 1941. godine kao deo tragične istorije Beograđana je povod izgradnje spomen-hrama, kako bi se održalo sećanje na stradale. Vaznesenjska crkva je slavska crkva grada Beograda. Svake godine 6. aprila u ovom hramu se održava parastos nedužnim žrtvama.

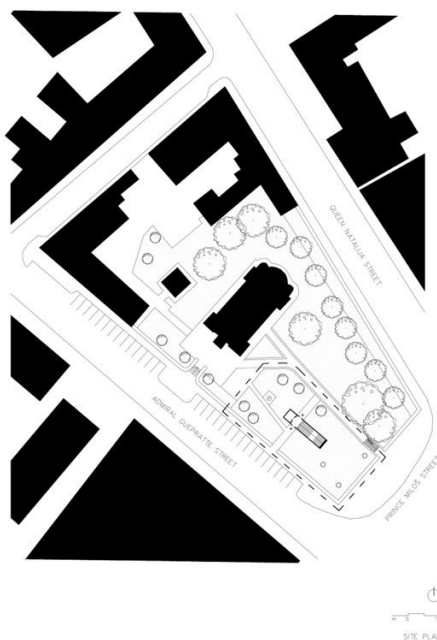
Svim učesnicima su dostavljene fotografije sa lokacije i geodetski snimak porte Vaznesenjskog hrama. U okviru prezentacije našeg rešenja, prema uslovima konkursa opisali smo koncept na način koji u potpunosti prezentujemo u okviru ovog rada. Usled naše nemogućnosti da prisustvujemo javnim prezentacijama radova, naš rad smo, pored prezentacije u formi elaborata i plakata, predstavili „online“ [2]. Ime našeg rada je u skladu sa nazivom konkursa – 6. april. Predstavljeno je na u okviru konkursnih radova na međunarodnoj izložbi 22. Salona arhitekture u Novom Sadu, koji je održan 15.10. – 22.10.2020. godine [3].

2. IDEJNO REŠENJE

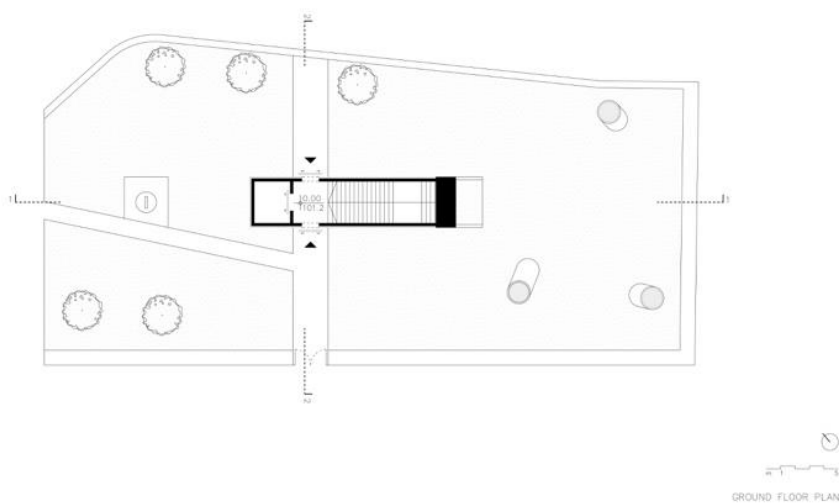
Naše rešenje je rezultat analize programa konkursa, zaštićenog ambijenta i savremene sakralne arhitekture. Podržavamo ideju konkursa, ali zastupamo stav da je svaka arhitektura pa i sakralna vezana za kontekst. To znači da (prema arhitektonskoj teoriji) nema smisla izvoditi u potpunosti rešenje nastalo u okvirima ovog konkursa na nekoj drugoj lokaciji, sa drugim posebnostima. Aktuelni problem zaštićenog ambijenta nas je naveo na stvaranje nečega što to ne bi ugrozilo (bar ne u velikoj meri), jer su samo privremene vizuelne instalacije opravdane na tako važnom mestu. Iz shvatanja da je potrebno obeležiti situacije opisane u raspisu konkursa, krenuli smo sa rotandom, koja se kao sakralna forma koristi za memorije. Pokušali smo da donji nivo naglasimo, tako da se na terenu pojavi samo mala struktura. Dalje istraživanje nam je pokazalo da bilo kakva struktura se teško integriše u postojeći ambijent, ali i da ima smisla spustiti se ispod nivoa prilaza, koji se nalazi u pojasu znamenja (krsta). Tako smo se sve više udaljavali od ideje hrama, jer zastupamo stav da je za njegovu pojavnost potrebno sasvim drugačije okruženje. To nas je vodilo ka ideji spomen mesta, a u skladu sa tragedijom koja se desila 6. aprila, zamislili smo ovaj prostor kao trajnu vizuelnu instalaciju, koja će preneti užase iz prošlosti putem slika i zvuka. Svesno smo se pomerili od uobičajenog pogleda na građevinu tražeći emocije koje bi se stvorile kod posetilaca. Naše mišljenje je da se ideja spomena može ostvariti i na drugačiji način od građenja hrama u dvorištu hrama, kao i da je savremena sakralna

arhitektura najznačajnija tema u srpskoj savremenoj teoriji arhitekture, a mi joj se ne možemo u potpunosti posvetiti u ovoj situaciji.

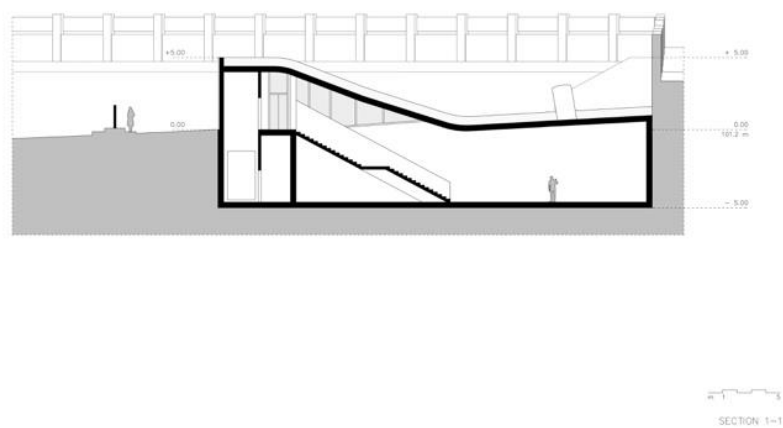
Na nivou 101.2 m nadmorske visine smo probili zid koji je odvajao dvorište i ul. Admirala Geprata. Znamenje smo pomerili ka crkvi, da bi na njegovom mestu formirali ulaz u spomen prostor. U ulaznom delu je samo prostor za komunikaciju, kako bi bio što manji. Iz razloga da poništimo sagrađenu strukturu, zamislili smo da krov nadzemnog dela bude podignut teren (zeleni krov). Staklena fasada je zalepljena za konstrukciju, a delovi konstrukcije su simbolično dobili znak prošlosti u formi korten čelika. Od njega su napravljene i omotači lanterne i pikseli u nivou prilaza. Naizmenična svetla i tamna polja, poput delova fasade na tradicionalnim crkvama, uspostavljaju vezu sa simbolima i duhovnim traženjem svakog pojedinca. Forma piksela, vezana je za digitalni svet i nju smo koristili radi poništavanja stvorene strukture, iz želje da naša intervencija što manje ugrožava postojeći ambijent. Sa druge strane, veličina i pozicije lanterni su povezane sa oblikom bombi, mestom oltara na istoku i sa isticanjem vertikale, koja prolaznicima signalizira da na ovom mestu postoji sakriveni događaj koji treba posetiti. Donji novo je pokriven zelenim krovom, kao da se ništa nije desilo. Zidovi u donjem nivou su zapravo mesto isijavanja (svetlo) i sećanja (video bombardovanja) i u formi su varijabilnih multimedijalnih instalacija. Zvuk (sirena i bombardovanja) bi došao do izražaja u ambijentu prigušenog svetla. Moguće je prikazati i druge sadržaje, prema pripremljenoj režiji događaja, slično muzejskom prostoru. Time smo glavni simbol (Svetlost, Hrist) integrisali u suštinu instalacije u okviru koje je moguće prema dopuštenju arhijereja i "na antimensu" održati Liturgiju.



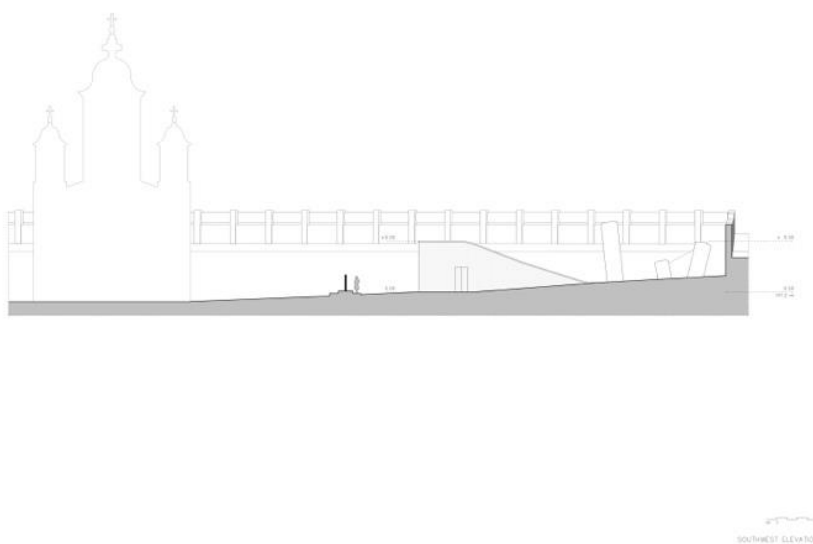
Slika 1. Situacija (dokumentacija autora)



Slika 1. Osnova prizemlja(dokumentacija autora)



Slika 1. Presek (dokumentacija autora)



Slika 1. Izgled (dokumentacija autora)



Slika 1. 3D prikaz (dokumentacija autora)



Slika 1. 3D prikaz (dokumentacija autora)



Slika 1. 3D prikaz - Unutrašnjost (dokumentacija autora)

7. LITERATURA

- [1] <https://vaznesenjskacrkva.rs/конкypc/>
- [2] https://youtu.be/_DmwJbLycY
- [3] V. Crnjanski Spasojević - Z. Lj. Nikolić: Sećanje na žrtve bombardovanja 1941: Kapela na mestu stradanja 180 ljudi, Novosti, 24. septembar 2019.
- [4] 22. SALON ARHITEKTURE, Društvo arhitekata Novog Sada, 2020, str. 98, ISBN 978-86-81662-01-4.

KOMPROMISNA VEROVATNOĆA I KONCEPT PRAGOVA PERCEPCIJE U ANALIZI VELIKIH VODA

UDK : 532.57

Nikola Đokić¹⁸, Borislava Blagojević¹⁹, Vladislava Mihailović²⁰

Rezime

Nepotpuni nizovi maksimalnih godišnjih protoka u profilima hidroloških stanica često se sreću u inženjerskoj praksi. U SAD je u okviru preporuka za ocenu velikih voda – Bilten 17c uveden koncept pragova percepcije, koji predstavlja još jednu mogućnost za prevazilaženje problema nepotpunih nizova. Empirijska verovatnoća se u ovim preporukama aproksimira kompromisnom verovatnoćom prema Hiršu i Štedingeru. Radom su obuhvaćeni različiti slučajevi koji ilustruju vezu kompromisne verovatnoće i pragova percepcije, sa prikazom nekoliko primera sa hidroloških stanica na teritoriji Republike Srbije.

Ključne reči: *Nepotpuni niz podataka, velike vode, prag percepcije, kompromisna verovatnoća*

COMPROMISE PROBABILITY AND PERCEPTION THRESHOLD CONCEPT IN THE HIGH WATER ANALYSIS

Abstract

Incomplete series of maximum annual flows in the profiles of hydrological stations are often encountered in engineering practice. In the USA, the concept of perception thresholds has been introduced within the recommendations for the assessment of high waters - Bulletin 17c, which represents another possibility for overcoming the problem of incomplete series. Empirical probability is approximated in these recommendations by a compromise probability according to Hirsch and Stedinger. The paper covers

¹⁸ Nikola Đokić, student DAS. Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, nikolavdjokic995@gmail.com

¹⁹ Dr Borislava Blagojević, docent. Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, borislava.blagojevic@gaf.ni.ac.rs

²⁰ Dr Vladislava Mihailović, docent. Šumarski fakultet Univerziteta u Beogradu, vladislava.mihailovic@sfb.bg.ac.rs

various cases that illustrate the relationship between the compromise probability and perception thresholds, with the presentation of several examples from hydrological stations in the territory of the Republic of Serbia.

Key words: *Incomplete data series, high waters, perception threshold, compromise probability.*

1. UVOD

Analiza hidroloških nizova predstavlja proceduru u kojoj se na samom početku, u okviru provere podataka, utvrđuje reprezentativnost, homogenost i slučajnost uzorka. Neizvesnost konačnog rezultata analize veća je ukoliko postoje prekidi u osmatranjima, čime se smanjuje obim uzorka koji bi trebalo da odražava stanje razmatrane populacije. Prema tome, jedan vid utvrđivanja reprezentativnosti hidroloških nizova odnosi se na celovitost (potpunost) niza [1]. Postoje razne metode za popunjavanje nepotpunih nizova podataka. Najčešće, u praksi ovakvi nizovi dopunjuju se konkretnim vrednostima na osnovu podataka sa drugih srodnih hidroloških stanica (HS) [2].

Posmatrajući period osmatranja kao uslov reprezentativnosti zabeleženog niza, potrebno je da u hidrološkom smislu, raspoloživi niz reprezentuje posmatrani proces u celini – niz je dovoljno dug da uključi stanja procesa u smislu vodnosti obuhvaćenog perioda. Smatra se da niz sa više od 30, a u nekim slučajevima, 25 godina osmatranja, u opštem slučaju ispunjava kriterijum reprezentativnosti sa gledišta najkraćeg merodavnog perioda osmatranja [3]. Kada se raspolože odgovarajućim ulaznim podacima, statistička analiza nizova formiranih metodom godišnjih maksimuma, predstavlja osnovni pristup u analizi velikih voda.

Zahvaljujući uvedenom poboljšanju metode za ocenu parametara Log-Pirson 3 (LP3) teorijske raspodele verovatnoće pomoću Algoritma očekivanih momenata (*Expected Moments Algorithm – EMA*) u kombinaciji sa Hirš-Štedingerovom kompromisnom verovatnoćom, omogućeno je da se nezabeleženi protoci predstave pomoću intervala ili pragova percepcije. Pomenuta poboljšana metoda uvedena je u okviru nedavne revizije Preporuka za ocenu velikih voda u SAD – Biltena 17c (B17c) [4], koji uvodi koncept pragova percepcije.

Pragovi percepcije (PP) definišu se donjim pragom percepcije (DPP) i gornjim pragom percepcije (GPP). DPP predstavlja najnižu

vrednost maksimalnog protoka koja je mogla biti zabeležena, dok GPP predstavlja najveću. Neformalna definicija PP je da oni definišu „vidljivi opseg” velikih voda [4].

2. ALGORITAM OČEKIVANIH MOMENATA

Algoritam očekivanih momenata je postupak uveden u okviru B17c u čijem središtu je uopštena metoda momenata uvedena radi poboljšanja ocene parametara LP3 raspodele. EMA omogućava direktno uklapanje LP3 raspodele u osmotrene podatke, koristeći čitav skup podataka: Istovremeno uzima u obzir informacije o regionalnom koeficijentu asimetrije i istorijskim velikim vodama, prilagođava sve potencijalno uticajne niske vrednosti ekstrema (donje izuzetke), godine bez registrovanih protoka i cele godine u kojima su reke presušile. U situacijama kada se statistička analiza sprovodi samo na osnovu osmotrenih vrednosti protoka, metoda očekivanih momenata se svodi na običnu metodu momenata. EMA koristi intervale zabeleženih ekstremnih protoka $Q_{y,lower}$ i $Q_{y,upper}$ za ocenu momenata LP3 raspodele, kojima se može predstaviti nepouzdanost izmerenog protoka. Interval koji je definisan preko PP – $T_{y,lower}$ (DPP) i $T_{y,upper}$ (GPP), a postavlja se u godinama kada protok nije izmeren, figuriše u oceni intervala poverenja i drugih pokazatelja neizvesnosti u oceni kvantila velikih voda. PP se postavljaju obavezno i za ceo istorijski period, koji se definiše ukoliko postoji zabeležen istorijski maksimum pre početka rada stanice. U opštem slučaju, za osmotrene protoke mogu se postaviti pragovi da budu jednaki nula - donji i beskonačno – gornji.

Redosled faza proračuna po kome softverski paket *Hydrologic Engineering Center-Statistical Software Package* (HEC-SSP) radi analizu velikih voda prema B17c je sledeći:

1. Identifikacija donjih izuzetaka primenom višestrukog Grubs-Bekovog testa;
2. Organizacija svih intervala protoka i PP za ocenu parametara i intervala poverenja;
3. Početak iterativnog prilagođavanja svih podataka LP3 raspodeli korišćenjem očekivanih momenata, uzimajući u obzir i regionalni koeficijent asimetrije;
4. Ocena varijanse kvantila i proračun intervala poverenja zasnovanom na prilagođenom LP3 modelu, ocena neizvesnosti koeficijenta asimetrije.

U sledećoj tabeli (Tabela 1) predstavljene su sličnosti i razlike koje se koriste u postupku određivanja kvantila velikih voda prema preporukama iz Biltena 17b (B17b) i B17c. B17c predstavlja reviziju B17b koji je bio na snazi više od 30 godina.

Tabela 1. Razlike između B17b i B17c (Na osnovu [4])

Postupak	Bilten 17b	Bilten 17c
Teorijska raspodela verovatnoće	LP3	LP3
Kompromisna verovatnoća	Mogućnost izbora (Vejbul, Hejzn...)	Hirš-Štedinger
Identifikacija izuzetaka	Jednostruki Grubs-Bekov test	Višestruki Grubs-Bekov test
Ocena parametara raspodele	Metoda momenata	Algoritam očekivanih momenata
Prilagođavanje krive raspodele	Na osnovu osmotrenih protoka. Pruža mogućnost uključivanja i krive očekivane verovatnoće.	Uključuje se čitav skup podataka (istorijske velike vode, potencijalno uticajne niske vrednosti...)
Rad sa nepotpunim nizovima osmatranja	Zanemaruje godine bez protoka	Zahteva da se za godine bez protoka definišu PP.

3. EMPIRIJSKA FUNKCIJA RASPODELE VEROVATNOĆE I KOMPROMISNA VEROVATNOĆA

Uređeni uzorak - podaci o maksimalnim godišnjim protocima nanose se na papir verovatnoće, a na x-osu se nanosi empirijska funkcija raspodele. Empirijska funkcija raspodele se određuje preko kompromisne verovatnoće, čija je opšta formula:

$$p_i = \frac{i-a}{n+1-2a} \quad (1)$$

gde je:

i – redni broj slučajne promenljive u uređenom uzorku,

α – korekcionni faktor koji ima svrhu da omogući korektniju procenu empirijske verovatnoće najvećih i najmanjih vrednosti slučajne promenljive,

n – ukupan broj elemenata u uzorku.

Parametar α ima vrednost jednaku 0 kod Vejbulove raspodele i preporučuje se kao podrazumevana vrednost u skladu sa dosadašnjom praksom. Ovaj parametar ima sledeće vrednosti za različite kompromisne verovatnoće:

$\alpha = 0.40$ – Kanen (*Cunnane*),

$\alpha = 0.44$ – Gringorten,

$\alpha = 0.50$ – Hejzn (*Hazen*),

$\alpha = 0.30$ - Medijana

Na osnovu nekih od kriterijuma za kvalitet ocena statističkih parametara [5], predloženi su različiti izrazi za računanje kompromisne verovatnoće, pri čemu B17c preporučuje korišćenje kompromisne verovatnoće prema Hirš-Štedingeru [6].

Istorijske velike vode mogu se koristiti za precizniju ocenu kvantila velikih voda. Hirš i Štedinger preporučili su algoritam za određivanje kompromisnih verovatnoća za cenzurisane podatke (podaci sa pragom) kao što su istorijske velike vode.

Formule za proračun kompromisne verovatnoće prema Hirš-Štedingeru su različite ukoliko nedostaju različiti podaci ili se pojavljuju neke specifične situacije i postavljaju se GPP i DPP. Razmatrajući istorijske velike vode sa n_h – broj godina koje se odnose na određeni istorijski period pre n_s – broj godina koje se odnose na sistematsko osmatranje protoka (period rada stanice), dobija se ukupan vremenski period $n = n_h + n_s$. Ako je k vrednosti koje su premašile DPP indeksirano sa $i = 1, \dots, k$, aproksimacija kompromisne verovatnoće za prekoračenja sa intervalom $(0, p_e)$ je:

$$p_i = p_e \left(\frac{1-a}{k+1-2a} \right) = \frac{k}{n} \left(\frac{i-a}{k+1-2a} \right) \quad (2)$$

pri čemu $p_e = k / n$ predstavlja verovatnoću prekoračenja praga.

3.1 Primer za niz bez zabeleženog podatka

U sledećoj tabeli (Tabela 2) je prikazan primer za HS Niš koja ima jednu godinu (1988.) bez podataka o protocima, pa je za ovu godinu korišćen PP radi predstavljanja nezabeleženog protoka. U ovom slučaju DPP dodeljena je najmanja vrednost protoka raspoloživog niza godišnjih maksimuma, koja iznosi 46 m³/s, dok je za GPP dodeljena vrednost beskonačno. Proračun kompromisne verovatnoće je sproveden prema jednačini (2) te se kompromisna verovatnoća za protok koji ima vrednost 46 m³/s ($i=57$) proračunava na sledeći način:

$$p_i = \frac{57}{58} * \frac{57 - 0}{57 + 1 - 2 * 0} * 100 = 96.58$$

Tabela 2. Proračun kompromisne verovatnoće po Hirš-Štedingeru za HS Niš

Events Analyzed			Ordered Events		
Day	Mon	Year	Rank	Water- Flow cms	H-S Plot Pos
08	Mar	1962	1	537.0	1.69
19	Feb	1963	2	475.0	3.38
21	Feb	1964	3	473.0	5.08
30	Sep	1965	4	448.0	6.78
13	Feb	1966	5	372.0	8.47
12	Jul	1967	6	352.6	10.17
26	Feb	1968	7	338.5	11.86
16	Feb	1969	8	328.0	13.56
06	Jul	1970	9	307.8	15.25
31	Mar	1971	10	302.0	16.94
11	Sep	1972	11	287.0	18.64
28	Mar	1973	12	283.5	20.33
17	May	1974	13	278.0	22.03
22	Jun	1975	14	268.0	23.72
08	Jun	1976	15	265.2	25.42
30	Sep	1977	16	259.5	27.11
22	Mar	1978	17	252.0	28.80
05	Feb	1979	18	250.0	30.50
21	May	1980	19	248.0	32.19
14	Mar	1981	20	246.0	33.89
01	Apr	1982	21	235.0	35.58
18	Jun	1983	22	234.0	37.28
28	Mar	1984	23	230.0	38.97
25	Sep	1985	24	223.0	40.67
21	Feb	1986	25	223.0	42.36
02	Apr	1987	26	222.0	44.05
01	Jan	1988	27	210.1	45.75
10	May	1989	28	196.0	47.44
23	Apr	1990	29	192.0	49.14
26	May	1991	30	180.3	50.83
12	Apr	1992	31	178.5	52.53
29	Mar	1993	32	176.3	54.22
09	Mar	1994	33	174.4	55.92
26	Sep	1995	34	174.4	57.61
26	Sep	1996	35	167.5	59.30
24	Apr	1997	36	163.8	61.00
15	Feb	1998	37	161.1	62.69
28	Sep	1999	38	161.0	64.39
06	Apr	2000	39	160.0	66.08
24	Apr	2001	40	157.0	67.78
12	Jun	2002	41	140.0	69.47
11	Jan	2003	42	140.0	71.17
28	Feb	2004	43	135.3	72.86
19	Apr	2005	44	134.0	74.55
13	Apr	2006	45	129.0	76.25
28	Sep	2007	46	123.4	77.94
16	Apr	2008	47	120.0	79.64
29	Jan	2009	48	118.0	81.33
21	Apr	2010	49	107.0	83.03
20	Mar	2011	50	106.6	84.72
26	May	2012	51	103.0	86.41
22	Mar	2013	52	90.3	88.11
20	Apr	2014	53	90.3	89.80
29	Mar	2015	54	85.2	91.50
09	Sep	2016	55	76.4	93.19
02	Sep	2017	56	61.6	94.89
04	Mar	2018	57	46.0	96.58
01	Jan	2019	58	---	---

Za $k \gg (1-2a)$, p_i se ne razlikuje od $\frac{i-a}{n+1-2a}$ kada postoji samo jedan prag. Hirš je u svojim istraživanjima primetio da je za prvih k protoka, jednačina (2) identična kompromisnoj verovatnoći po Hejzenu, a veoma bliska kompromisnoj verovatnoći po Gringortenu.

3.2 Primer za niz sa donjim izuzetkom

Ukoliko se u nekom nizu pojave donji izuzeci, onda se kompromisna verovatnoća za te protoke računa prema Medijani. U sledećoj tabeli (Tabela 3) je ilustrovan ovaj primer za HS Piroć za koju je otkriven donji izuzetak, a jedan podatak nedostaje (1985. godina). Proračun kompromisne verovatnoće je sproveden prema jednačini (1) te se kompromisna verovatnoća za protok koji ima vrednost 24 m³/s (*i* = 42) proračunava na sledeći način:

$$p_i = \frac{42 - 0.3}{42 + 1 - 2 * 0.3} * 100 = 98.35$$

Tabela 2. Proračun kompromisne verovatnoće po Hirš-Štedingeru za HS Piroć

Events Analyzed			Ordered Events			
Day	Mon	Year	Rank	Water Year	Flow cms	H-S Plot Pos
28	Jan	1977	1	1981	149.0	2.27
22	Mar	1978	2	1983	139.0	4.54
03	Apr	1979	3	2007	135.3	6.81
24	Mar	1980	4	1980	130.0	9.08
14	Mar	1981	5	2003	128.4	11.35
01	May	1982	6	2014	118.0	13.62
02	Jul	1983	7	2012	116.9	15.89
05	Apr	1984	8	2015	111.3	18.16
01	Jan	1985	9	2005	107.7	20.43
20	Feb	1986	10	1987	106.0	22.70
01	Apr	1987	11	2010	101.9	24.97
28	Mar	1988	12	2018	97.0	27.24
09	May	1989	13	1978	95.7	29.51
24	Sep	1990	14	2009	95.0	31.78
26	May	1991	15	1979	92.8	34.05
13	Jul	1992	16	2008	89.8	36.32
29	Mar	1993	17	2006	89.8	38.59
03	Sep	1994	18	1997	88.4	40.86
29	Sep	1995	19	1999	84.9	43.13
27	Sep	1996	20	2017	82.8	45.40
23	Apr	1997	21	2016	82.4	47.67
18	Feb	1998	22	1991	80.8	49.94
28	Sep	1999	23	1977	79.8	52.21
11	Jul	2000	24	1998	77.9	54.49
09	Apr	2001	25	2013	75.5	56.76
13	Aug	2002	26	2019	73.5	59.03
11	Jan	2003	27	2004	68.0	61.30
27	Mar	2004	28	1996	66.2	63.57
18	Apr	2005	29	1982	64.3	65.84
13	Mar	2006	30	1995	62.2	68.11
27	Sep	2007	31	1984	58.7	70.38
15	Apr	2008	32	1992	58.2	72.65
29	Jan	2009	33	1993	57.7	74.92
16	May	2010	34	2001	54.9	77.19
06	Jan	2011	35	1986	54.8	79.46
28	May	2012	36	2000	54.3	81.73
03	Apr	2013	37	2002	52.8	84.00
19	Apr	2014	38	1989	52.7	86.27
29	Mar	2015	39	2011	50.0	88.54
24	Mar	2016	40	1994	48.9	90.81
02	Sep	2017	41	1988	36.8	93.08
14	Mar	2018	42	1990	24.0*	98.35
01	Jan	2019	43	1985	---	---

* Outlier

* Low outlier plotting positions are computed using Median parameters.

3.3 Primer za niz bez više zabeleženih podataka

Ako nedostaje više podataka, mogu se za svaki zadati različite vrednost PP. Na sledećem primeru prikazan je slučaj kada se koriste različite visine DPP. U ovom slučaju korišćene su dve vrednosti za DPP, $T_{y1,lower} = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ i $T_{y2,lower} = 60 \text{ m}^3/\text{s}$

Na osnovu ovog primera (Tabela 4) vidi se da k predstavlja broj godina u kojima su protoci imali vrednost veću od veće vrednosti postavljene za DPP. U ovom slučaju su se za 41 godinu javili protoci veći od $60 \text{ m}^3/\text{s}$, pa je $k = 41$. Proračun verovatnoće za protok od $71.3 \text{ m}^3/\text{s}$ je:

$$p_i = \frac{41}{56} * \frac{40}{41 + 1} * 100 = 69.73$$

Tabela 4. Proračun kompromisne verovatnoće po Hirs-Štedingeru za HS Knjaževac

Events Analyzed				Ordered Events			
Day	Mon	Year	FLOW cms	Rank	Water Year	FLOW cms	H-S Plot Pos
27	Apr	1964	226.0	1	1973	321.0	1.74
03	Mar	1965	158.0	2	1987	306.8	1.49
04	Jun	1966	203.0	3	1976	293.0	5.23
05	Feb	1967	37.9	4	2010	267.0	6.97
24	Feb	1968	34.0	5	1964	226.0	8.72
09	Jun	1969	182.0	6	1966	203.0	10.46
25	May	1970	99.6	7	1986	193.0	12.20
17	Mar	1971	151.0	8	2014	186.7	13.95
11	Sep	1972	120.0	9	1969	182.0	15.69
10	Jun	1973	321.0	10	2005	164.6	17.43
16	May	1974	105.0	11	1982	162.0	19.18
14	Jun	1975	144.0	12	1965	158.0	20.92
07	Jun	1976	293.0	13	1971	151.0	22.66
16	Mar	1977	95.6	14	2018	146.0	24.40
23	Mar	1978	88.4	15	1995	145.4	26.15
05	Feb	1979	58.0	16	1975	144.0	27.89
01	Jan	1980	---	17	2001	139.2	29.63
01	Jan	1981	---	18	2012	136.3	31.38
30	Apr	1982	162.0	19	2015	131.4	33.12
18	Jun	1983	51.3	20	1990	131.0	34.86
03	Mar	1984	71.3	21	1972	120.0	36.61
13	May	1985	93.6	22	2008	114.3	38.35
20	Feb	1986	193.0	23	1991	111.4	40.09
01	Apr	1987	306.8	24	1974	105.0	41.84
30	Mar	1988	53.1	25	1970	99.6	43.58
09	May	1989	29.6	26	2016	98.7	45.32
22	Apr	1990	131.0	27	1977	95.6	47.07
26	May	1991	111.4	28	1985	93.6	48.81
19	Apr	1992	62.8	29	1996	92.7	50.55
19	Mar	1993	25.7	30	1999	90.7	52.30
14	Apr	1994	17.1	31	2009	89.8	54.04
26	Sep	1995	145.4	32	1978	88.4	55.78
04	Apr	1996	92.7	33	2004	85.6	57.53
05	Apr	1997	75.7	34	2007	78.3	59.27
14	Feb	1998	25.3	35	2019	76.2	61.01
28	Sep	1999	90.7	36	2006	75.8	62.76
26	Apr	2000	33.0	37	1997	75.7	64.50
24	Apr	2001	139.2	38	2003	73.0	66.24
12	Jun	2002	48.4	39	2017	71.9	67.98
14	Apr	2003	73.0	40	1984	71.3	69.73
28	Feb	2004	85.6	41	1992	62.8	71.47
18	Apr	2005	164.6	42	1979	58.0	74.85
13	Apr	2006	75.8	43	2011	54.1	76.49
27	Sep	2007	78.3	44	1988	53.1	78.13
16	Apr	2008	114.3	45	1983	51.3	79.77
28	Sep	2009	89.8	46	2013	50.3	81.41
21	Feb	2010	267.0	47	2002	48.4	83.05
14	Mar	2011	54.1	48	1967	37.9	86.61
24	May	2012	136.3	49	1968	34.0	88.52
26	Feb	2013	50.3	50	2000	33.0	90.43
26	May	2014	186.7	51	1989	29.6	92.35
29	Mar	2015	131.4	52	1993	25.7	94.26
09	Sep	2016	98.7	53	1998	25.3	96.17
05	Feb	2017	71.9	54	1994	17.1	98.09
04	Mar	2018	146.0	55	1981	---	---
01	Jan	2019	76.2	56	1980	---	---

(j - 1) – ti prag

j – ti prag

Ovakav proračun kompromisne verovatnoće važi samo za protoke koji se nalaze iznad najveće vrednosti DPP, dok se za vrednosti protoka koje se nalaze između dva praga, kompromisna verovatnoća dobija po sledećoj formuli:

$$p_i = p_{e_{j-1}} + (1 - p_{e_{j-1}}) * q_{e_j} * \left(\frac{i - a}{k_j + 1 - 2a} \right) \quad (3)$$

gde je q_{e_j} – uslovna verovatnoća koja se odnosi na to da se protok javi između j – tog i $(j - 1)$ – tog praga, i izračunava se po sledećoj formuli:

$$q_{e_j} = \frac{k_j}{n_j - \sum_{l=1}^{j-1} k_l} \quad (4)$$

pri čemu:

k_j – predstavlja broj protoka koji premašuju prag j , ali ne i bilo koji viši prag $(j - 1)$,

n_j – predstavlja broj godina za koje se primenjuje prag $T_{y1,lower} (Q_j)$ umanjen za sumu svih protoka k_l koji premašuju bilo koji $(j - 1, j - 2, \dots)$ veći prag tokom perioda n_j .

Na ovom primeru (Tabela 4) to bi se odnosilo na vrednosti koje se nalaze između $i = 41$ i $i = 48$. Za $i > 48$, odnosno za protoke koji imaju vrednosti niže od najmanje vrednosti DPP, proračun kompromisne verovatnoće vrši se po sledećoj formuli:

$$p_r = p_e + (1 - p_e) * \left(\frac{r - a}{n_s - e_s + 1 - 2a} \right) \quad (5)$$

U ovom slučaju k predstavlja broj godina u kojima su protoci imali vrednost veću od $T_{y1,lower}$, što u ovom slučaju iznosi 47. Indeks r dobija vrednost 1 za prvu godinu koja se nalazi ispod $T_{y1,lower}$ ($i = 48$).

4. ZAKLJUČNI KOMENTARI

Analiza velikih voda na nepotpunim nizovima podataka može se sprovesti bez gubljenja dragocenih informacija o protocima zahvaljujući konceptu pragova percepcije, uvedenom u nove preporuke za ocenu velikih voda u SAD – Biltenu 17c. Za pravilno postavljanje PP, prema B17c poželjno je imati informacije o mogućim vrednostima protoka koji su se javili u periodu bez registrovanih protoka. Nedavno sprovedenim istraživanjima [1] i [7] pokazano je da

te informacije nisu ujedno i neophodne. Na osnovu raspoloživog niza podataka moguće je izabrati odgovarajuće vrednosti za DPP i dobiti relevantne ocene velikih voda.

Proračunom kompromisne verovatnoće prema Hirš-Štedingerovom izrazu, takođe novini primenjenoj u B17c, omogućeno je bolje prilagođavanje teorijske raspodele verovatnoće LP3 dostupnim podacima. Radi ilustracije načina proračuna kompromisne verovatnoće prema ovom izrazu, u radu su prikazane tri karakteristične situacije u inženjerskoj praksi: 1) kada nedostaje jedan podatak osmatranja i postavlja se jedan prag percepcije, 2) kada se pojavljuje donji izuzetak u nizu i 3) kada se postavljaju dva donja praga percepcije.

Istraživanja [1] i [7] su pokazala da vrednost maksimalnog i prosečnog protoka raspoloživog niza predstavljaju dobar izbor za DPP kod velikih slivova. U ovim istraživanjima je takođe uočeno da se kod većeg broja registrovanih donjih izuzetaka u malim i srednjim slivovima, bolji rezultati dobijaju kada se koristi najmanja osmotrena vrednost kao DPP.

Zahvaljujući fleksibilnom izrazu Hirša i Štedingera za proračun kompromisne verovatnoće, uz poboljšanje metode za ocenu parametara Log-Pirson 3 (LP3) teorijske raspodele verovatnoće pomoću Algoritma očekivanih momenata (*Expected Moments Algorithm – EMA*), omogućeno je da se protoci koji nedostaju predstave pomoću intervala ili pragova percepcije.

5. LITERATURA

- [1] Blagojević, B., Mihailović, V., Đokić, N., (2020): Ocena kvantila velikih voda iz nepotpunih nizova osmatranja na većim slivovima u Srbiji primenom pragova percepcije. *Vodoprivreda* 0350-0519, Vol. 52 (2020) No. 306-308 p.259-272.
- [2] Patricia Tencaliec, Anne-Catherine Favre, Clementine Prieur, Thibault Mathevet: Reconstruction of missing daily streamflow data using dynamic regresion models. *Water Resources Research, American Geophysical Union*, 2015, 51 (12), pp. 9447-9463. 10.1002/2015WR017399. hal-01245238.
- [3] Popović, B. i Blagojević B. (2003): *Matematička statistika sa primenama u hidrotehnici*. Izdavvačka jedinica Univerziteta u Nišu, Niš.
- [4] John F. England, Jr., U.S. Army Corps of Engineers Timothy A. Cohn, U.S. Geological Survey (deceased) Beth A. Faber, U.S.

Army Corps of Engineers Jery R. Stedinger, Cornell University Wilbert O. Thomas, Jr., Michael Baker International Andrea G. Veilleux, U.S. Geological Survey Julie E. Kiang, U.S. Geological Survey Robert R. Mason, Jr., U.S. Geological Survey: Guidelines for Determining Flood Flow Frequency Bulletin 17C.

- [5] Jasna Plavšić i saradnici (2012): Preporuke za statističku analizu velikih voda na profilima hidroloških stanica (na izučenim slivovima). Izrada metodologije za standarizaciju proračuna velikih voda u Srbiji – I faza.
- [6] Rober M. Hirsch, Jery R. Stedinger: Plotting positions for Histroical Floods and Their Precision. Water Resources Research, VOL. 23, NO. 4, PAGES 715-727, APRIL 1987.
- [7] Đokić N., Blagojević B., Mihailović V. (2021) Missing data representation by perception thresholds in flood flow frequency analysis. Journal of Applied Engineering Scince - Volume 19 article 810 pages: 432-438.