

Pješački drveni most u Trogiru

Jure Radnić, Alen Harapin, Marija Smilović

Ključne riječi

pješački drveni most,
Trogir,
dvozglobni luk,
poprečna greda,
masivna prirodna
hrastovina,
spojna sredstva

Key words

wooden footbridge,
Trogir,
two-hinged arch,
cross beam,
natural massive oak-wood,
connecting elements

Mots clés

passerelle de bois,
Trogir,
arche à deux articulations,
poutre transversale,
bois naturel de chêne
massif,
moyens de connexion

Ключевые слова

пешеходный
деревянный мост,
Трогир,
двухузловая арка,
поперечная балка,
массивная древесина
дуба, соединительные
средства

Schlüsselworte

hölzerne
Fussgängerbrücke,
Trogir, Zweigelenbogen,
Querbalken,
massives natürliches
Eichenholz,
Verbindungsmittel

J. Radnić, A. Harapin, M. Smilović

Stručni rad

Pješački drveni most u Trogiru

Prikazano je rješenje pješačkog drvenog mosta preko kanala Foša u Trogiru kojim ga se nastojalo uklopiti u ambijent grada. Montažno-demontažnu rasponsku konstrukciju mosta tvore dva dvozglobna drvena luka raspona 25 m. Lukovi su povezani poprečnim gredama, iznad kojih je izvedena dvoslojna križna daščana podloga. Svi su dijelovi rasponskog sklopa izvedeni iz masivne hrastovine. Spojna sredstva su vijci i moždanici. Ispod mosta moguće je prolaz plovila visine do 4,5 m.

J. Radnić, A. Harapin, M. Smilović

Professional paper

Wooden footbridge in Trogir

The solution used for the wooden footbridge across the Foša Canal in Trogir, specifically aimed at blending this structure with its urban surroundings, is presented. The mountable-dismountable superstructure of this bridge is formed of two double-hinged wooden arches, 25 m in span. The arches are linked with cross beams, above which a two layered cross-boarded surface was realized. All superstructure segments are made of massive oak-wood. Bolts and stud connectors were used as connecting elements. Vessels up to 4.5 m in height can pass under the bridge.

J. Radnić, A. Harapin, M. Smilović

Ouvrage professionnel

Passerelle de bois à Trogir

La solution utilisée pour le pont piétons de bois à travers le Canal de Foša à Trogir, spécialement conçue pour fusionner cette structure avec le milieu urbain l'entourant, est présentée. La superstructure démontable-rémontable de cette passerelle est formée de deux arches de bois à deux articulations, 25 m de portée. Les arches sont reliées aux poutres transversales, au-dessus desquelles une surface de planches croisées à doux couches a été réalisée. Toutes parties de la superstructure sont faites de bois massif de chêne. Les boulons et les goujons ont été utilisés comme moyens de connexion. Les bateaux de 4,5 m d'hauteur peuvent passer sous cette passerelle.

Џ. Раднич, А. Харапин, М. Смилевич

Отраслевая работа

Пешеходный деревянный мост в Трогире

В работе показано решение пешеходного деревянного моста через канал Фоша в Трогире, с помощью которого попыталось включить его в окружающую среду города. Монтажно-демонтажную пролётную конструкцию моста создают две двухузловых деревянных арки пролётом в 25 м. Арки связаны поперечными балками, из-над которых возведено двухслойное крестообразное дощатое основание. Все части пролётного узла сделаны из массивной древесины дуба. Соединительными средствами являются винты и шпонки. Из-под моста возможен проход судов высотой до 4,5 м.

J. Radnić, A. Harapin, M. Smilović

Fachbericht

Die hölzerne Fussgängerbrücke in Trogir

Dargestellt ist die Lösung der Fussgängerbrücke über den Kanal Foša in Trogir, mit der man trachtete sie in das Ambiente der Stadt einzufügen. Die vorgefertigte demontable Konstruktion der Brücke besteht aus zwei hölzernen Zweigelenkbögen von 25 m Spannweite. Die Bögen sind mit Querbalken verbunden, über denen ein zweischichtiger Boden aus gekreuzten Brettern ausgeführt ist. Alle Teile der Brückenkonstruktion sind aus massivem Eichenholz ausgeführt. Die Verbindungsmittel sind Schrauben und Dübel. Unter der Brücke können Wasserfahrzeuge bis 4,5 m Höhe passieren.

Autori: Prof. dr. sc. **Jure Radnić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Alen Harapin**, dipl. ing. građ.; **Marija Smilović**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Matice hrvatske 15, Split

1 Uvod

Zbog vrlo bogate graditeljske i kulturne baštine, povijesna je jezgra Trogira pod zaštitom UNESCO-a. Smještena je na malom otočiću dugom oko 400 m i širokom oko 200 m. Otočić je povezan malim kamenim lučnim mostom s kopnom na sjevernoj strani i pokretnim kameno-čeličnim mostom s otokom Čiovom na južnoj strani (slika 1.).



- ① Postojeći kameni lučni most
- ② Postojeći pokretni kameno-čelični most
- ③ Novi drveni pješački most

Slika 1. Povijesna jezgra Trogira

Novi drveni most omogućava dopunsku pješačku vezu uže jezgre Trogira s kopnom. Lociran je oko 600 m zapadno od postojećega kamernog mosta i premošćuje morski kanal Fošu u neposrednoj blizini gradskog parkirališta na kopnenoj strani.

Prema projektom zahtjevu konzervatora, bilo je nužno izgraditi klasičan drveni most s montažno – demontažnom rasponskom konstrukcijom. Dopuštena je samo uporaba prirodne drvene građe i tradicionalnih tesarskih spojeva drvenih elemenata. Osim osiguranja prijelaza pješaka preko kanala, bilo je nužno omogućiti i prolaz nižih plovila ispod mosta. S estetske je strane zahtijevano takvo rješenje mosta koje će se što skladnije uklopiti u postojeći povijesni i prirodni ambijent ovoga drvnoga gradića.

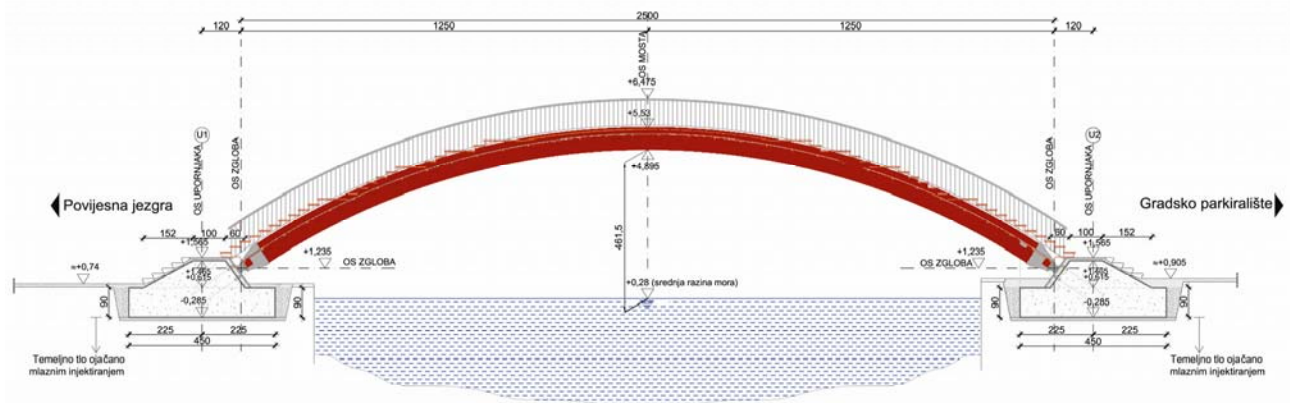
Koliko je autorima ovog članka poznato, ovo je jedan od izuzetno rijetkih suvremenih drvenih mostova izgrađenih od prirodne drvene građe i na tradicionalan način. Uz relativno veliki raspon i originalnost rješenja elegantnih drvenih lukova, ovaj mali most zavrjeđuje pozornost.

2 Globalno rješenje mosta

Uzdužna dispozicija mosta prikazana je na slici 2., a njegova poprečna dispozicija na slici 3. Odabran je lučni nosivi sustav rasponske konstrukcije mosta kao jedne od najstarijih prirodnih nosivih struktura u povijesti graditeljstva. U isto vrijeme luk omogućava prolaz plovilima ispod mosta te osigurava elegantnu i transparentnu rasponsku konstrukciju. Respektirajući obližnju povijesnu gradsku jezgru u kojoj su sve krovne konstrukcije izrađene iz klasične drvene građe, prirodno je drvo uzeto kao glavno gradivo i za ovaj most.

Most ima dva dvozglobna drvena luka raspona 25 m, smještena na bokovima poprečnog presjeka. Lukovi su konstantne širine (48,00 cm), visine (68,00 m) i zakrivljenosti intradosa ($R = 21,70$ m) na čitavoj duljini mosta. Povezani su poprečnim drvenim gredama na osnom razmaku 80 cm i iznad njih ukrućeni dvoslojnom daščanom podlogom.

Odabrani dvozglobni luk estetski je povoljan, nije osjetljiv na relativna vertikalna slijeganja oslonaca, malo je



Slika 2. Uzdužna dispozicija mosta

osjetljiv na promjene vlažnosti drvene građe i temperaturne promjene te je povoljan za temeljenje. Temelji mosta su masivni armiranobetonski blokovi kojih je vrh izdignut približno 60 cm iznad razine šetnica uz morskog kanal. Vidljivi vanjski oslonci lukova izgrađeni su od kamena, kao i prilazne stubbe, a zglobna veza između drvenih lukova i betonskih temelja izvedena je od čeličnih elemenata.



Slika 3. Poprečna dispozicija mosta

Strelica luka odabrana je na temelju pažljive analize više utjecajnih faktora i uravnoteženja bitnih zahtjeva, kao što su: estetski, pješački, plovni, tehnički i sl. Uporabna je širina mosta 3,00 m, razmak između lukova je 3,2 m, a ukupna širina mosta jest 4,16 m. Drveni rasponski sklop izveden je od kvalitetne hrastovine, klasičnim vezovima i nastavcima greda. Naslon ograde također je izrađen od hrastovine, dok su ostali elementi ograde metalni. Nastojalo se da ograda bude što jasnija u prostoru. Posebna je pozornost posvećena zaštiti drvene građe radi postizanja dostatne trajnosti mosta.

3 Neke specifičnosti rješenja

3.1 Glavna nosiva konstrukcija

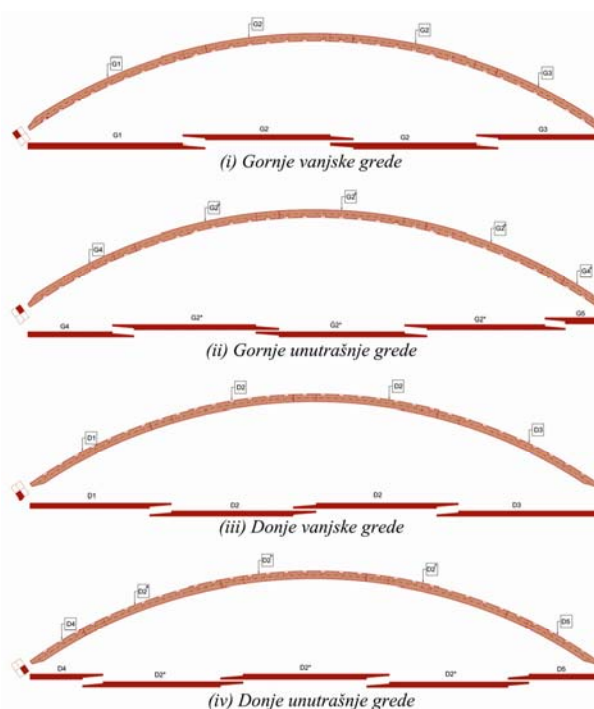
3.1.1 Lukovi

Lukovi su formirani od po četiri drvene grede poprečnoga presjeka 24/34 cm, dvije po širini i dvije po visini, tako da je svaki luk konstantnoga poprečnoga presjeka 48/68 cm po čitavoj duljini. Grede luka su međusobno spregnute u jedinstveni presjek za savijanja u horizontalnoj i vertikalnoj ravni mosta. Lukovi su kružnog oblika radi lakše izvedbe.

Za sprezanje greda luka rabe se vijci i trnovi od nehrđajućeg čelika. Za vertikalno sprezanje upotrebljavaju vijci M-20, a za horizontalno sprezanje vijci M-24, s odgovarajućim kružnim podložnim pločicama od nehrđajućeg čelika. Poprečne drvene grede mosta ujedno su i moždanici za vertikalno sprezanje lukova. Metalni moždanici su ugrađeni između spojnih ploha drvenih greda na mjestu svakoga vijka.

Čelični vijci, čvrstoće 360 MPa, ugrađuju se u prethodno izbušene rupe. Pri konačnoj montaži vijci M-20 pri težu se silom 12 kN, a vijci M-24 silom 15 kN. Uporab-

ljeno epoksidno ljepilo, s odgovarajućim punilom otporno je na promjene vlažnosti drva i temperature te vremenski postojano.



Slika 4. Shema nastavljanja greda luka

Grede luka uzdužno se nastavljaju zasijecanjem i preklapanjem u duljini 1 m, uz uporabu metalnih vijaka i moždanika. Vertikalno zasijecanje obavlja se nakon prethodno precizno izbušenih rupa, tako da ne bi došlo do oštećenja preostalog nosivog dijela presjeka. Preklopi greda su tako raspoređeni da se u jednom presjeku nastavlja najviše jedna greda. Pri tome su nastavci greda pojedinog pojasa smaknuti za polovinu duljine grede. Mjereno u osi luka, osni je razmak nastavaka u svakom pojasu 3,2 m. Prije konačne montaže, sve su spojne plohe nastavaka također premazane epoksidom, a preklapljeni elementi učvršćeni vijcima i moždanicama. Pretežiti dio drvenih greda luka je duljine 7,4 m, samo su dvije grede duljine 8,5 m, dok su preostale grede kraće.

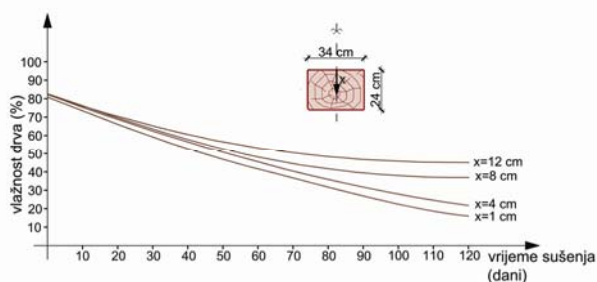
Kako je luk zakrivljen, za prirodno ravne drvene grede bilo bi nužno njihovo zakrivljavanje. To bi zahtijevalo silan napor, ali i uvođenje nekontroliranoga stanja naprezanje-deformacija u elemente luka. Zato je uloženo dosta truda u pronalaženje hrastova koji imaju prirodnu zakrivljenost vrlo blisku projektiranoj zakrivljenosti greda luka. Male korekcije takvih bliskozakrivljenih greda nisu imale praktičnog utjecaja na njihovu pojedinačnu nosivost, kao ni na nosivost spregnutog luka. Naime, uzdužna drvena vlakna ostala su usporedna na čitavoj dužini gotovo svih greda, a samo je prekinut uzdužni kontinuitet malog dijela vlakanaca kod nekoliko greda.

rečnih greda nastavlja naizmjenično najviše 50 % dasaka. Nastavci su na razmacima $3 \times 0,8 = 2,4$ m. Prije postavljanja drugog sloja dasaka, na gornju plohu prvog sloja nanosi se epoksid s punilom. Drugi red dasaka debljine 2 cm postavlja se okomito na donji sloj. Gornje daske se učvršćuju za donje daske metalnim *klamficama*, a na mjestu poprečnih greda čavlima. Gornja ploha dašćane podloge zaštićena je hidroizolacijom.

3.1.4 Obrada i zaštita drva

Sva je drvena građa od slavonske hrastovine prve kvalitete, koja je pažljivo odabrana prije same sječe stabala. Posebna je pozornost posvećena sušenju grubo ispiljenih masivnih drvenih greda, a osobito onih većega poprečnoga presjeka namijenjenih izradi lukova. Sušenje sirove građe obavljeno je u sušari, uz stalnu kontrolu vlažnosti drva po dubini presjeka grede, s prilagođivanjem temperature i vlažnosti prostorije za sušenje. Vlažnost prostorije mijenjala se od 50 do 60 %, a temperatura od 32° do 36°C. Na slici 6. prikazana je promjena vlažnosti drva po dubini drvene grede presjeka 24/34 cm. S konačnom obradom drvenih greda započelo se pošto je sušenjem postignuta prihvatljiva vlažnost drva ovisno o debljini presjeka grede. Da je sušenje drvenih greda obavljeno kvalitetno, potvrđuje činjenica malog broja sitnih pukotina u drvenoj građi nakon dovršetka mosta.

Sve plohe svih greda i dasaka su blanjanje. Vanjske vidljive plohe lukova i poprečnih greda su pjeskarene kako bi se što bliže dobio njihov što arhaičan izgled. Tako je ujedno uklonjen i površinski dio drvenih vlakana manje čvrstoće.



Slika 6. Promjena vlažnosti drvene grede presjeka 24/34 cm pri sušenju

S obzirom na izravnu izloženost mosta atmosferilijama i djelovanju mora, pozornost je posvećena kvalitetnoj zaštiti drva. U tu svrhu, nakon obrade ploha drva i izvršenog pjeskarenja, drveni su elementi prvo uranjani u kade ispunjene fungicidom protiv biljnih nametnika, gljivica i insekata, te za zaštitu od vlage, s utroškom zaštitnog sredstva od oko 400 g/m² ploštine drva. Šire su pukotine u drvu dodatno izdašno natopljene istim sredstvom i potom injektirane poliuretanskom masom visoke elastičnosti,

otpornom na ultraljubičasta zračenja i utjecaje atmosfere. Nakon toga su elementi dvaput uronjeni u kadu sa zaštitnim lazurnim sredstvima protiv utjecaja atmosferilija. Završna zaštita u radionici sastojala se od premazivanja vanjskih ploha drva postojećim bezbojnim lazurnim lakom.

U fazi konačne montaže, sve su spojne plohe drva premazane postojećim epoksidom otpornim na vlagu. Sve su rupe za vijke također natopljene epoksidom, a u njega su također uronjeni i svi vijci moždanici. Na kraju konačne montaže mosta sve su oštećene površine drva sanirane i potom premazane završnim lazurnim premazom. Predviđeno je da se svake dvije godine sve vidljive plohe drva premažu sa dva sloja kvalitetnih zaštitnih lazurnih premaza.

SUDIONICI U IZGRADNJI

- *Investitor:* Grad Trogir
- *Glavni i izvedbeni projekt:* Prof. dr. sc. Jure Radnić, Radnić d.o.o., Split
- *Građenje:*
 - rasponski sklop: Naprijed Sinj d.o.o., Sinj
 - temelji i kameno stubište: Point d.o.o. Split
- *Tehnički nadzor:* Kozina projekt d.o.o., Trilj

3.2 Još neka rješenja

3.2.1 Zglobovi luka

Linjski ležaj luka izveden je od zavarenih čeličnih limova (slika 5.). Sastoji se od papuče koja obuhvaća drveni luk, donje sidrene ploče i 4 sidrena vijka M-32 koji se ugrađuju u temelj, te od dviju konzolnih ploča kroz koje prolazi valjkasti tm. Svi su elementi od čelika St 240/360, pocinčani u debljini sloja $t = 200 \mu\text{m}$, te dopunski zaštićeni antikorozijskim premazima i završnim slojem boje. Prije ugradnje metalne papuče vanjske drvene plohe luka u dodiru s čelikom premazane su epoksidom, a nakon ugradnje i stezanja vijaka šupljine između luka i bočnih limova injektirane su epoksidom pod tlakom.

3.2.2 Pomost

Pomost formiraju drvene stube i podesti, s drvenim nosačima iznad dašćane podloge. Hodna je ploha izvedena od mosnica debljine 40 mm. Bočni spojevi mosnica su sustava utor-pero. Sve vanjske plohe drva su blanjanje. Zaštita drvenih ploha odgovara zaštiti luka, s tim da su na hodnu plohu nanosena još dva dodatna zaštitna premaza.

3.2.3 Ograda mosta

Naslon ograde također je od hrastovine, dok su ostali dijelovi od kovanoga željeza. Naslon prati zakrivljenost ekstradosa luka, a izrađen je od hrastova koji imaju sličnu prirodnu zakrivljenost. Metalni dio ograde sastoji se od gornje lamele 80/8 mm, donje lamele 50/8 mm, te ispune od tankih vertikalnih stupaca 15/15 mm na razmaku 14 cm. Ograda je učvršćena za drveni luk na razmaku 80 cm, na mjestu vertikalnih vijaka za njegovo sprezanje. Nakana je bila da ograda bude što providnija i da se što manje nameće drvenim lukovima.

3.2.4 Temelji

Za oslonce luka izgrađeni su masivni armiranobetonski temelji. Oni preuzimaju sva vertikalna i horizontalna opterećenja rasponskog sklopa, te ih prenose na temeljno tlo. Horizontalne sile s temelja na tlo računski se prenose samo trenjem, iako se njihov veliki dio može preuzeti bočnim otporom tla (tlo oko temelja je dobro nabijeno). Tlo ispod temelja ojačano je mlaznim injektiranjem u dubini 8 m ispod razine dna temelja. Nisu izmjereni nikakvi značajniji pomaci ni zaokreti temelja od vremena njihova završetka do vremena puštanja mosta u uporabu.

3.2.5 Stubište

Stubište za pristup na drvenu rasponsku konstrukciju izvedeno je od masivnog kamena. Upotrijebljen je bijeli vapnenac "seget" iz obližnjeg kamenoloma od kojega je izvedena i povijesna jezgra grada. Kamen je vrlo kvalitetan, velike čvrstoće i otpornosti. Oblik stubišta i profilacije stuba vidljivi su na slikama 5. i 11.

3.2.6 Proračun

Svi su proračuni provedeni sukladno suvremenim normama u području projektiranja i proračuna mostova [1], [2] i [4], a napose drvenih konstrukcija [3]. Uporabljjen je prostorni štapni model konstrukcije, sastavljen od lukova i poprečnih greda. Daščana podloga iznad poprečnih greda nije uključena u globalnu proračunsku nosivost rasponskog sklopa, što je na strani veće sigurnosti, već samo u analizi horizontalnih pomaka preko odgovarajućeg povećanja krutosti lukova za savijanje bočno na most.

Opterećenje pješaka uzeto je $5,0 \text{ kN/m}^2$. Razmatrane su sve mjerodavne simetrične i nesimetrične sheme opterećenja pješaka. Vjetar u smjeru osi mosta i okomito na ravninu mosta računat je sa 180 km/h . Utjecaj promjene vlažnosti drva simuliran je kao jednolika promjena temperature po duljini drvenih elemenata u iznosu $\pm 30^\circ\text{C}$, te nejednolika promjena temperature po visini presjeka

elemenata u iznosu $\pm 10^\circ\text{C}$. Horizontalno razmicanje oslonaca luka proračunski je uzeto 2 cm . Za proračun na potres, proračunsko ubrzanje tla uzeto je $0,25 \text{ g}$. Potresne sile su određene metodom superpozicije oblika osciliranja uz primjenu prvih dvadeset oblika slobodnih oscilacija. Koeficijent ponašanja uzet je $2,0$ [4]. Udar plovila uzet je kao statička bočna horizontalna sila u tjemenu luka od 100 kN . Sve unutrašnje sile u konstrukciji proračunane su uz pretpostavku linearnog ponašanja materijala, s uključenjem utjecaja pomaka konstrukcije (geometrijska nelinearnost).

U odnosu na potpuno elastično sprezanje, drveni spregnuti luk proračunan je s koeficijentom sprezanja $0,6$ za krutosti (pomake) i $0,5$ za dokaz napreznja. Momente savijanja, momente torzije, poprečne sile i uzdužne sile u poprečnim gredama na spoju s lukom proračunski nosi samo oslabljeni presjek poprečne grede $22/14 \text{ cm}$. Vertikalni su pomaci rasponskog sklopa maleni zbog velike krutosti lukova. Očekuje se da neće biti problema s vibracijama mosta pod opterećenjem pješaka zbog njegove velike krutosti i činjenice da je proračunska frekvencija prvog oblika slobodnih oscilacija $3,5 \text{ Hz}$. Naime, proračunski su nepovoljne frekvencije između $1,5 \text{ Hz}$ i 3 Hz [1].

4 Izvedba

Tlo ispod temelja lukova i prilaznih stuba ojačano je mlaznim injektiranjem. Betoniranje temelja izvršeno je u suho, uz crpenje procjedne morske vode iz građevne jame. Svi su drveni elementi mosta izrađeni u pogonu (slika 7.), s probnom montažom lukova i poprečnih greda (slika 8.).



Slika 7. Izrada lukova



Slika 8. Probna montaža lukova i poprečnih greda u radionici



Slika 9. Predmontaža rasponskog sklopa na obali ispred lokcije mosta



Slika 10. Montaža rasponskog sklopa autodizalicom

Nakon demontaže ovih elemenata i prijevoza do gradilišta, izvršena je njihova predmontaža na uređenom platou uz lokaciju mosta (slika 9.). Zatim je izvedena daščana ukruta iznad poprečnih greda i njezina hidroizolacija, a potom je cjeloviti nosivi sustav rasponskog sklopa



Slika 11. Dvije vizure dogotovljenog mosta

pa mosta montiran autodizalicom na prethodno ugrađene metalne sidrene ploče u temeljima (slika 10.). Na kraju su izvedeni: kamena stubišta na prilazima, ograda mosta, drvene stube (gazišta) i ostali završni radovi. Neke vizure dogotovljenog mosta prikazane su na slici 11.

LITERATURA

- [1] HRN ENV 1991, Djelovanje na konstrukcije
- [2] HRN ENV 1992, Projektiranje betonskih konstrukcija
- [3] HRN ENV 1995, Projektiranje drvenih konstrukcija
- [4] HRN ENV 1998, Projektiranje konstrukcija otpornih na potres
- [5] Radnić d.o.o., Split: *Glavni projekt drvenog mosta u Trogiru*, T.D. 11/2004/JR, 2004.
- [6] Radnić d.o.o., Split: *Izvedbeni projekt drvenog mosta u Trogiru*, T.D. 11/2004/JR-IZV, 2005.