

PROJEKAT PRETHODNO NAPREGNUTOG ARMIRANOBETONSKOG MOSTA  
DESIGN OF POST-TENSIONED REINFORCED CONCRETE BRIDGE

Luka Tanasijević, Igor Džolev, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – GRAĐEVINARSTVO

**Kratak sadržaj** – U ovom radu prikazana je analiza prethodno napregnutog armiranobetonskog mosta, koji se izvodi metodom postepenog potiskivanja. Faza potiskivanja i faza eksploatacije mosta se posmatraju zasebno. Most je statičkog sistema kontinualne grede, a rasponska konstrukcija se na stubove oslanja preko elastomernih ležišta. Sproveden je statički proračun, dimenzionisanje i usvajanje armature. Obzirom da se most nalazi u području veoma visoke seizmičke aktivnosti, upotreba seizmičkih izolatora je neophodna.

**Ključne reči:** beton, prethodno naprezanje, most, seizmički izolatori, statički proračun, dimenzionisanje.

**Abstract** – In this paper a design of post-tensioned reinforced concrete bridge is presented. Bridge is constructed using incremental launching method. Launching and exploitation phase are observed separately. The bridge is continuous beam static system, with deck supported on elastomeric bearings, which are resting on pier heads. Static analysis, design and adopting reinforcement are provided. Since the bridge location site has very high seismic activity, use of seismic isolators is necessary.

**Keywords:** concrete, post-tensioning, bridge, seismic isolators, static analysis, design.

1. UVOD

Vijadukt K13 se nalazi u Azerbejdžanu, u oblasti Nagorno-Karabag (Nagorno-Karabakh) na dionici za koju je planirano da spaja gradove Kelbedžer (Kalbajar) i Lačin (Lachin) u Azerbejdžanu.

2. METODA POSTEPENOG POTISKIVANJA

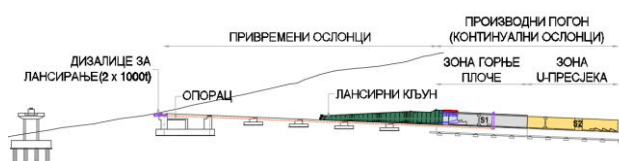
2.1. Opšte o metodi

Metoda postepenog potiskivanja (eng. incremental launching method) je metoda izgradnje gdje se segmenti mosta izrađuju (liju) iza jednog od oporaca, a potom se potiskuju unaprijed, čime se oslobađa prostor za izradu narednog segmenta.

Iza jednog od oporaca, osposobljava se proizvodni pogon (eng. precast yard), gdje se segmenti rasponske konstrukcije (RK) izrađuju jedan po jedan. Segmenti se prednaprežu i nakon očvršćavanja betona, most se potiskuje unaprijed za dužinu jednog segmenta.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Igor Džolev, vanr. prof.



Slika 1. Proizvodni pogon – podužni presjek

Jedna od velikih prednosti metode je što nije potrebna ni skela ni potpora za izgradnju RK. Tako most može da pređe preko prepreka kao što su rijeke, zgrade, željeznice itd., bez ometanja funkcionalnosti okruženja. Druga velika prednost je što ova metoda ne zavisi u potpunosti od vremenskih uslova, jer se proizvodni pogon može natkriti i zaštititi, te se izrada segmenata i njihovo prednaprezanje, može odvijati nesmetano. Materijal i oprema se dopremaju samo na jedno mjesto – proizvodni pogon, što znatno olakšava i ubrzava proces izgradnje.

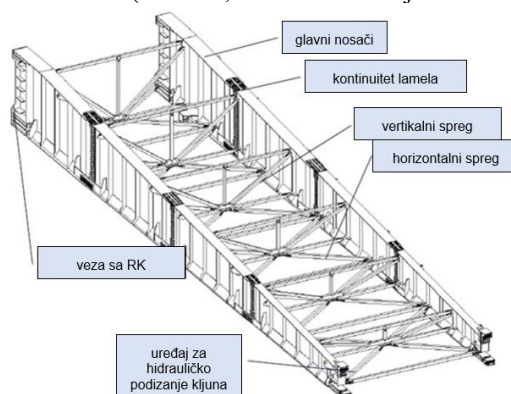
Mana ove metode je što se stvaraju dodatni troškovi za prese za lansiranje, izradu lansirnog kljuna, dodatno prednaprezanje, izgradnju samog pogona za prefabrikaciju kao i povećanje poprečnog presjeka mosta kako bi mogao da primi dodatne napone usled lansiranja.

2.2. Oprema za metodu

Kao što je već napomenuto u prethodnom poglavlju, ova metoda iziskuje dodatne troškove za opremu koja je potrebna za njeno primjenjivanje. U osnovnu opremu metode spadaju:

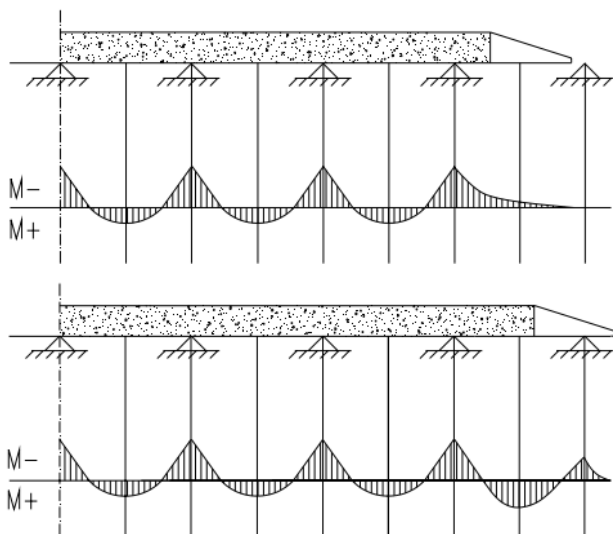
- lansirni kljun,
- privremena ležišta na stubovima i oporcima,
- užad, grede i hidraulične prese za povlačenje RK.

Lansirni kljun se obično izrađuje od čelika i glavna uloga mu je da smanji momente savijanja u RK koji se javljaju prilikom lansiranja. U toku lansiranja, RK prolazi kroz niz statičkih sistema (konzola, slobodno oslonjen nosač i, na



Slika 2. Lansirni kljun – osnovni elementi

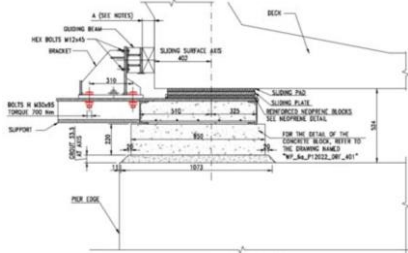
kraju, kontinualni nosač) i pritom se mogu javiti veliki negativni (ali i pozitivni) momenti savijanja.



Slika 3. Momenti savijanja u toku lansiranja [3]

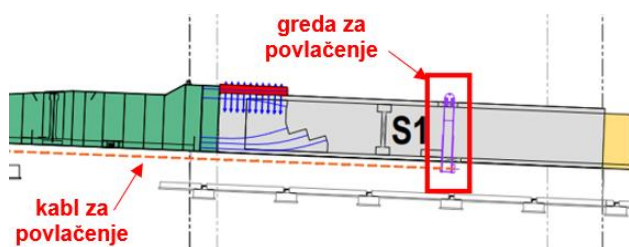
Optimalna dužina kljuna je od 60% do 100% od maksimalnog raspona mosta.

Privremena ležišta su ležišta koja omogućavaju klizanje RK sa niskim koeficijentom trenja, preko stubova i oporaca. Nakon što se potiskivanje mosta obavi u potpunosti, tj. kada most zauzme svoj projektovani položaj, privremena ležišta se zamjenjuju trajnim.



Slika 4. Privremeno ležište

Grede za povlačenje RK su obično od čelika i postavljaju se tako da prolaze kroz unaprijed predviđene rupe u gornjoj i donjoj ploči RK. Na donjem dijelu ovih greda nalazi se kabl za prednaprezanje, koji je spojen sa hidrauličnom presom za povlačenje RK, koja je postavljena na oporcju.



Slika 5. Grede za povlačenje RK

### 3. TEHNIČKI OPIS

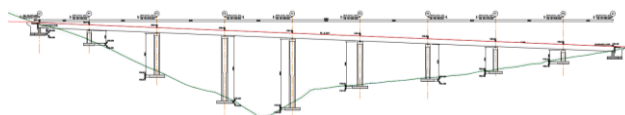
#### 3.1. Dispozicija

Vijadukt K13 se izvodi metodom postepenog potiskivanja. Sastoji se od rasponske konstrukcije, stubova i oporaca. RK vijadukta je prednapregnuti armiranobetonski, sandučasti presjek visine 4.3 m, koja se

oslanja na osam betonskih stubova kutijastog porečnog presjeka dimenzija 7.5 m\*5 m, sa visinama: (P1)10.10 m, (P2)35.58 m, (P3)56.10 m, (P4)59.6 m, (P5)38.10 m, (P6)29.40 m, (P7)20.20 m, (P8)9.10 m, a oni na betonsku ploču – glavu šipova debljine 2.5 m i različitih dimenzija u osnovi za pojedine stubove.

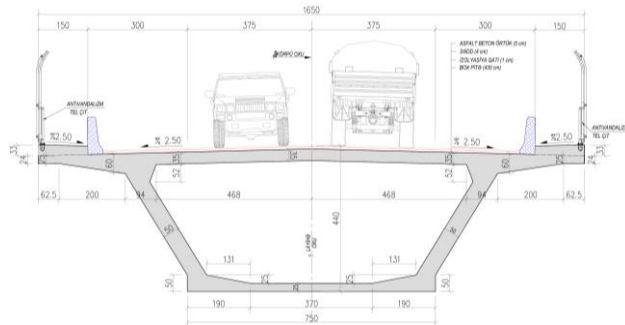
Tabela 1. Osnovne geometrijske karakteristike vijadukta

Vijadukt	Raspon	Širina RK	Ukupna dužina
K13	2*44 m+7*60 m	16.50 m	508 m



Slika 6. Dispozicija - podužni presjek

Širina karakterističnog poprečnog presjeka vijadukta iznosi 16.50 m. Poprečni presjek se sastoji iz 2 pješačke staze širine 1.5 m i kolovoza širine 2\*3.75 m+2\*3.0 m. Kolovoz je od pješačkih staza fizički odvojen betonskim barijerama, dok su pješačke staze, sa druge strane, obezbijedene metalnim ogradama. Poprečni pad kolovoza i pješačkih staza iznosi 2.50%. Pješačke staze su prefabrikovani betonski elementi, koji se nakon završenog potiskivanja ugrađuju. Dužina konzolnog prepusta, na kojem se nalaze pješačke staze, iznosi 2625 mm. Debljina gornje ploče u sredini iznosi 350 mm, a na krajevima 250 mm, sa zadebljanjima na spoju sa rebrima. Debljina rebara je konstantna i iznosi 500 mm. Debljina donje ploče je 250 mm, takođe sa zadebljanjima na spoju sa rebrima. Širina donje ploče iznosi 7500 mm.



Slika 7. Karakteristični poprečni presjek vijadukta K13

#### 3.2. Kriterijumi projektovanja

Za potrebe globalne statičke analize, RK je modelirana koristeći softverski paket Midas Civil, gdje su razvijena tri zasebna numerička modela, a to su:

- Eksploatacioni model
- Modeli za početne faze lansiranja
- Model za karakteristični ciklus lansiranja

Za podužnu analizu mosta primjenjuju se isključivo linijski modeli.

#### 3.3. Materijali

Beton RK je usvojen tako da ima čvrstoću na pritisak 45 MPa, modul elastičnosti 36.9 GPa i zaštitni sloj 50 mm, dok je čelik za armiranje klase B500B, modula elastičnosti 200 GPa, a maksimalni prečnik šipke iznosi

32 mm. Čelik za prednaprezanje će biti opisan u zasebnom poglavlju.

### 3.4. Oslonci

Kao oslonci RK na stubove, primjenjuju se elastomerna ležišta, dok se za seizmičku izolaciju mosta koriste damperi. U nastavku je prikazan aranžman ležišta i seizmičkih izolatora:

Tabela 2. Ležišta i seizmički izolatori

Pozicija	Elastomerna ležišta	Damperi	Lončasta ležišta
Oporac 0	2	10 podužno	-
Stub 1	2	2 poprečno	-
Stub 2	2	2 poprečno	-
Stub 3	-	-	2
Stub 4	-	-	2
Stub 5	2	2 poprečno	-
Stub 6	2	2 poprečno	-
Stub 7	2	2 poprečno	-
Stub 8	2	2 poprečno	-
Oporac 9	2	10 podužno	-

## 4. ANALIZA OPTEREĆENJA

Stalno opterećenje čini samo sopstvena težina konstrukcije (RK, dijafragme stubova i oporaca, devijatori) i ona se automatski uzima u obzir u softveru.

Dodatno stalno opterećenje je nanijeto kao linijsko na elemente RK i podrazumijeva težinu asfalta, hidroizolacije, pješačkih staza, rukohvata, drenaže i barijera.

Saobraćajno opterećenje je sračunato prema [1], poglavlje 3.6 i razmatrana su vozila „HL-93 Design Truck“ i „HL-93 Design Tandem“ (sistem vezanih koncentrisanih sila), u kombinaciji sa „Design Lane“ (linijsko raspodijeljeno opterećenje). Pored standardnih AASHTO vozila, korišćena su i „SNIIP A15 Design Truck“ i „NK100 – overload“ (sistem vezanih koncentrisanih sila). Uz primjenu uticajnih linija, softver automatski uzima u obzir najnepovoljniji položaj vozila. Pješačko opterećenje je takođe razmatrano u skladu sa [1].

Skupljanje i tečenje betona je sračunato u skladu sa [2]. Efekti skupljanja i tečenja su automatski sračunati u softveru, a korišćeni su sledeći parametri: procenat relativne vlažnosti (70%), cement sa normalnim priraštajem čvrstoće, nominalna dimenzija poprečnog presjeka ( $h_0$ ), starost betona kada započinje skupljanje (3 dana), karakteristična čvrstoća betona na pritisak nakon 28 dana (45 MPa).

Temperaturno opterećenje je sračunato prema [1], poglavlje 3.12 i razmatraju se ravnomjerno termičko dejstvo i temperaturni gradijent.

Neravnomjerna (diferencijalna) slijeganja se razmatraju u fazi eksploatacije i u toku lansiranja i prema [1], poglavlje 5.12.5.4.6.b, iznose 10 mm.

Opterećenje vjetrom je sračunato prema [1], poglavlje 3.8 i razrađeno je horizontalno i vertikalno dejstvo vjetra,

kako na konstrukciju mosta, tako i na saobraćajno opterećenje.

Seizmičko opterećenje je sračunato u skladu sa azerbejdžanskim standardom, koji je mjerodavan za seizmičko opterećenje u Azerbejdžanu [4]. Razmatraće se samo horizontalno seizmičko dejstvo. U korišćenom softveru, zadaje se funkcija projektnog spektra odgovora, koja zavisi od lokacije objekta, tipa tla i tipa konstrukcije.

### 4.1. Prednaprezanje

Prednaprežanjem se suprotstavljamo momentima savijanja koji se javljaju u toku lansiranja, kao i onim u toku eksploatacije. U toku lansiranja, svaki presjek RK će imati potrebu za prednaprežanjem, jer će biti izložen kako pozitivnim, tako i negativnim momentima savijanja.

Naknadno prednaprežanje može biti unutrašnje i spoljašnje. Nerijetko se primjenjuje kombinacija unutrašnjeg i spoljašnjeg prednaprežanja, za postizanje maksimalne učinkovitosti, što je ovde i slučaj.

Čelik za prednaprežanje je usvojen da bude u skladu sa EN 10138-3, gdje se užadi sastoje od 7 žica, klase niske relaksacije, sa sledećim karakteristikama:

- Nazivni prečnik užeta: 15.7 mm
- Nazivna površina užeta: 150 mm<sup>2</sup>
- Nazivna masa užeta: 1.172 kg\*m<sup>-1</sup>
- Karakteristična prekidna sila: 279 kN
- Jungov modul elastičnosti: 195 GPa
- Zatezna čvrstoća: 1860 MPa
- Karakteristični napon na 0.1% granice elastičnosti: 1640 MPa

Usvojeno je da je procenat utezanja 75%, pa je sila utezanja kablova jednaka:

$$F_j = 0.75 * n_{užadi} * f_{pu} * A_p \quad (1)$$

$$F_j = 0.75 * 22 * 1860 \text{ MPa} * 150 \text{ mm}^2$$

$$F_j = 4604 \text{ kN}$$

Tabela 3. Grupe kablova za prednaprezanje

Grupa	Anker blok	Broj užadi	Procenat utezanja kabla	Sila utezanja po kablju	Kraj utezanja
Spoljašnji trajni kablovi za fazu lansiranja i eksploatacije	22C15	22	75%	4604 kN	Na lijevom kraju
Privremeni spoljašnji antagonisti kablovi za fazu lansiranja	22C15	22	75%	4604 kN	Na lijevom kraju
Privremeni dodatni spoljašnji kablovi u gornjoj zoni za fazu lansiranja	22C15	22	75%	4604 kN	Na lijevom kraju
Trajni unutrašnji kablovi u gornjoj ploči	22C15	22	75%	4604 kN	Na lijevom kraju
Trajni unutrašnji kablovi u donjoj ploči	22C15	22	75%	4604 kN	Na lijevom kraju

### 4.2. Modalna analiza

Ulazni parametri za modalnu analizu podrazumijevaju odabir slučajeva opterećenja koji učestvuju u analizi, pretvaranje (konvertovanje) opterećenja u mase, kao i zadavanje vrijednosti prigušenja. Za pretvaranje opterećenja u mase, uzeti su u obzir samo slučajevi stalnog opterećenja: dijafragme iznad stubova i oporaca i dodatno stalno opterećenje.

Nakon sprovedene modalne analize mosta, dobijeni su sledeći rezultati:

- Za element/zonu u kojoj se nalaze samo kablovi za prednaprezanja bez spoja: bez zatezanja

Tabela 4 – Rezultati modalne analize

MODALNA ANALIZA			
TON	Frekvencija		Period
	(rad/sec)	(cycle/sec)	(sec)
1	3.172	0.505	1.981
2	3.854	0.613	1.630
3	3.992	0.635	1.574
4	5.580	0.888	1.126
5	8.540	1.359	0.736
6	12.252	1.950	0.513
7	14.630	2.328	0.429
8	15.247	2.427	0.412
9	15.369	2.446	0.409
10	16.390	2.609	0.383

## 5. STATIČKI PRORAČUN

Za potrebe dobijanja globalnih uticaja u glavnim elementima mosta, numerički model konstrukcije je kreiran u softverskom paketu Midas Civil i on sadrži:

- rasponsku konstrukciju
- stubove
- lansirni kljun (samo u modelima za analizu lansiranja)

Za modeliranje su korišćeni linijski (gredni) elementi, linkovi i tačkasti oslonci. Linijski elementi služili su za modeliranje elemenata – RK i stubova, dok su linkovi korišćeni za vezu RK i naglavnih greda stubova. Uz pomoć linkova, modelirani su i podužni i poprečni stoper, te seizmički uređaji na oporcima – damperi.

Analiza lansiranja će biti sprovedena modeliranjem samo RK, lansirnog kljuna i tačkastih oslonaca, čiji se položaj mijenja u toku lansiranja. Kontrolisaće se kritični položaji RK, na primjer maksimalni negativni, maksimalni pozitivni moment itd. ali i kritični trenuci, na primjer utezanje kablova na prvoj dijafragmi stuba, drugoj dijafragmi stuba itd.

### 5.1. Dozvoljeni naponi u betonu za fazu eksploatacije

U eksploataciji, dozvoljeni naponi pritiska i zatezanja u betonu za prednapregnute elemente su u skladu sa [1], poglavlje 5.9.2.3.2:

- Maksimalni napon pritiska usled efektivnog prednaprezanja i stalnog opterećenja:

$$0.45 * f'_c = 20.25MPa \quad (2)$$

- Maksimalni napon pritiska usled efektivnog prednaprezanja, stalnog i prolaznog opterećenja:

$$0.60 * \varphi_w * f'_c = 27MPa \quad (3)$$

- Maksimalni napon zatezanja (Service III):

- U zonama spojeva:
$$0.25\lambda\sqrt{f'_c} = 1.68MPa \quad (4)$$

- Ostale zone:

$$0.5\lambda\sqrt{f'_c} = 3.35MPa \quad (5)$$

## 5.2. Dimenzionisanje

Elementi mosta se dimenzionišu prema граниčnom stanju nosivosti i to na osnovu maksimalnih uticaja dobijenih u softveru. Proračun savojne, smičuće i kombinovane smičuće i torzione otpornosti prednaprnutog sandučastog betonskog presjeka, je skladu sa [1], poglavlje 5.6.3.1.2, 5.8 i 5.12.5.3.8.

## 6. ZAKLJUČAK

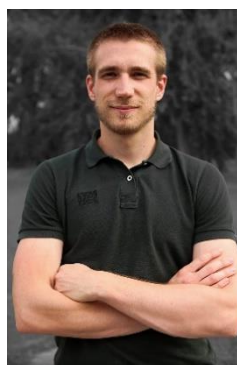
Ova metoda gradnje je prilično industrijalizovana, jer se oplata može ponovo koristiti i stoga je potreban manji utrošak rada. Takođe, privremeni stubovi, ležišta i lansirni kljun se, nakon završenog rada, mogu ponovo iskoristiti na narednim projektima, ako to uslovi dozvole.

Optimalna dužina kljuna je, kako je već rečeno, od 60% do 100% maksimalnog raspona mosta. Ukoliko se koristi kljun manje dužine, konzolni momenti savijanja će se povećati, što izaziva veću potrebu za centričnim prednaprezanjem. Ako se primjenjuje velika količina kablova za prednaprezanje, problemi se mogu javiti oko raspoređivanja kablova unutar poprečnog presjeka mosta. Pored toga, velika količina kablova za prednaprezanje bi izazvala velike napone pritiska u RK, što može biti kritično sa stanovišta čvrstoće betona na pritisak. Sa druge strane, veća dužina kljuna će smanjiti konzolne momente savijanja ali neće toliko uticati na cijenu prednaprezanja koliko bi koštala izrada dužeg kljuna. Dakle, primjena ove metode je u velikom broju slučajeva opravdana.

## 7. LITERATURA

- [1] AASHTO LRFD 8th Edition: Bridge Design Specifications 2017.
- [2] CEB-FIP Model Code 1990: Design Code, 1990.
- [3] Incremental launching versus scaffolding for construction of prestressed concrete bridges, Chalmers University of Technology, 2005.
- [4] AzDTN 2.3-1, "Construction in Seismic Regions", State of the Republic of Azerbaijan, Baku, 2010.

### Kratka biografija:



**Luka Tanasijević** rođen je u Zvorniku 1999. god. Oktobra 2018. upisuje studijski program Građevinarstvo na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Oktobra 2022. god. stiče zvanje diplomiranog inženjera građevinarstva. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Projektovanja betonskih mostova odbranio je 2024. godine. kontakt: luka.tanasijevic@outlook.com