

doi: 10.67563/ASESCONF2026105B

Nikola Baša¹, Mladen Ulićević², Marko Božović³, Stefan Kandić⁴

DESIGN OF THE ZETA BRIDGE ON THE SMOKOVAC-TOLOŠI SECTION – PODGORICA BYPASS

Summary: The Zeta Bridge is located on the Bar-Boljare Highway, Smokovac-Tološi section, forming part of the Podgorica bypass, at the Donji Rogami site. The bridge crosses the valley and the riverbed of the Zeta River, a railway line, a main and local road, as well as a small settlement, over a total obstacle length of approximately 500 m and a maximum depth of approximately 70 m. The bridge length, measured between the abutment axes, is 450 m. A continuous frame structural system with four spans of $85+140+140+85 = 450$ m has been adopted. The main superstructure consists of a prestressed box-girder cross-section of variable depth, with a total bridge width of 21.6 m. The intermediate piers are box-shaped, with variable cross-sections, and are configured as single- and double-shaft piers, with heights ranging from 40 m to 52 m. The superstructure is constructed using a segmental balanced cantilever construction method, proceeding symmetrically from the intermediate piers. Construction is carried out using 17 segments on each side of intermediate pier, with segment lengths of $6 \times 3 \text{ m} + 6 \times 3.75 \text{ m} + 5 \times 4.5 \text{ m}$.

Keywords: bridge, segmental balanced cantilever construction, superstructure, box-girder cross-section, stress state

PROJEKAT MOSTA ZETA NA DIONICI SMOKOVAC-TOLOŠI – OBILAZNICA OKO PODGORICE

Rezime: Most Zeta se nalazi na Autoputu Bar-Boljare, dionica Smokovac-Tološi, obilaznica oko Podgorice, na lokalitetu Donji Rogami. Most premošćuje dolinu i korito rijeke Zete, željezničku prugu, magistralni i lokalni put, kao i manje naselje, ukupne dužine oko 500 m i maksimalne dubine oko 70 m. Dužina mosta, mjereno od osloničkih osovina na oporcima iznosi 450 m. Usvojen je kontinualni okvirni sistem sa četiri raspona $85+140+140+85 = 450$ m. Glavnu rasponsku konstrukciju čini prethodno napregnuti sandučasti poprečni presjek promjenljive visine, sa ukupnom širinom mosta 21.6 m. Srednji stubovi su sandučasti, promjenljivog poprečnog presjeka, jednodjelni i dvodjelni, visine od 40 m do 52 m. Za rasponsku konstrukciju je primijenjen segmenti sistem uravnotežene slobodne konzolne gradnje od srednjih stubova. Gradnja se vrši u 17 segmenata lijevo i desno od svakog srednjeg stuba po dužinama $6 \times 3 \text{ m} + 6 \times 3.75 \text{ m} + 5 \times 4.5 \text{ m}$.

Ključne reči: most, segmentna uravnotežena konzolna gradnja, rasponska konstrukcija, sandučasti presjek, naponsko stanje

¹ Građevinski fakultet u Podgorici, Univerzitet Crne Gore, nikola.basa@ucg.ac.me

² Univerzitet Crne Gore, CDS Project, Podgorica, Crna Gora

³ Građevinski fakultet u Podgorici, Univerzitet Crne Gore

⁴ Aedificium, Podgorica, Crna Gora

1. UVOD

Dionica Smokovac-Tološi predstavlja dio Autoputa Bar-Boljare i čini sjeverozapadni dio obilaznice oko Podgorice. Dionica je dužine oko 10.5 km i povezuje postojeću petlju Smokovac sa područjem Tološa, čime se obezbjeđuje kvalitetna saobraćajna veza između sjevernog i zapadnog dijela putne mreže Podgorice i omogućava preusmjeravanje tranzitnog saobraćaja van gradskog područja. Projektovana brzina na dionici iznosi 100 km/h, a predviđen je puni profil autoputa, sa petljama Smokovac i Tološi, kao i pratećim sadržajima u području Veljeg brda.

Trasa prolazi kroz složen brdsko-planinski i dolinski teren, prelazi dolinu i korito rijeke Zete, dolinu Širalijske, postojeću željezničku prugu, magistralne i lokalne puteve, kao i druga infrastrukturna i naseljena područja. Na dionici je predviđeno pet značajnih mostova i jedan tunel, pri čemu se posebno izdvaja most Zeta, dužine 450 m. Zbog složenih morfoloških uslova terena, velikih mostovskih objekata i brojnih ukrštanja sa postojećom infrastrukturom i prirodnim vrijednostima, dionica predstavlja tehnički zahtjevan dio Autoputa Bar-Boljare.

Trasa mosta Zeta je u pravcu. Podužni nagib je 0.85%, dok je poprečni nagib 2.5% na obje strane kolovoza.

Prema podacima iz geotehničkog elaborata, osnovnu geološku građu terena na većem dijelu trase mosta čine dolomitni krečnjaci, dok se na jednom dijelu nalazi prašinasto glinoviti pijesak i prašinasta glina debljine 5-20 m, a podinu flišni kompleks (zdravi fliš). Stubovi mosta S2 i S3 su fundirani na šipovima koji, preko degradiranog sloja, zalaze u čvrstu stijensku masu dolomitnog krečnjaka, dok su stub S1 i oporci fundirani na temeljima samcima direktno na čvrstu stijensku masu.

2. PROJEKTOVANO RJEŠENJE I KONCEPT KONSTRUKCIJE MOSTA

Most Zeta premošćuje korito rijeke Zete, željezničku prugu, magistralni i lokalni put i manje naselje, ukupne dužine oko 500 m i maksimalne dubine oko 70 m. Pri izboru konceptijskog rješenja mosta vođeno je računa o njegovom izgledu i uklapanju u prirodni ambijent. S obzirom na visinu, širinu i dužinu prepreke i topologiju terena trase, za izgradnju mosta je primjenjen sistem bez klasične skele, sa što manjim brojem stubova, odnosno dužim rasponima. Imajući u vidu poželjno izbjegavanje postavljanja visokih stubova u okolini rijeke Zete, izabran je kontinualni okvorni sistem sa četiri raspona $85+140+140+85 = 450$ m (slika 1). Kao takav, most je idealan za sistem slobodne konzolne gradnje rasponske konstrukcije. Ukupna dužina mosta je određena i iz uslova adekvatnog izbora visine oporaca mosta, ali i iz mogućnosti izvođenja dijela mosta, na početku i kraju, u klasičnoj skeli, što je čest slučaj prilikom primjene slobodne konzolne gradnje.

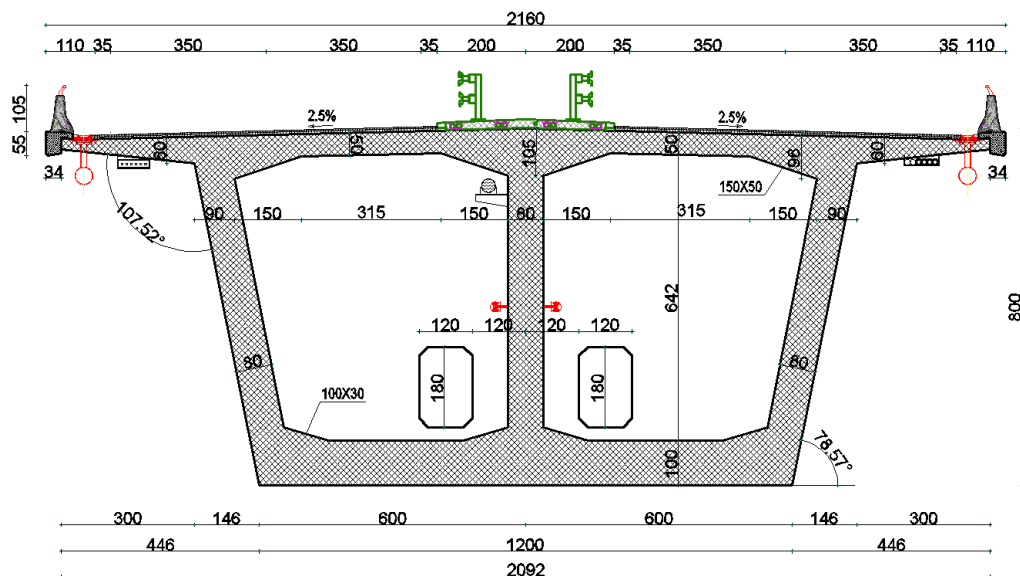
Za rasponsku konstrukciju je izabran sandučasti poprečni presjek promjenljive visine paraboličnog oblika, estetski prihvatljiv i racionalan za indicirane raspone. S obzirom da se radi o prigradskom naselju, prilikom koncipiranja stubova, vođeno je računa, kako o racionalnom tehničkom rješenju, tako i o estetskim kriterijumima. Iz ovih razloga, kod sva tri stuba su, u gornjem dijelu, pri vezi sa rasponskom konstrukcijom, projektovani dvodjelni elementi u obliku račve, koji se idealno uklapaju u prirodni ambijent (slika 1).

Dispoziciono rješenje objekta prati elemente trase puta na ovom lokalitetu. Normalni profil je u cjelini preuzet iz projekta glavne trase na dijelu mosta: širina kolovoza je $4 \times 3.50 = 14.0$ m, sa četiri ivične trake 4×0.35 m, dvije zaštitne trake 2×0.50 m, sa ivičnim vijencima i sigurnosnim betonskim ogradama 2×0.6 m i razdjelnim pojasom od širine od 4.00 m, što daje ukupnu širinu mosta od 21.60 m [1].

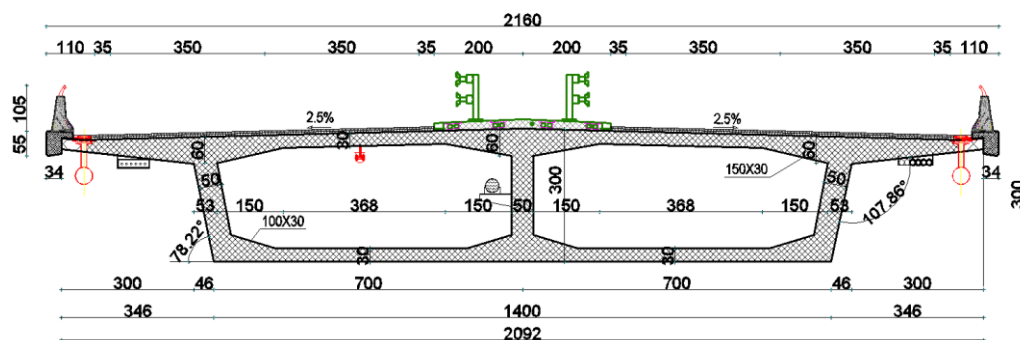
Usvojeno tehničko rješenje predstavlja kontinualni AB/PN okvorni sistem koji, kako je navedeno, ima četiri raspona $85+140+140+85 = 450$ m, dok je glavna sandučasta rasponska konstrukcija mosta ukupne širine 20.92 m (slika 1).

Iznad stubova, visina presjeka je najveća, i iznosi 8.0 m, debljine gornje ploče 50 cm, debljine donje ploče 100 cm, i debljine rebra 80 cm (slika 2). Na krajevima mosta i u sredini srednjeg raspona visina presjeka je najmanja, i iznosi 3.0 m, debljine gornje ploče 30 cm, debljine donje ploče 30 cm, i debljine rebra 50 cm (slika 3). Veza rebra sa gornjom pločom, u poprečnom presjeku, je ostvarena preko vuta dimenzija 150x30 cm, odnosno sa donjom pločom dimenzija 100x30 cm. Konzolni prepusti ploče su dužine po 3.0 m sa svake strane, promjenljive debljine od 25 do 60 cm.

Rasponska konstrukcija je kruto vezana za srednje stubove. Zbog relaksacije temperaturnih i seizmičkih uticaja i vremenski zavisnih deformacija betona, na oporcima su postavljena lončasta ležišta pomjerljiva u podužnom pravcu.

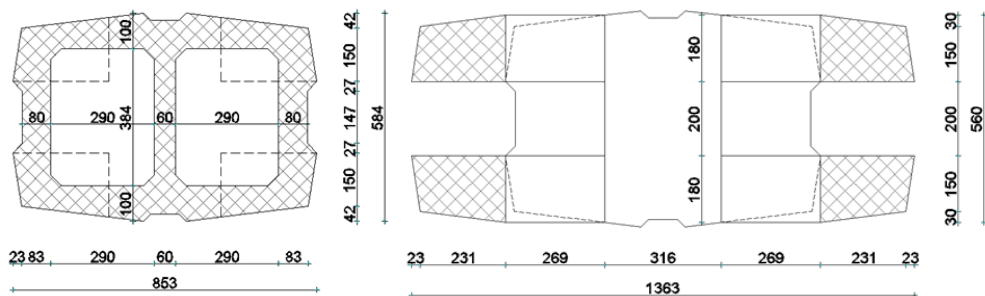


Slika 2: Karakterističan poprečni presjek rasponske konstrukcije mosta iznad stuba



Slika 3: Karakterističan poprečni presjek rasponske konstrukcije mosta u sredini raspona

Srednji stubovi su projektovani promjenljivog poprečnog presjeka, kao jednodjelni i sandučasti, i kao dvodjelni i u obliku račve (slika 4). Visine stubova od temelja do rasponske konstrukcije za stubove S1 i S2 iznosi 40 m, dok za stub S3 iznosi 52 m. Visina dvodjelnog dijela stuba, u obliku račve, promjenljivog poprečnog presjeka je 13.47 m od dna rasponske konstrukcije kod svih stubova. Dvodjelni presjek, preko krutog elementa stuba visine 2.4 m, prelazi u jednodjelni presjek u donjem dijelu stuba, sve do temelja.



Slika 4: Karakteristični poprečni presjeci stuba mosta – jednodjelnog (lijevo), na spoju sa temeljem, i dvodjelnog (desno), na spoju sa rasponskom konstrukcijom

Fundiranje stuba mosta S1 je izvršeno na temelju samcu dimenzija u osnovi 14x18 m, dok je fundiranje stubova S2 i S3 izvršeno na 12 šipova prečnika Ø150, dužine 25 m, za stub S2, i dužine 14 m, za stub S3, sve u skladu sa preporukama i podacima iz geotehničkog elaborata. Na najvećoj površini, visina temelja iznosi 4.0 m, dok na krajevima, visina temelja iznosi 2.0 m. Za stub S3 koji se jednim dijelom nalazi u koritu rijeke, sprovedene su mjere zaštite temelja od podlokavanja upotrebom kamene obloge D50 = 0.60 m.

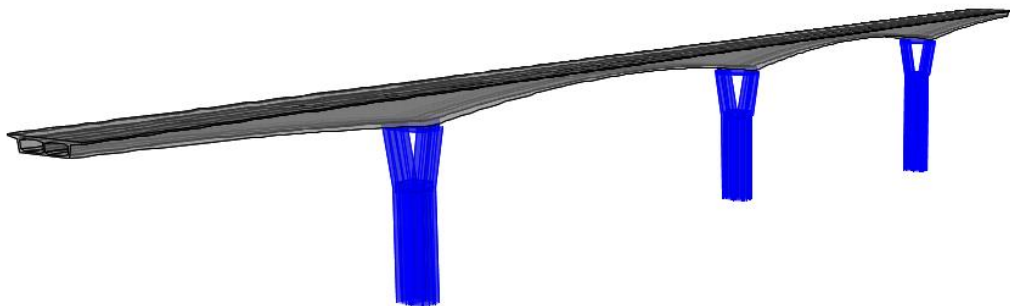
Obalni stubovi (oporci) su projektovani kao masivni elementi. Visina stuba oporaca, iznad temelja, je 4.5 m, za oporac O1, i 6.5 m, za oporac O2. Temelji oporaca su dimenzija 8.0x21.3x2.0 m. Nasip iza oporaca se zadržava preko krila, upravnih na stub, debljine 60 cm. U stubu oporaca je formirana komora za kontrolu oslanjanja i pregled dilatacije sa donje strane. Lončasta ležišta na oporcima se oslanjaju na AB ležišne kvadere dimenzija 80x80x70 cm.

Na početku i kraju mosta, na vezi oporaca i rasponske konstrukcije, projektovane su vodonepropusne visokokvalitetne čelične dilatacione spojnice za slobodna pomjeranja do 500 mm. Ograda mosta u zoni ivičnih vijenaca, izvedenih na konzolama rasponske konstrukcije, formirana je od masivne betonske sigurnosne ograde nivoa zaštite H2-W2, sa hladno oblikovanim cjevastim profilima duž gornje ivice.

Kolovozna površina zaštićena je savremenim hidroizolacionim sistemom na bazi bitumenskih traka, dok su unutrašnje površine oporaca u zoni kontakta sa nasipom zaštićene bitumenskim premazom. Sistem odvodnjavanja obuhvata mostovske slivnike i cjevovodni sistem za prikupljanje i odvođenje vode do zatvorenog sistema za prečišćavanje.

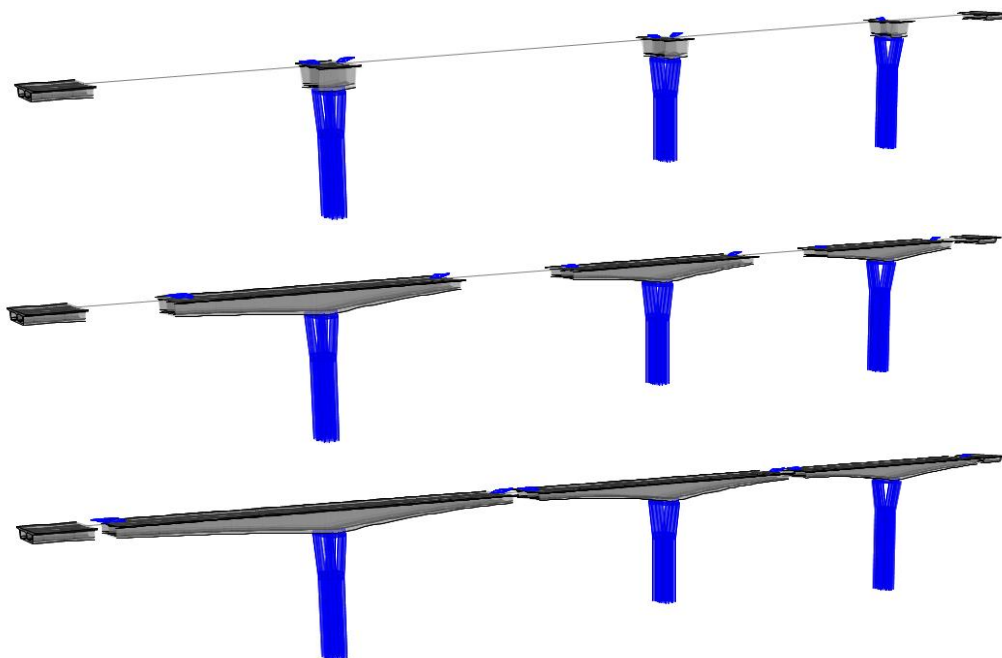
3. PRORAČUN KONSTRUKCIJE MOSTA

Na osnovu usvojene geometrije mosta formiran je numerički proračunski model primjenom konačnih elemenata u programskom paketu CSiBridge (slika 5). Analiza konstrukcije sprovedena je u skladu sa važećim crnogorskim standardima MEST EN [2] [3] [4] [5] [6] [7], uz obuhvatanje osnovnih, promjenljivih i seizmičkih dejstava i odgovarajućih kombinacija dejstava.

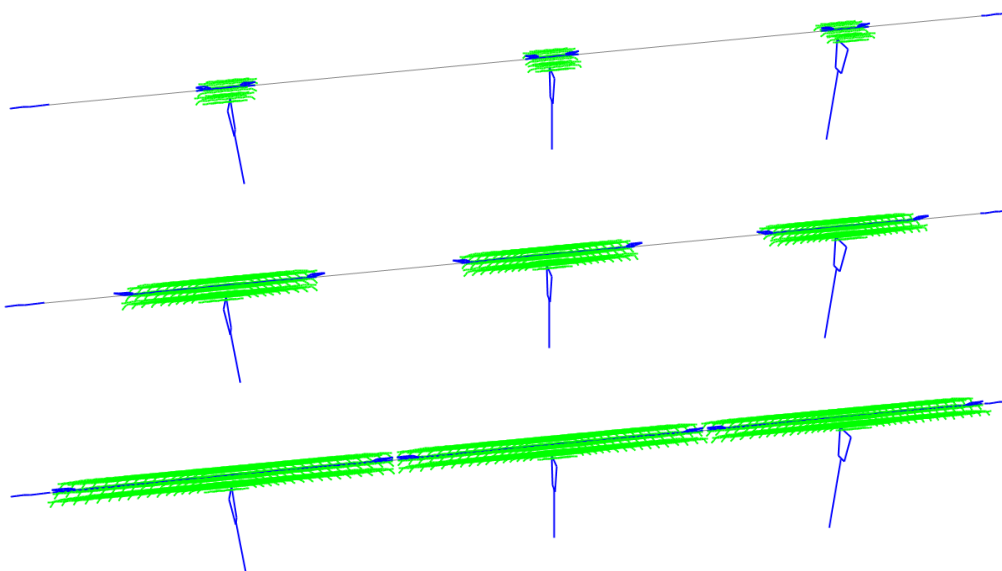


Slika 5: Proračunski 3D model mosta formiran u CSiBridge

Kako je izgradnja rasponske konstrukcije predviđena metodom uravnotežene slobodne konzolne gradnje, simetričnim napredovanjem konzola sa srednjih stubova u 17 segmenata lijevo i desno od svakog stuba po dužinama $6 \times 3 \text{ m} + 6 \times 3.75 \text{ m} + 5 \times 4.5 \text{ m}$ (slika 6), nakon izvođenja svakog segmenta i dostizanja zahtijevane čvrstoće betona, vrši se sukcesivno prednaprezanje pripadajućih kablova za konzolnu gradnju. Usvojena je višestruko kombinovana linearna i parabolična trasa kablova duž segmenata, koji se fazno aktiviraju u skladu sa napredovanjem konzole (slika 7), čime se obezbjeđuju potrebna nosivost i stabilnost konstrukcije tokom izgradnje.

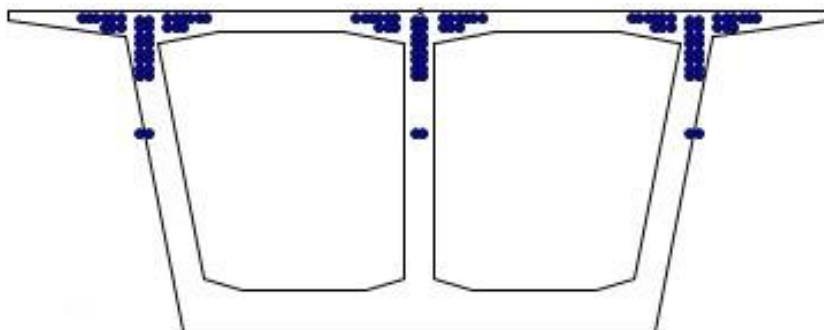


Slika 6: Karakteristične faze izgradnje rasponske konstrukcije mosta

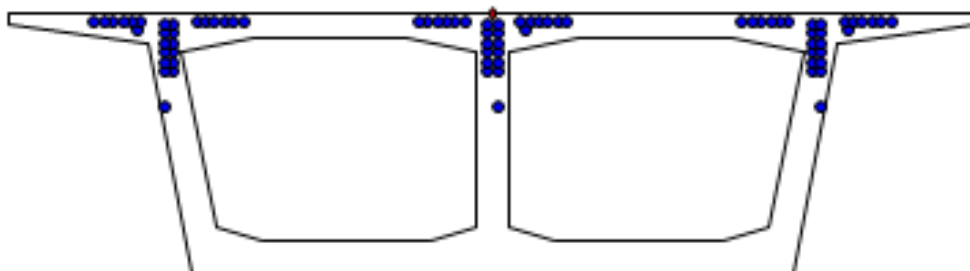


Slika 7: Trasa kablova kroz karakteristične faze izgradnje rasponske konstrukcije mosta

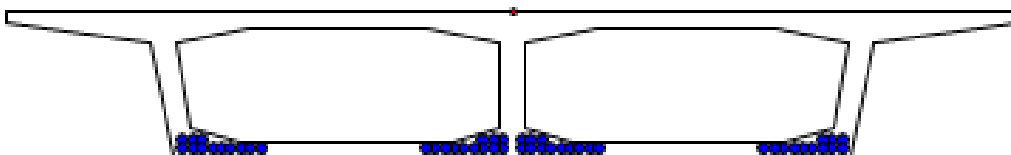
Rasponska konstrukcija je prethodno napregnuta kablovima tri osnovna tipa, raspoređenim u rebrima, gornjoj i donjoj ploči sandučastog presjeka, klase čelika 1670/1860 MPa. U gornjoj ploči i rebrima primijenjeni su kablovi sa 19 užadi $\varnothing 15.7$ mm (slike 8 i 9), dok su u donjoj ploči, za sve rasponse, primijenjeni kablovi sa 15 užadi $\varnothing 15.7$ mm (slika 10). Nakon spajanja susjednih konzola izvođenjem zatvarajućih segmenata, aktiviraju se kablovi u donjoj zoni rasponske konstrukcije, koji u konačnom stanju obezbjeđuju potrebnu nosivost za pozitivne momente u rasponima i doprinose kontinualnom djelovanju rasponske konstrukcije mosta.



Slika 8: Šematski raspored kablova iznad oslonca u gornjoj ploči i u rebru (19Ø15.7)



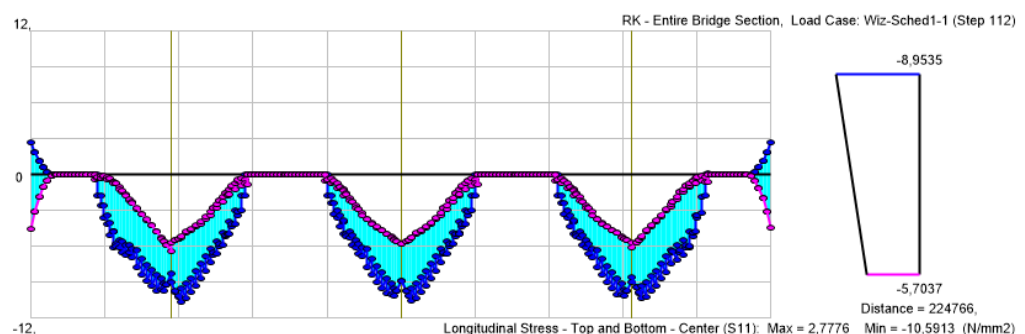
Slika 9: Šematski raspored kablova u 5. segmentu u gornjoj ploči i u rebru (19Ø15.7)



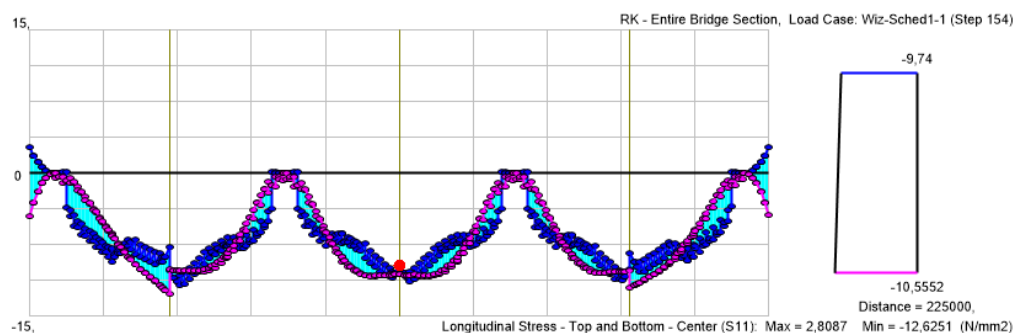
Slika 10: Šematski raspored kablova u donjoj ploči u sredini srednjeg raspona (15Ø15.7)

Proračunskim modelom obuhvaćeni su uticaji fazne izgradnje i vremenski zavisnih deformacija betona, pri čemu su promjene čvrstoće betona i modula elastičnosti, kao i efekti tečenja i skupljanja, modelirani odgovarajućim funkcijama zavisnosti od vremena, u skladu sa [4]. Analizom svih faza izgradnje i mjerodavnih kombinacija dejstava izvršena je provjera naponskog i deformacionog stanja rasponske konstrukcije duž cijele njene geometrije. Dobijeni rezultati potvrđuju da naponi u karakterističnim presjecima ostaju u okviru propisanih granica, dok su registrovane deformacije u dozvoljenim vrijednostima. Geometrija rasponske konstrukcije tokom izvođenja kontroliše se odgovarajućim podešavanjem nadvišenja oplata, čime se obezbjeđuje projektovani oblik konstrukcije u konačnom stanju.

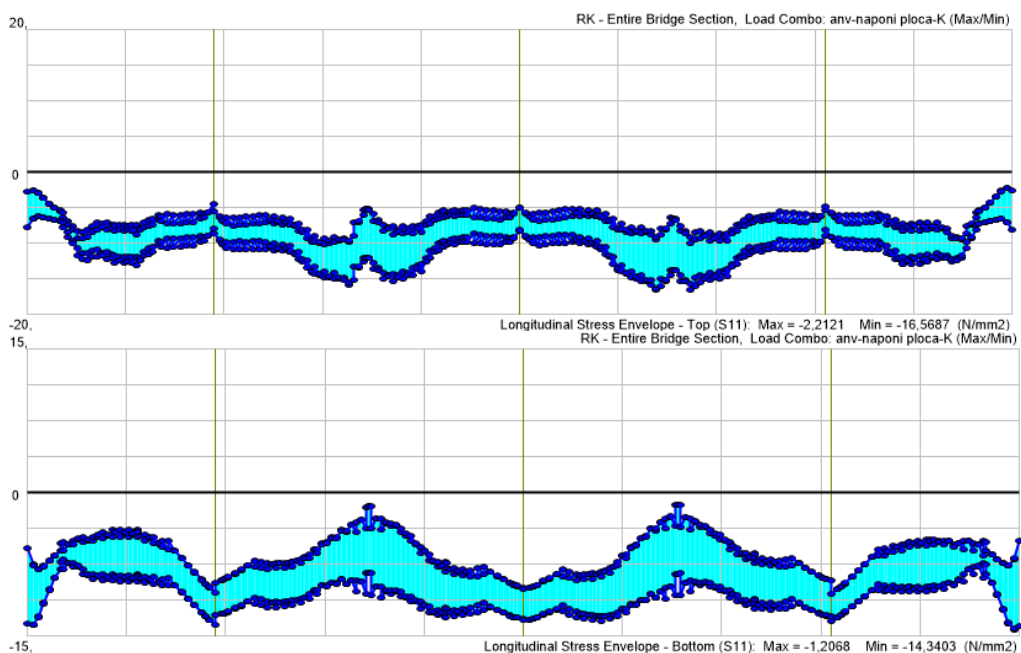
Na slikama 11 i 12 su prikazane vrijednosti napona za fazu izgradnje, dok su na slici 13 prikazane vrijednosti napona za fazu eksploatacije. U svim presjecima je obezbijeđeno trajno stanje pritiska, pri čemu su maksimalni proračunski naponi ograničeni na 27 MPa za karakterističnu, odnosno 20.25 MPa za kvazistalnu kombinaciju dejstava, za beton klase C45/55.



Slika 11: Karakteristični naponi u rasponskoj konstrukciji u fazi izgradnje



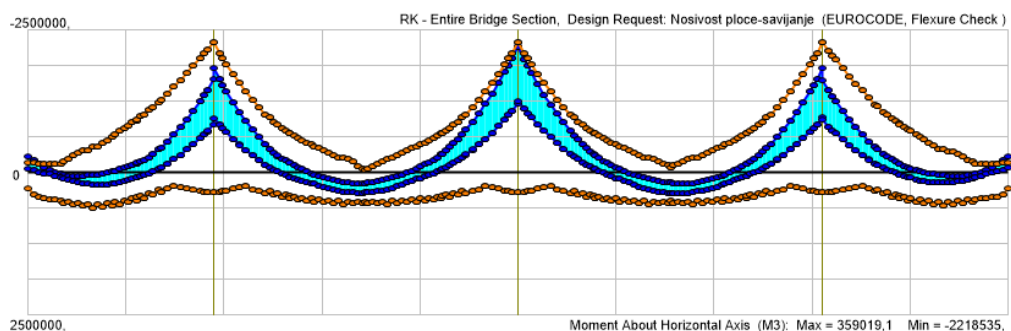
Slika 12: Naponi u rasponskoj konstrukciji prilikom izgradnje posljednjeg segmenta



Slika 13: Anvelopa napona na gornjoj i donjoj ivici rasponske konstrukcije u fazi eksploatacije za neseizmičku karakterističnu proračunsku situaciju

Provjera graničnih stanja nosivosti rasponske konstrukcije izvršena je za dominantna dejstva savijanja i smicanja. Na osnovu dobijenih anvelopa unutrašnjih sila i raspoložive nosivosti karakterističnih presjeka, izvršena je provjera duž cijele rasponske konstrukcije, za gornju i donju

zonu presjeka. U proračun nosivosti uključena je ukupna armatura, odnosno kablovi za prednaprezanje i meka armatura u gornjoj i donjoj zoni ploče. Rezultati analize potvrđuju da su zahtjevi u pogledu nosivosti na savijanje (slika 14) i smicanje ispunjeni u svim presjecima za mjerodavne kombinacije dejstava.



Slika 14: Anvelopa momenata savijanja za granično stanje nosivosti i nosivost presjeka duž rasponske konstrukcije mosta

Za seizmičko opterećenje usvojeni su projektni spektri prema MEST EN 1998-1 [5], sa prigušenjem od 5%, pri čemu je za povratni period $T = 95$ godina, koji odgovara maksimalnom ubrzanju tla $a_{95R} = 0.11g$, usvojen faktor ponašanja $q = 1.0$, dok je za povratni period $T = 475$ godina, sa maksimalnim ubrzanjem tla $a_{475R} = 0.243g$, usvojen faktor ponašanja $q = 1.5$.

Za usvojenu armaturu stubova sa procentom armiranja od 1.5% za donji-jednodjelni presjek, i procentom armiranja od cca 3.0% za gornji-dvodjelni presjek, kontrolisana je nosivost na savijanje i smicanje u neseizmičkim i seizmičkim proračunskim situacijama.

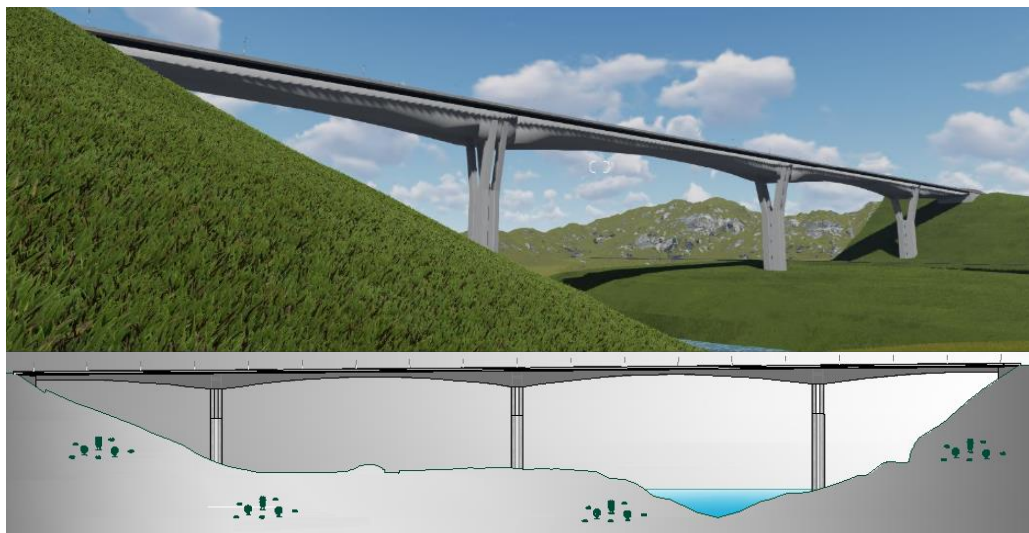
Proračun oporaca, temelja i temeljne konstrukcije na šipovima sproveden je uz interakciju sa tlom koje je modelirano elastičnim elementima odgovarajuće krutosti, u programskom paketu Tower 8. Izvršena je analiza nosivosti svih šipova.

4. TEHNOLOGIJA IZVOĐENJA MOSTA

Izgradnja mosta započinje izvođenjem bušenih šipova za temeljenje srednjih stubova, nakon čega se izvođe temelji i stubovi, uključujući oporce i srednje stubove. Izgradnja rasponske konstrukcije organizovana je primjenom tehnologije segmentne uravnotežene slobodne konzolne gradnje, sa istovremenim napredovanjem konzola u oba smjera od svakog srednjeg stuba. Nakon izvođenja osnovnog segmenta iznad stuba, na posebno formiranoj oplati i skeli, vrši se prednaprezanje pripadajućih kablova, nakon čega se uklanjaju početna skela i oplata i postavlja viseća mostovska skela sa oplatom – krletka. U nastavku se segmenti izvođe sukcesivno, pri čemu se u svakoj fazi u krletki postavljaju oplata i armatura, vrši betoniranje, a nakon dostizanja 70% projektovane čvrstoće betona prednapreže se 100% predviđenih kablova za dati segment. Po završetku ciklusa, krletka se pomjera u naredni položaj, gdje se postupak ponavlja do završetka konzole. Sa svakog srednjeg stuba izvodi se po 17 segmenata na obje strane, sa dužinama segmenata $6 \times 3 \text{ m} + 6 \times 3.75 \text{ m} + 5 \times 4.5 \text{ m}$. Viseća mostovska skela sa pripadajućom oplatom omogućava objedinjavanje svih ključnih operacija izgradnje segmenta – formiranje oplate, ugradnju armature, betoniranje i prednaprezanje. Nakon završetka konzolne gradnje pristupa se izvođenju zatvarajućih segmenata u sredinama raspona i u zonama krajnjih oslonaca, čime se ostvaruje konačna geometrija i kontinuitet rasponske konstrukcije.

Primijenjena tehnologija omogućava izvođenje jednog segmenta, odnosno kompletnog ciklusa gradnje, za približno četiri sedmice. Zahvaljujući sukcesivnom preklapanju pojedinih faza rada, kompletna rasponska konstrukcija mosta može se izvesti za približno 18 mjeseci, uz angažovanje šest kompleta viseće mostovske skele i oplate.

Rezultati 3D vizuelizacije mosta (slika 15) ukazuju na to da je objekat adekvatno uklopljen u postojeći ambijent, bez značajnijeg narušavanja prirodnih i vizuelnih karakteristika predmetne lokacije.



Slika 15: Izgled mosta Zeta

5. ZAKLJUČAK I DOPRINOS

Projektovanje mosta Zeta predstavlja primjer primjene savremenih proračunskih i konstruktivnih rješenja za savladavanje složenih prostornih, geometrijskih i tehnoloških zahtjeva pri realizaciji velikog prethodno napregnutog mosta metodom segmentne uravnotežene slobodne konzolne gradnje.

Investitor objekta je Vlada Crne Gore, odnosno državna kompanija «Monteput» zadužena za upravljanje, održavanje i razvoj putne infrastrukture od državnog značaja. Prvi autor ovog rada je angažovan od strane firme «CDS Project» iz Podgorice, i odradio je kompletan proračun konstrukcije mosta. Drugi autor rada je odgovorni projektant mosta koji je uradio idejno rješenje. Treći i četvrti autor rada su odradili kompletnu grafičku dokumentaciju mosta.

REFERENCE

- [1] Ulićević M., Baša N., Božović M., Kandić S.: Građevinski projekat mosta Zeta, decembar 2025.
- [2] MEST EN 1991-2: Eurokod 1 - Dejstva na konstrukcije – Dio 2: Saobraćajno opterećenje na mostovima
- [3] MEST EN 1992-1: Eurokod 2 - Projektovanje betonskih konstrukcija – Opšta pravila i pravila za zgrade
- [4] MEST EN 1992-2: Eurokod 2 - Projektovanje betonskih konstrukcija - Betonski mostovi - Pravila projektovanja i izrada detalja.
- [5] MEST EN 1998-1: Eurokod 8: Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija - Dio 1: Opšta pravila, seizmička dejstva i pravila za zgrade
- [6] MEST EN 1998-2: Eurokod 8: Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija - Dio 2: Mostovi
- [7] MEST EN 1998-5: Eurokod 8: Projektovanje seizmički otpornih konstrukcija - Dio 5: Temelji, potporne konstrukcije i geotehnički aspekti