

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

Marino Jurišić

**Utjecaji faza gradnje na naprezanja u betonu i kablovima za prednapinjanje, te
na progibe pojedinih segmenata kod mostova građenih slobodno konzolnim
načinom gradnje**

Split, prosinac 2021.

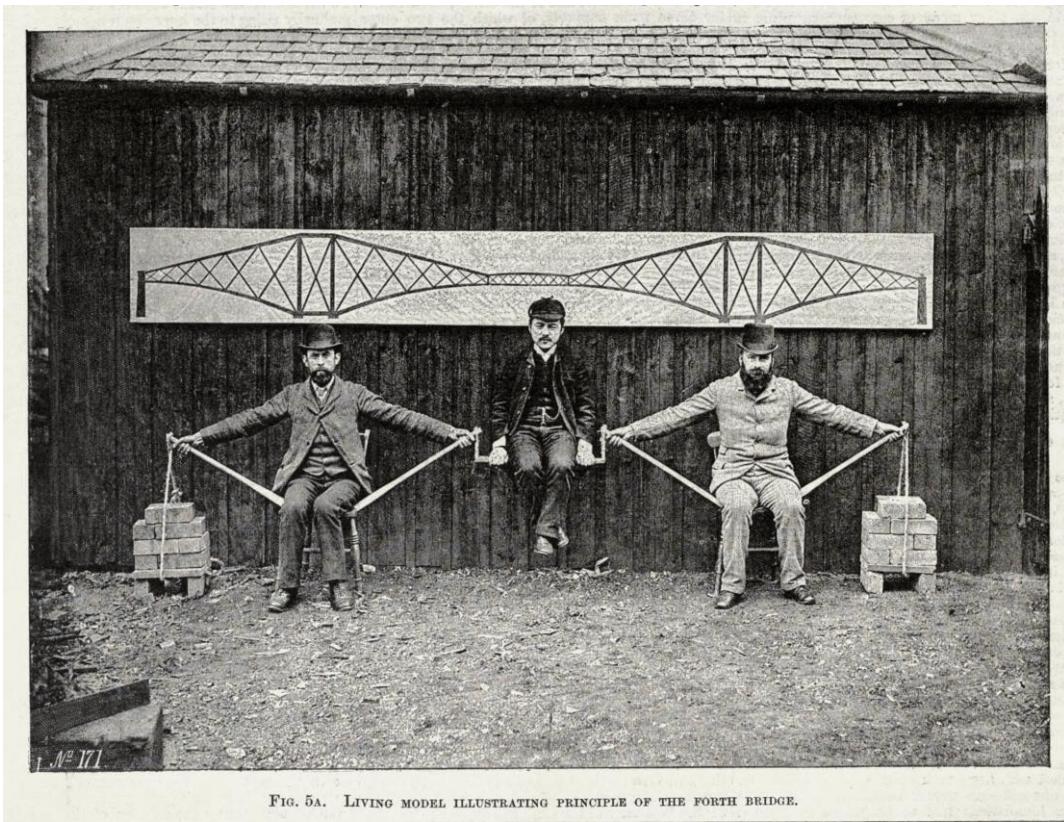
1. Uvod

Slobodno konzolna gradnja je postupak izrade rasponske konstrukcije mosta kroz slijed segmenata kod kojeg svaki izgrađeni segment nosi težinu idućeg segmenta i u nekim slučajevima težinu skele ili proizvodnog pogona. Ovi mostovi ranije su se radili skoro isključivo od čelika, dok se sada često koristi prednapeti beton sa rasponskom konstrukcijom sandučastog presjeka i promjenjive visine. Svaki dio ili segment integrira se u rasponsku konstrukciju neposredno po postizanju dovoljne čvrstoće pri čemu postaje nosivi dio konstrukcije i postaje polazna točka za daljnje napredovanje. U slučaju prednapetih betonskih mostova stabilnost konzole u svakoj fazi izgradnje osigurana je kablovima od prednapetog čelika u gornjoj zoni rasponske konstrukcije kojima se dužina povećava sa rasponskom konstrukcijom. Segmenti mogu biti betonirani na licu mjesta na pokretnim skelama, a mogu biti i predgotovljeni, transportirani i postavljeni na mjesto pomoću posebnih dizalica [1].

1.1 Povijest konzolne gradnje

Konzolna gradnja konstrukcija je stara tehnika kojom se konstrukcija gradi dio po dio iznad tla. Od starih vremena ova metoda se koristila za izgradnju lukova u Europi i Južnoj Americi, kao i za gradnju drvenih mostova. U svojim pisanjima Cezar spominje radeve Gala koji su postavljali debla ortogonalno u horizontalnim redovima koji su se kasnije ispunjavali kamenim materijalom koji je služio kao balast. Slične konstrukcije izvodile su se i drugdje u svijetu, a neke se još uvijek mogu pronaći u Kini, Indiji i Tibetu. Američki inženjer Thomas Pope 1811. godine projektirao je drveni most raspona 550 m koji bi imao jako plitak luk naslonjen na dva zidana upornjaka iz kojih bi se gradio kao konzolna konstrukcija sastavljanjem predgotovljenih dijelova [2]. Inženjeri 19. stoljeća razumjeli su da u odnosu na prostu gredu, kontinuirani most preko više oslonaca ima povoljniju sliku naprezanja čime se mogu postići veći rasponi [3]. Heinrich Gerber bio je jedan od inženjera koji su patentirali zglob u polju grede preko više raspona i smatra se prvim koji je izradio takvu konstrukciju [4]. Zglob ovakav sustav pravi statički određenim što dovodi do toga da most može podnijeti diferencijalno slijeganje oslonaca bez parazitnih naprezanja u konstrukciji. Osim toga inženjeri su mogli lakše izračunati sile i napone u konstrukciji [3]. U 19. i 20. stoljeću metoda konzolne gradnje se primjenjuje pri izgradnji lučnih i rešetkastih metalnih mostova koji većinom slijede princip konzola sa upuštenim dijelom raspona. Most u Hassfurtu koji je dovršen 1867. smatra se prvim modernim konzolnim mostom sa glavnim rasponom dužine 38 m. Osim njega valja spomenuti mostove: High Bridge u Kentucky-ju dovršen 1877., željeznički most preko Niagare dovršen 1883., most u Poughkeepsie-ju dovršen 1889., i najpoznatiji rani konzolni most Forth u Škotskoj koji je dovršen 1890. i koji je 29 godina držao rekord najdužeg raspona na svijetu (518.16 m). Jedan od projektanata mosta Forth, Benjamin Baker, demonstrirao je statički princip mosta koji ima srednji dio raspona dodan na konzolne dijelove (Slika 1).

Ovaj zglobno vezani srednji raspon predstavlja čovjek koji sjedi u sredini. Da bi se primile tlačne sile u donjem pojusu konzola koriste se drveni štapovi, dok ruke predstavljaju zategnuti gornji pojus. Tegovi na rubovima predstavljaju protutegove upornjaka koji drže središnji upušteni raspon [5].



Slika 1 – Ilustracija statičkog principa mosta Forth

Pojavom armiranog betona počinje primjena ove metode na ovaj novi materijal. U 1928. godini Freyssinet je već radio na izradi segmenata lukova mosta Plougastel raspona 185 m. Ovi segmenti su imali veliki moment prevrtanja (47 000 kNm) zbog velike težine pokretne skele pri izgradnji. Da bi balansirao ovaj moment Freyssinet je osmislio sustav u kojem povezuje nasuprotne dijelove dva luka čeličnim kablovima i time napravio neku vrstu privremenog prednapinjanja. Ovi kablovi sastojali su se od žica i držali su se zategnuti presama postavljenima na privremenu skelu u osovini stupa. U obliku u kakvom postoji danas ova metoda se prvi put primjenjuje 1930. godine na mostu Herval preko rijeke Rio Peixe u Brazilu gdje su armaturne šipke nastavljane nazubljenim elementima. Caquot je projektirao most Donzere raspona 100 m u Francuskoj, ali ova tehnika nije puno razvijana na mostovima od armiranog betona zbog velike potrebne armature da se osiguraju konzole i širine pukotina u gornjoj zoni rasponske konstrukcije. Nakon razvitka prednapinjanja koje je prikladno za konzolnu gradnju dolazi do snažnog razvoja metode. Freyssinet je koristi 1945.-1950. za izgradnju mosta Luzancy, pet mostova preko rijeke Marne i vijadukta Caracas.

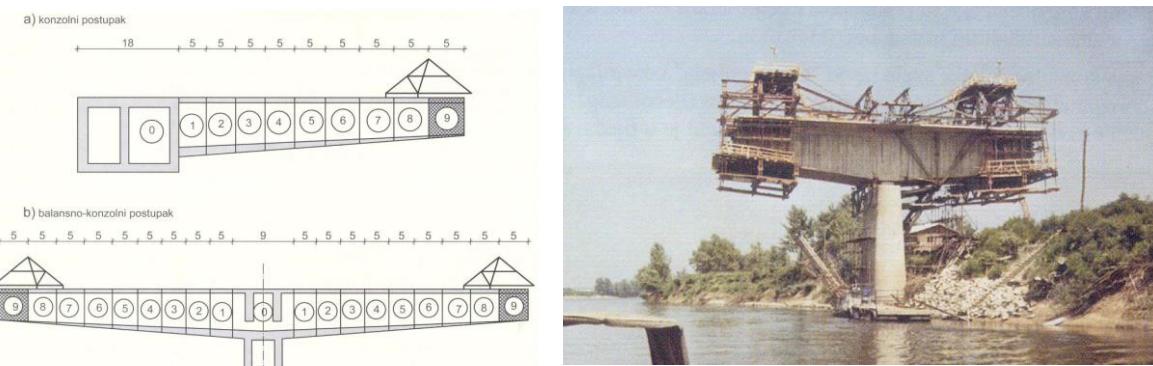
Mostovi preko Marne su imali konzolni dio uz upornjak, dok se srednji dio luka postavljao na mjesto pomoću jarbolnih dizalica. Vijadukt Caracas je lučni most građen konzolno kod kojeg su segmenti betonirani na oplati koja je ovješena na glavne stupove.

Dr. Finsterwalder u Njemačkoj uvodi konzolnu gradnju 1950. na mostovima Balduinstein i Neckarrens. Izvođačka tvrtka Boussiron koristi metodu za izgradnju željezničkog mosta la Voulte preko rijeke Rone 1952. Od ovog trenutka ubrzava se razvoj konzolne gradnje. U periodu od 1952.-1953. u Njemačkoj tvrtka Dyckerhoff and Widman radi konstrukcije sa prednapetim šipkama. Prvi most u Francuskoj kod kojeg su segmenti betonirani na mjestu gradnje je Chazey. Napravljen je 1955. i prednapet je kablovima. U isto vrijeme prednapinjanje kablovima počinje u Njemačkoj, Austriji i nekoliko drugih zemalja. Osim lukova i rasponskih konstrukcija sa kosim stupovima sve konstrukcije su imale zglob na sredinama raspona. Novi korak je napravljen 1962. kada se uklanja zglob i uvodi kontinuitet rasponske konstrukcije na mostovima Lacroix-Falgarde i Vallon du Moulin a Poudre. Još jedan iskorak napravljen je uvođenjem predgotovljenih elemenata. Jedan od prvih mostova sa predgotovljenim elementima bio je Choisy-le-Roi napravljen 1962. u Francuskoj kod kojeg su spojevi lijepljeni, a segmenti integrirani prednapinjanjem. Slične stvari se ubrzo koriste diljem svijeta i grade se impozantni objekti kao viadukt Chillon i most Rio Niteroi u Brazilu (ukupne dužine 8 km). Metoda konzolne gradnje razvijena je i kod zauzdanih mostova, primjerice most Brotonne sa glavnim rasponom od 320 m koji je jedno vrijeme držao rekord za najduži raspon od prednapetog betona [1]. Najduži raspon napravljen slobodno konzolnom gradnjom betoniranjem na mjestu građenja trenutno je most Shibanpo (2006.) preko rijeke Jangce u Kini sa rasponom od 330 m. Iza njega slijedi most Stolma (1998.) u Norveškoj sa rasponom od 301 m.

1.2 Slobodno konzolni mostovi od prednapetog betona

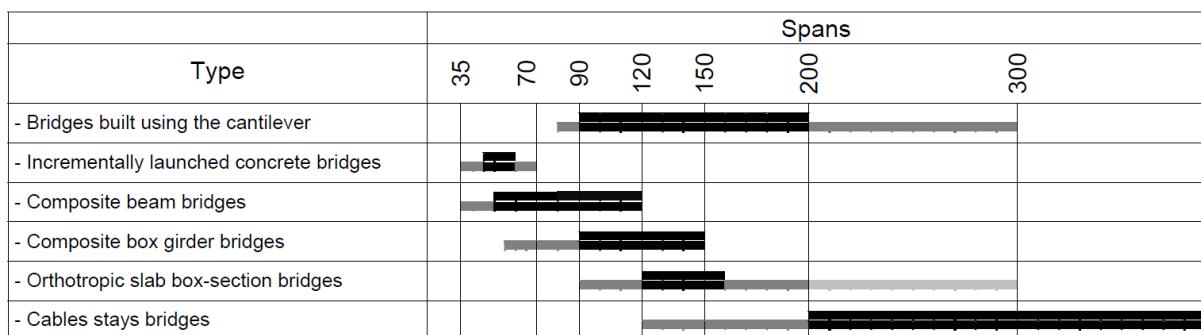
Tehnika gradnje slobodno konzolnih mostova je da se prvo izradi stup na vrhu kojeg se izvodi početni dio rasponske konstrukcije tzv. bazni segment (pier head). Na baznom segmentu podižu se pokretne skele („krletke“) koje će pridržavati oplatu pojedinih segmenta mosta. Glavni nosivi dio krletke je romb koji se preko šine sidrima pričvrsti na gornji rub rasponske konstrukcije. Nakon što se postavi oplata pristupa se izradi armature segmenta i nakon toga betoniranju. Čim beton postigne dostatnu čvrstoću prednapinju se kablovi konzolne gradnje u gornjem dijelu segmenta kako bi se segment aktivirao. Onda se otpušta oplata i krletka se preko šina gura prema naprijed da dođe u poziciju izrade idućeg segmenta. Ovaj postupak se ponavlja dok se ne završi konzola mosta. Bitno je naglasiti da ovaj proces kod slobodno konzolnih mostova ide istovremeno na lijevoj i desnoj strani konzole, kako bi konzola ostala u ravnoteži. Prednosti ovakve gradnje su mnogobrojne. Prvo, rasponske konstrukcije se rade bez ikakvog dodira sa tlom što omogućava izgradnju konstrukcija preko plavnih rijeka ili jako dubokih i strmih jaruga. Ova metoda može se koristiti i za izgradnju konstrukcija različitih geometrija. Rasponska konstrukcija može biti konstantne ili promjenjive visine (linearno, parabolično, kubično).

Slika 2 prikazuje način izvedbe mostova konzolnim postupkom. Ljeva slika prikazuje princip izvedbe, a desna slika konkretnu izvedbu na nekom mostu.



Slika 2 – Klasična izvedba mostova slobodnom konzolnom gradnjom

Metoda je fleksibilna obzirom na geometriju prometnice na mostu jer se za razliku od postupka naguravanja može napraviti bilo kakva horizontalna i vertikalna geometrija bez većih poteškoća. Nadalje, izgradnja u segmentima od 3-5 m je jako isplativa u pogledu potrebne količine oplate za rasponsku konstrukciju, čak ako su rasponi mali i različitih dužina (Slika 3). U slučaju predgotovljenih elemenata manja dužina segmenata smanjuje ukupnu težinu segmenta i tako smanjuje trošak strojeva za postavljanje. Nedostatak metode je da su za jednake raspone ovi mostovi dosta teži od spregnutih mostova. To znači da trebaju veće temelje i oslonce, a problem se javlja kada se most radi na lošem tlu ili seizmički jako aktivnom području. Drugi veliki nedostatak je veliki broj zadataka koji se moraju ispuniti na terenu za izradu rasponske konstrukcije i pristupnih cesta. Iako se broj ovih zadataka smanjuje ako su segmenti predgotovljeni, opet je veći nego kod postupka naguravanja. Kada konstrukcija prelazi prometnicu može se ugroziti sigurnost što za sobom ima posljedicu zatvaranja prometnica. Sa estetskog stajališta mostovi napravljeni konzolnim načinom gradnje često imaju visoku rasponsku konstrukciju što može predstavljati problem na određenim gradilištima. Uslijed segmentne gradnje i segmentnog betoniranja može se javiti razlika u boji konstrukcije kod dva različita betona.



Slika 3 – Područja primjene prema rasponima konstrukcije (m) [2]

Konzolno građeni prednapeti betonski mostovi sandučastog presjeka rasponske konstrukcije mogu se raditi u rasponima 60-300 m, pri čemu je za raspone manje od 80 m rasponska konstrukcija najčešće konstantne visine. U ovom opsegu postoje i druge metode koje su isplative za gradnju.

Konzolno građeni prednapeti betonski mostovi rasponima manjim od 80 m u svim bitnim aspektima konkuriraju spregnutim mostovima beton-čelik. Ako je geometrija prometnice povoljna onda su konkurentni i prednapetim mostovima na naguravanje koji imaju raspon 35-70 m. Za raspone između 70-120 m konzolni mostovi mogu imati konstantnu ili promjenjivu veličinu rasponske konstrukcije. U ovim rasponima konkurentni su grednim spregnutim mostovima beton-čelik. Zbog estetskih razloga u ovim rasponima koriste se i zauzdani (ovješeni) mostovi. Za raspone od 100-200 m konzolni mostovi skoro uvijek imaju promjenjivu visinu rasponske konstrukcije. U ovom području natječu se sa sandučastim spregnutim mostovima i sa zauzdanim mostovima. Ekonomičnom se može pokazati i izvedba sa laganim čeličnim rebrima [1].

2. Pregled područja istraživanja

2.1 Motivacija

Najsnažnija motivacija za provođenje istraživanja u pogledu nosivosti konstrukcija je sprječavanje mogućih katastrofa do kojih može dovesti nedovoljno poznавanje načina prijenosa sila i nosivosti. Navest će se samo dva primjera koji su ostavili duboki trag u mostograditeljskoj zajednici.

Jedan od ranijih značajnih primjera rušenja bio je čelični most u Quebecu koji se srušio dvaput prilikom izgradnje. Prvo rušenje dogodilo se 1907. godine sa 75 žrtava. Do rušenja je došlo uslijed pogrešnog proračuna, tj. pogrešnog izračuna vlastita težine mosta, koja je bila veće opterećenje nego je most u izgradnji mogao podnijeti [6]. Most se nastavio graditi 1916. godine, ali je pri podizanju centralnog dijela došlo do problema sa dizalicama što je uzrokovalo pad centralnog dijela i pogibiju 13 radnika (Slika 4) [7]. Most je konačno dovršen 1919. i još uvijek drži rekord najvećeg raspona kod konzolnog mosta, od 549 m.



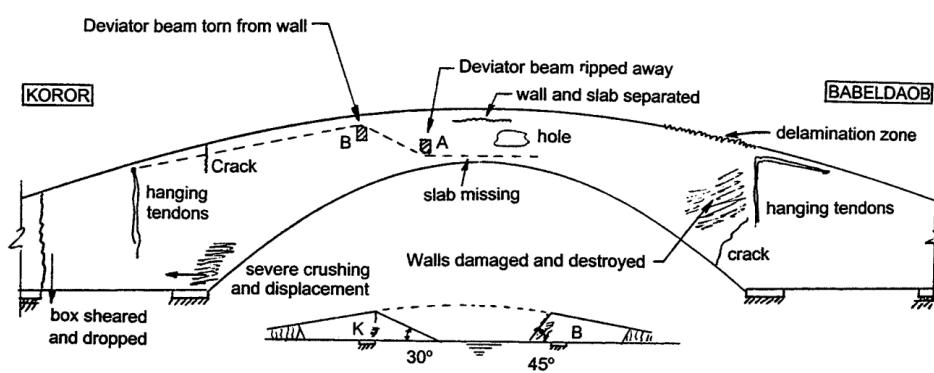
Slika 4 – Most u Quebecu, rušenje centralnog segmenta, 1916. [7]

Drugi primjer je slobodno konzolni sandučasti most Koror-Babeldaob u Palau napravljen 1977. od prednapetog betona (Slika 5). Imao je glavni raspon od 240.8 m i u to vrijeme je držao rekord za najveći raspon ovog tipa. Most je na sredini raspona imao zglob koji je prenosi samo posmična opterećenja [8]. Most je ubrzo nakon izgradnje dobio velike vertikalne progibe. Do 1996. godine sredina raspona se spustila za 1.2 m, što je uznemirilo lokalno stanovništvo koje je tražilo od vlasti da nešto poduzme. Napravljene su dvije studije (Louis Berger International i Japan International Co-operation Agency) koje su obje zaključile da je most siguran i da su veliki pomaci posljedica puzanja i slabijeg modula elastičnosti betona. Treću studiju napravio je 1993. ABAM, Seattle u kojoj je zaključeno da će se most spustiti dodatnih 0.84 m u idućih 85 godina i predložena je sanacija sa 40 vanjskih naknadno prednapetih kablova. Sanacija je napravljena između 1995. i 1996. pri čemu je ukinut zglob u sredini mosta i postavljeni su vanjski prednapeti kablovi sa devijatorima.



Slika 5 – Koror-Babeldaob most, lijevo - most nakon izgradnje, desno – srušeni most

Tri mjeseca nakon sanacije 26.09.1996. most se iznenadno i katastrofično srušio, po mirnom sunčanom vremenu i praktično neopterećen. Naknadna studija je utvrdila da su uzroci rušenja promjena statičkog sustava mosta i pukotine u gornjoj ploči u kojoj se javilo vlačno naprezanje. Proračun mosta napravljen je linearnim modelom, ne uzimajući u obzir preraspodjelu sila zbog efekata puzanja i skupljanja [9][10] (Slika 6).



Slika 6 – Pregled oštećenja pri rušenju[8]

2.2 Neka dosadašnja istraživanja nosivosti i ponašanja mostova građenih slobodnom konzolnom gradnjom

Zbog naglog porasta u primjeni konzolne gradnje, a u svrhu sprječavanja neželjenih posljedica uslijed pojava koje su svojstvene metodi, od 70-ih godina XX stoljeća naovamo dolazi do pojačane potrebe za istraživanjem načina preraspodjile sila tijekom gradnje i eksploatacije mostova građenih ovim postupkom. Istraživanja se naročito intenziviraju 90-ih godina prošlog stoljeća razvojem tehnika eksperimentalnih ispitivanja i računalnih nelinearnih numeričkih metoda.

Skrinarić i Strukelj (1996.) provode mjerena da bi odredili prirodne frekvencije osciliranja slobodno konzolnog mosta promjenjive visine rasponske konstrukcije u Sloveniji tijekom gradnje, pri čemu su mjerene frekvencije za svaki segment [11]. Casas (1997.) provodi istraživanja kako bi odredio parcijalni koeficijent sigurnosti osnovan na pouzdanosti kod slobodne konzolne gradnje betonskih mostova. Istraživanje se provodi na mostovima raspona od 80 do 140 m, a napravljen je primjer na mostu raspona 120 m [12]. Manjure (2001.) radi na rehabilitaciji slobodno konzolnih mostova sa upuštenim centralnim dijelom raspona u Indiji kod kojih se zbog loših detalja armature i nepažljivog betoniranja u fazi eksploatacije javljaju problemi [13]. Strommen i ostali (2001.) istražuju utjecaj dinamičkog opterećenja poprečnog vjetra na vertikalne oscilacije u fazi gradnje kod slobodno konzolno građenih mostova. Istraživanja se provode u vjetrovnom tunelu, te je na osnovu ovih pokusa napravljen postupak za predviđanje dinamičkog odgovora konstrukcije [14]. Schmidt i Solari se (2003.) također bave istraživanjem utjecaja vjetra na mostove građene slobodno konzolnom gradnjom i daju postupak za određivanje utjecaja vjetra na rasponsku konstrukciju i stup. Zaključak je da se neki utjecaji vjetra u različitim konfiguracijama mostova ne smiju zanemariti da bi se dobili dobre vrijednosti utjecaja na konstrukciju [15]. McDonald i ostali (2003.) istražuju rušenje mosta Koror-Babeldaob u Palauu. Izvršena je analiza pregleda na terenu i napravljeni su proračuni mosta prije i nakon ojačanja. Rezultat analize pokazuje da je najvjerojatniji uzrok rušenja oštećenje pri uklanjanju izvorne betonske površine kolnika [16]. Kwak i Son (2004.) rade na određivanju odnosa raspona kod slobodno konzolno građenih mostova kroz vremenske analize u kojima je glavna vodilja da se na rubu konzole ne javi vertikalni pomak uslijed djelovanja težine i prednapetih kablova za konzolnu gradnju [17]. Također rade na određivanju varijacije momenta savijanja kroz vrijeme uzimajući u obzir faze gradnje i puzanje betona. Na osnovu ovih istraživanja daju izraz po kojem se elastičnom analizom bez uzimanja u obzir faza gradnje i puzanja može doći do momenta savijanja i njegove varijacije [18]. I u Hrvatskoj se sprovode istraživanja vezana za ovu problematiku. Radić i suradnici bave se nadvišenjima i progibima kod slobodno konzolnih mostova, te daju izraz za približno računanje potrebnog nadvišenja [19]. Pimanmas (2007.) istražuje utjecaj dugoročnog puzanja i prednapinjanja na preraspodjelu momenata savijanja kod mostova građenih slobodno konzolnom gradnjom. Analiza pokazuje da puzanje u ovim slučajevima može povećati vrijednost negativnog momenta i da grube procjene puzanja mogu dovesti do pogrešnih rezultata. Točan redoslijed i vrijeme izgradnje trebali bi se uzeti u obzir [20].

Jung i suradnici (2007.) rade na simulaciji koja pomoću terenskih mjerjenja kalibrira numeričke rezultate progiba slobodno konzolno građenih mostova. Kvaliteta kalibracije ovisi od iskustva inženjera na terenu, a bitna je zbog točnog spajanja mosta [21]. Hewson (2007.) provodi studiju o slobodno konzolnom načinu gradnje mostova [22]. Hedjadi i suradnici iste godine istražuju utjecaj puzanja betona na progibe i napone kod prednapetih slobodno konzolnih mostova. Rade se trodimenzionalni pločasti modeli sa uključenom materijalnom nelinearnosti i puzanjem betona [23]. Morassi i Tonon (2008.) rade niz testova sa prisilnom vibracijom kako bi odredili dinamičke karakteristike prednapetog mosta Palu sa tri raspona na sjevero-istoku Italije na području velike seizmičnosti [24].

Gentile i Bernardini provode pokuse ambijentalnih vibracija na slobodno konzolnom mostu Capriate koristeći radarsko mjerjenje. Vrijednosti prirodnih frekvencija i modalnih oblika koje su dobivene preko akcelerometara sa radarskim senzorom su se podudarale sa vrijednostima dobivenim konvencionalnim akcelerometrima [25]. Marzouk i suradnici (2008.) razvijaju posebni simulacijski model za slobodno konzolne mostove građene na licu mjesta i montažno [26]. Kronenberg iste godine proučava kontinuiranu ugradnju betona kod slobodno konzolnih mostova rađenih na licu mjesta. Kao primjer navodi most Hacka u Češkoj koji je završen i predan nakon samo dvije godine građevinskih radova [27]. Kamaitis istražuje spojeve između segmenata kod slobodno konzolnih mostova građenih montažno. Istraživanje obuhvaća 5 većih mostova klasifikaciju i statistiku problema u spojevima [28]. Bayraktar i ostali (2009.) provode istraživanje o karakteristikama vibracija mosta Komurhan koji je građen slobodno konzolnom gradnjom [29]. Liu i ostali određuje dinamički odziv 235 m dugog mosta sa tri raspona i prednapetim sandučastim presjekom preko niza testova ambijentalnih vibracija koji su provedeni kroz 12 mjeseci [30]. Vonganan vrši istraživanja ponašanja na mostu Mekong u Tajlandu [31]. Pinmanas i ostali provode studiju na prednapetom slobodno konzolnom mostu Phra-Nangklaou na Tajlandu [32].

Starossek (2009.) predstavlja projekt I faze gradnje slobodno konzolnog prednapetog mosta ShinChon u Koreji [33]. Altunisik i suradnici (2010.) provode analizu faza gradnje mosta Komurhan uzimajući u obzir karakteristike materijala ovisne o vremenu [34]. Malm i Sunquist provode vremenski osjetljivu analizu segmentnih slobodno konzolnih mostova. Zaključili su da se dobiju veći progibi od očekivanih i veća naprezanja u rebrima uslijed prednapinjanja kablova donje ploče. Osim toga pokazuju značajan utjecaj puzanja u konzolnoj gradnji kao i nejednoliko skupljanje sušenjem na završenom mostu [35]. Stathopoulos istražuje dinamičko ponašanje slobodno konzolnog mosta Metsovo u Grčkoj [36]. Altunisik i ostali (2011.) mijere dinamički odziv slobodno konzolnog vijadukta Gulburnu pomoću testova ambijentalne vibracije [37].

Ates (2011.) radi na numeričkom modeliranju slobodno konzolnih mostova uzimajući u obzir vremenski ovisne karakteristike materijala. Analize su pokazale da se vremenski ovisne karakteristike materijala i geometrijska nelinearnost trebaju uzeti u obzir kako bi se dobilo pravo ponašanje betonskih mostova [38]. Turan (2012.) u svom radu istražuje dinamičke karakteristike slobodno konzolnih mostova koristeći numeričke i eksperimentalne metode [39].

Ates i suradnici (2013.) istražuju ponašanje konstrukcije slobodno konzolnih mostova uzimajući u obzir međudjelovanje konstrukcije i tla [40]. Chen i suradnici (2013.) nedugo nakon završetka radova rade dinamičke testove i dugotrajno praćenje vijadukta Newmarket (Auckland, Novi Zeland) sa 12 raspona koristeći bežične senzore [41].

Kudu i suradnici (2014.) određuju dinamičke karakteristike slobodno konzolnog prednapetog mosta Berta pomoću metode konačnih elemenata i modalne analize [42]. Pimentel i Figueiras (2017.) predstavljaju novu metodologiju za procjenu stanja naknadno prednapetih slobodno konzolnih mostova uključujući eksperimentalna i numerička istraživanja [43]. Sumerkan (2019.) daje pojednostavljen izraz za frekvencije kod prednapetih slobodno konzolnih mostova [44]. Bayraktar i ostali (2020.) istražuju utjecaj vertikalnih pomaka u tlu u blizini rasjeda na seizmičko ponašanje slobodno konzolnih mostova. Analiza je provedena numerički i pokazala je da vertikalni pomaci tla bitno utječu na seizmičko ponašanje mosta [45].

Caner (2021.) analizira rekonstrukciju djelomično srušenog slobodno konzolnog prednapetog mosta Begendik [46]. Bravo i suradnici (2021.) provode istraživanja za procjenu seizmičkog pomaka slobodno konzolnih mostova u fazi gradnje i u fazi eksploatacije [47]. Furunes (2021.) analizira aspekte izgradnje mosta Trysfjord raspona 260m u Norveškoj slobodnim konzolnim postupkom i o povezivanju programiranja sa projektiranjem [48].

2.3 Neki zaključci vezani za dostupnu literaturu i recentna istraživanja

Niz prethodno nabrojanih istraživanja pokazuju kako je ponašanje mostova građenih slobodnim konzolnim postupkom neprekidna tema istraživanja akademске i stručne zajednice. Ubrzana gradnja cestovnih i željezničkih mostova, sa sve većim rasponima i sve zahtjevnijom geometrijom, postavlja pred inženjere projektante i izvođače sve veće zahtjeve u pogledu uštete materijala, smanjenje cijene i brzine izgradnje, uz zadržavanje istog stupnja mehaničke otpornosti, stabilnosti i pouzdanosti.

Ekstremne vremenske prilike, potresi, led, bujice, orkanski vjetrovi i slično, kojima smo u posljednje vrijeme sve češće svjedoci, pred mostovske konstrukcije postavljaju sve veće i veće zahtjeve. Poznavati točan tijek sila u njima postaje primarni zahtjev inženjera konstruktera.

Kako je vidljivo iz recentnih istraživanja, predviđanje ponašanje takvih mostova na sva opterećenja koja na njih djeluju, davno su izašla iz domene klasičnog inženjera projektanta i uobičajenih linearnih modela iz komercijalnih računalnih programa za proračun konstrukcija.

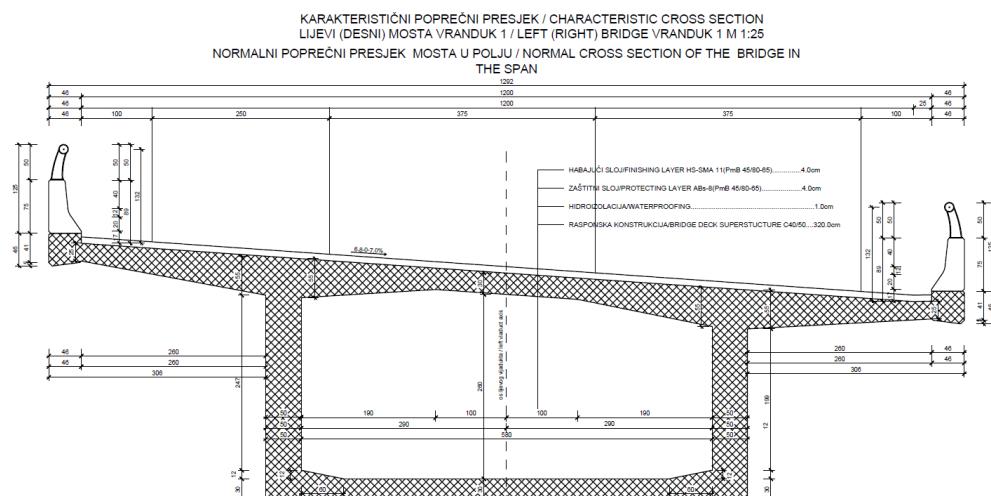
Istraživanja se generalno kreću u dva smjera. Prvi smjer je ispitivanje izvedenih mostova s ciljem utvrđivanja njihovog ponašanja, koji se obično provode *in situ*, na stvarnim objektima. Ovakva istraživanja, iako nisu rijetka, nažalost su obično provedena na izgrađenim objektima, pri čemu se utjecaj načina gradnje i promjene tijeka sila koji s njim nastaju tek zaključuju iz konačnog stanja naprezanja i deformacija.

Dругi smjer je izrada specifičnih numeričkih modela koji se kalibriraju podacima mjerenima *in situ*, te tako stvaraju pouzdani modeli koji mogu jako dobro opisati realno ponašanje konstrukcije.

3. Planirana tema istraživanja

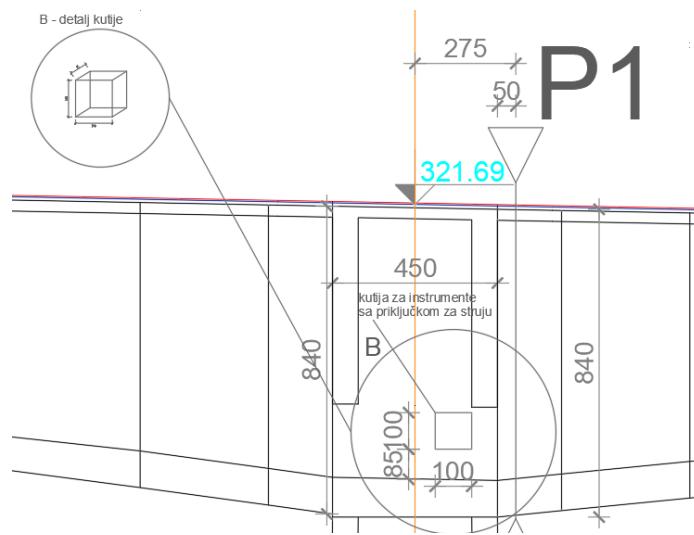
Upravo ova ova prethodno opisana smjera istraživanja namjeravaju se objediniti u ovom radu. Trenutno se u Bosni i Hercegovini gradi koridor Vc, koji je dio europskog sustava prometnica (Budimpešta-Osijek-Sarajevo-Ploče). Na ovom koridoru nalazi se i niz mostova koji se grade upravo konzolnim načinom gradnje.

Istraživanje se planira provesti na mostovima Vranduk 1 i Vranduk 2. Ovi mostovi nalaze se na autocesti koridora Vc, dionica Poprikuše – Zenica Sjever (Donja Gračanica), poddionica Vranduk – Ponirak. Trasa poddionice počinje u dolini rijeke Bosne koliko to dopuštaju tehnički elementi kao i uvjeti na terenu. Svaki smjer autoceste je na posebnoj konstrukciji mosta, pa bi se istraživanje vršilo na Vranduk 1 desno (S1D) i na Vranduk 2 lijevo (S1L). Oba mosta grade se slobodno konzolnim načinom gradnje i okvirne su konstrukcije sa prednapetom rasponskom konstrukcijom. Most Vranduk 1 desni ima ukupnu dužinu od 390 m sa glavnim rasponom od 120 m. Most Vranduk 2 lijevi ima ukupnu dužinu 340 m sa glavnim rasponom od 150 m. Rasponska konstrukcija kod oba mosta je sandučasta promjenjive visine presjeka. Kod mosta Vranduk 1 visina na stupu je 6.80 m, a u polju 3.20 m (Slika 7). Kod mosta Vranduk 2 visina na stupu je 8.40 m, a u polju 4.00 m.

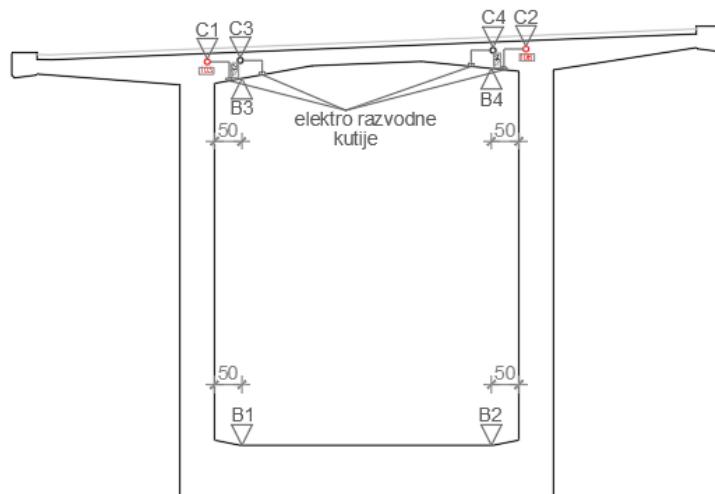


Slika 7 – Karakteristični poprečni presjek rasponske konstrukcije u polju (Vranduk 1)

Planira se uspostaviti monitoring na mostovima za vrijeme izgradnje kojim će se mjeriti promjene relativne deformacije na betonu i na čeliku za prednapinjanje. Osim toga geodetski će se pratiti točke na rubovima svakog segmenta tijekom izgradnje na sva četiri mosta. Na mostu Vranduk 2 postavit će se mjerna oprema na stup S1L. Planira se postavljanje HBM uređaja QuantumX 840A sa 8 ulaznih kanala [49]. U sve kanale priključit će se trake za mjerjenje relativne deformacije, četiri trake stavile bi se u rubove poprečnog presjeka na beton, a preostale četiri na kablove konzolne gradnje. Trake će se staviti u presjek koji je 0.50 m pomaknut od ruba dijafragme prema polju. U ovom slučaju bit će zabilježene promjene uslijed izvedbe svakog segmenta do spajanja mosta (Slika 8 i Slika 9).

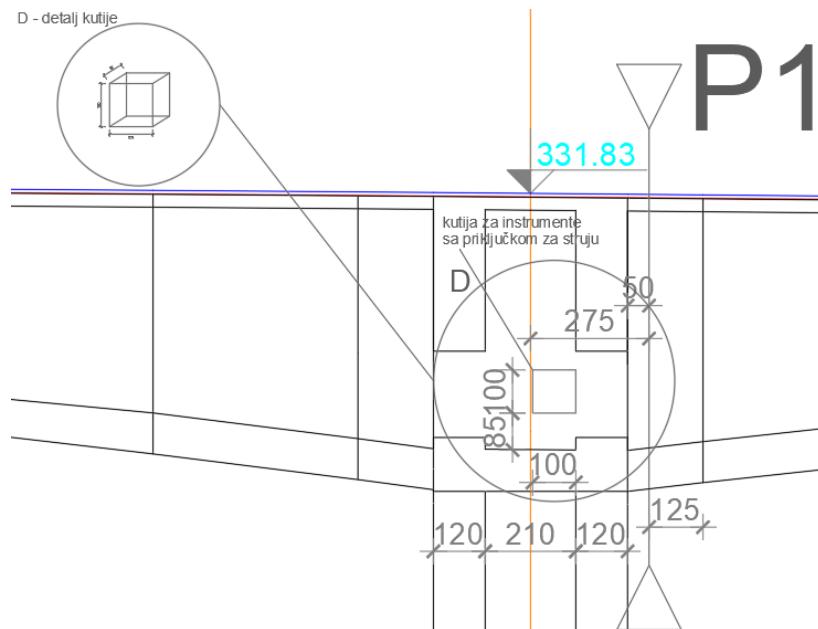


Slika 8 – Nacrt postavljanja mjernih uređaja u uzdužnom presjeku (S1L – Vranduk 2)

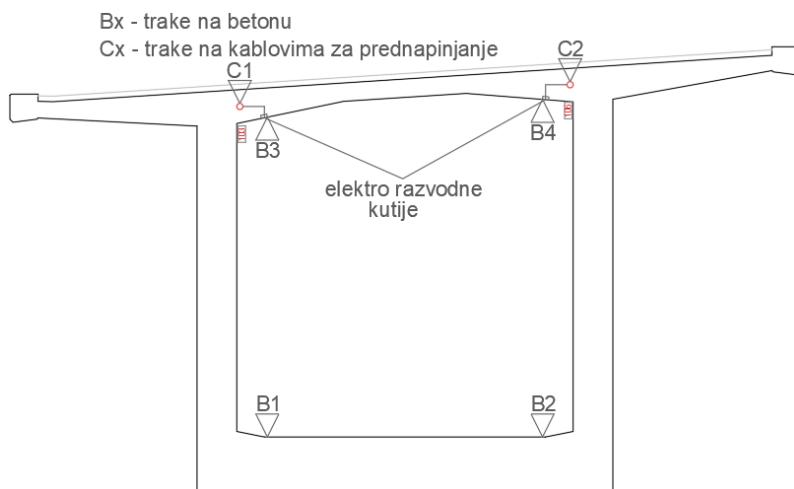


Slika 9 – Nacrt postavljanja mjernih traka u poprečnom presjeku (S1L – Vranduk 2)

Na mostu Vranduk 1 postavit će se mjerna oprema na S1D. Ovdje se planira postavljanje istog uređaja QuantumX 840A sa ukupno 8 ulaznih kanala. Kod ovog mosta četiri trake stavit će se na rubove betonskog presjeka, dvije trake na kablove konzolne gradnje, a dvije trake će služiti za kompenzaciju temperature (jedna na tehnološkoj kocki postavljenoj u presjek sanduka, druga na uzorku čelika postavljenom pored kabla za prednapinjanje). Trake će se staviti u presjek pomaknut 0.50 m od ruba dijafragme prema polju, opet da se očitaju promjene pri izgradnji svih segmenata sve do spajanja mosta (Slika 10 i Slika 11).



Slika 10 – Nacrt postavljanja mjernih uređaja u uzdužnom presjeku (S1D – Vranduk 1)



Slika 11 – Nacrt postavljanja mjernih traka u poprečnom presjeku (S1D – Vranduk 1)

U drugoj fazi, nakon sakupljenih svih numeričkih podataka mjerjenja, planira se izrada numeričkog modela mostova u programskom paketu SOFiSTiK [50]. Programske pakete SOFiSTiK je komercijalni program, ali ujedno i istraživački software koji dozvoljava intervenciju u kôd i intervenciju u sve dijelove proračuna. U modelu će se pokušati što realističnije simulirati stvarna geometrija mostova sa stvarnim fazama gradnje i stvarnim teretima.

Proračun će se izvršiti sa uključenom materijalnom i geometrijskom nelinearnosti (teorija 3. reda), pri čemu će biti obuhvaćeni i reološki procesi. Cilj ovog modela je da potvrdi izmjereno stanje na konstrukcijama.

Generalni cilj istraživanja je istražiti utjecaj fazne gradnje slobodno konzolnih mostova koji se betoniraju na licu mjesta na naprezanja i relativne deformacije u betonu i čeliku za prednapinjanje, te istražiti utjecaj načina gradnje na progibe u toku gradnje. Iz usporedbe mjerenih rezultata i numeričkog modela, te kalibriranja numeričkog modela planira se dati zaključak o ponašanju slobodno konzolnih mostova neovisno o rasponu, kao i smjernice za modeliranje istih.

4. Literatura

- [1] J. Mathivat, „The cantilever construction of prestressed concrete bridges“, Editions Eyrolles, 1979., ISBN 0471103438
- [2] Grupa autora, „Design guide – Prestressed concrete bridges built using the cantilever method“, Setra, 2003.
- [3] A. J., DuBois, „The mechanics of engineering“, John Wiley & Sons, 1902.
- [4] C. Bender, „Discussion on Cantilever Bridges by C.F. Findlay“, Canadian Society of Civil Engineers, 1890.
- [5] E. DeLony, „Context for world heritage bridges“, International Council on Monuments and Sites, 1996.
- [6] C. C., Schneider, „Quebec bridge inquiry report“, S. E. Dawson, 1908.
- [7] W. D., Middleton, „The bridge at Quebec“, Indiana University Press, 2001.
- [8] M. Pilz, „The Collapse of the K-B Bridge in 1996“, London, 1997.
- [9] L. G., M. Pilz, „Continuity in Prestressed Concrete Structures, Time-Dependent Responses“, 22nd Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, 1997.
- [10] Pilz, M., „The Koror-Babeldaob Bridge in the Republic of Palau, History and Time Dependent Stress and Deflection Analysis“, Dissertation Imperial College London, Department of Civil Engineering, 1997.
- [11] M. Skrinar, A. Strukelj, „Eigen frequency monitoring during bridge erection“, Structural Engineering International, 6(3), 191-194, 1996.
- [12] J. R. Casas, „Reliability-based partial safety factors in cantilever construction of concrete bridges“, Journal of Structural Engineering, 123(3), 305–312, 1997.
- [13] P. Y. Manjure, „Rehabilitation of balanced cantilever bridges“, Indian Concrete Journal, 75(1), 76–82, 2001.
- [14] E. Strommen, E. Hjort-Hansen, J. H. Kaspersen, „Dynamic loading effects of a rectangular box girder bridge“, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89(14–15), 1607–1618, 2001.
- [15] S. Schmidt, G. Solari, „3-D wind-induced effects on bridges during balanced cantilever erection stages“, Wind and Structures, An International Journal, 6(1), 1–22, 2003.
- [16] B. McDonald, V. Saraf, B. Ross, „A spectacular collapse: Koror-Babeldaob (Palau) balanced cantilever prestressed, posttensioned bridge“, Indian Concrete Journal, 77(3), 955–962, 2003.

- [17] H.-G. Kwak, J.-K. Son, „Span ratios in bridges constructed using a balanced cantilever method“, *Construction and Building Materials*, 18(10), 767–779, 2004.
- [18] H.-G. Kwak, J.-K. Son, „Design moment variations in bridges constructed using a balanced cantilever method“, *Construction and Building Materials*, 18(10), 753-766, 2004.
- [19] J. Radić, I. Gukov, D. Meštrović, “A new approach to deflection analysis of cantilever beam bridges”, in Proc of the 2nd International Conference IABMAS – Bridge Maintenance, Safety, Management and Cost. Ed. by Watanabe, E.; Frangopol, D. M.; Utsunomiya, T. 18–22 Oct, Kyoto, Japan. Leiden: A. A. Balkema Publishers. 8 p. ISBN 04 1536 336 X, 2004.
- [20] A. Pimanmas, „The effect of long-term creep and prestressing on moment redistribution of balanced cantilever cast-in-place segmental bridge“, *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 29(1), 205–216, 2007.
- [21] S. Jung, J. Ghaboussi, C. Marulanda, „Field calibration of time-dependent behavior in segmental bridges using self-learning simulation“, *Engineering Structures*, 29(10), 2692–2700, 2007.
- [22] N. Hewson, „Balanced cantilever bridges“, *Concrete (London)*, 41(10), 59–60, 2007.
- [23] S. Hedjazi, A. Rahai, K. Sennah, „Evaluation of creep effects on the time-dependent deflections and stresses in prestressed concrete bridges“, *Bridge Structures*, 3(2), 119–132, 2007.
- [24] A. Morassi, S. Tonon, „Dynamic testing for structural identification of a bridge“, *Journal of Bridge Engineering*, 13, 573–585, 2008.
- [25] C. Gentile, G. Bernardini, „Output-only modal identification of a reinforced concrete bridge from radar-based measurements“, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 41, 544–553, 2008.
- [26] M. Marzouk, H. Said, M. El-Said, „Special-purpose simulation model for balanced cantilever bridges“, *Journal of Bridge Engineering*, 13(2), 122–131, 2008.
- [27] J. Kronenberg, „Continous concrete placing during balanced cantilever construction of a bridge“, *Concrete Engineering International*, 12(3), 38–39, 2008.
- [28] Z. Kamaitis, „Field investigation of joints in precast post-tensioned segmental concrete bridges“, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 3(4), 198–205, 2008.
- [29] A. Bayraktar, A. C. Altuṣnişık, B. Sevim, A. Domanıç, Y. Taş, „Vibration characteristics of Kömürhan highway bridge constructed with balanced cantilever method“, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 23(2), 90–99, 2009.
- [30] C. Liu, J. T. DeWolf, J. Kim, „Development of a baseline for structural health monitoring for a curved post-tensioned concrete box girder bridge“, *Engineering Structures*, 31, 3107–3115, 2009.
- [31] B. Vonganan, „The second Mekong international bridge, Thailand“, *Structural Engineering International*, 19(1), 67–68, 2009.
- [32] A. Pimanmas, S. Imsombat, K. Hj. Neilsen, „New Phra- Nangklaob bridge—A balanced cantilever prestressed concrete bridge in Thailand“, *Structural Engineering International*, 19(1), 38–40, 2009.

- [33] U. Starossek, „Shin Chon Bridge Korea“, Structural Engineering International, 19(1), 79–84, 2009.
- [34] A. C. Altunişik, A. Bayraktar, B. Sevim, S. Adanur, A. Domaniç, „Construction stage analysis of Kömürhan highway bridge using time dependent material properties“, Structural Engineering and Mechanics, 36(2), 207–223, 2010.
- [35] R. Malm, H. Sundquist, „Time-dependent analyses of segmentally constructed balanced cantilever bridges“, Engineering Structures, 32(4), 1038–1045, 2010.
- [36] S. Stathopoulos, G. Seifried, P. Kotsanopoulos, H. Haug, I. Spyropoulos, K. Stathopoulos, „The Metsovo bridge, Greece“, Structural Engineering International, 20(1), 49–53, 2010.
- [37] A. C. Altunişik, A. Bayraktar, B. Sevim, S. Ates, „Ambient vibration based seismic evaluation of isolated Gülburnu Highway Bridge“, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31(11), 1496–1510, 2010.
- [38] S. Ates, „Numerical modelling of continuous concrete box girder bridges considering construction stages“, Applied Mathematical Modelling, 35(8), 3809–3820, 2011.
- [39] F. N. Turan, „Determination of dynamic characteristics of balanced cantilever reinforced concrete bridges using ambient vibration data“, MSc Thesis, Karadeniz Technical University, Trabzon, Türkiye (in Turkish), 2012.
- [40] S. Ates, B. Atmaca, E. Yildirim, N. A. Demiroz, „Effects of soil-structure interaction on construction stage analysis of highway bridges“, Computers and Concrete, 12(2), 169–186, 2013.
- [41] X. Chen, P. Omenzetter, S. Beskhyroun, „Dynamic testing and long term monitoring of a twelve span viaduct“, Key Engineering Materials, 569–570, 342–349, 2013.
- [42] F. N. Kudu, A. Bayraktar, P. G. Bakir, T. Türker, A. C. Altunişik, „Ambient vibration testing of Berta Highway Bridge with post-tension tendons“, Steel and Composite Structures, 16(1), 23–46, 2014.
- [43] M. Pimentel, J. Figueiras, „Assessment of an existing fully prestressed box-girder bridge“, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Bridge Engineering, 170(1), 42–53, 2017.
- [44] S. Sumerkan, A. Bayraktar, T. Turker, M. Akkose, „A simplified frequency formula for post-tensioned balanced cantilever bridges“, Asian Journal of Civil Engineering, 20, 983–997, 2019.
- [45] A. Bayraktar, F. N. Kudu, S. Sumerkan, B. Demirtas, M. Akkose, „Near-fault vertical ground motion effects on the response of balanced cantilever bridges“, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering, 173, 17-33, 2020.
- [46] A. Caner, N. Apaydin, M. Cinar, E. Peker, M. Kilic, „Reconstruction of Partially Collapsed Post-tensioned Begendik Bridge During Balanced Cantilever Construction“, Developments in International Bridge Engineering, 203-212, 2021.

- [47] J. Bravo, J. Benjumea, F. A. Consuegra, "Parametric Study to Estimate Seismic Displacement Demands of Balanced Cantilever Bridges in Service and Construction Conditions", Conference: fib Symposium 2021 - Concrete Structures: New Trends for Eco-Efficiency and Performance, 2021.
- [48] E. W. Furunes, „Trysfjord bridge, parametric analysis and modelling for drawingless construction of a concrete balanced cantilever bridge”, IABSE Congress: Structural Engineering for Future Societal Needs, Ghent, Belgium, 1999-2004, 2021.
- [49] HBM: Test & Measurement | Load Cell | Transducer | Strain Gage, <https://www.hbm.com/en/>, pristupljeno: 06.12.2021.
- [50] SOFiSTiK FEM, BIM and CAD Software for Structural Engineers, <https://www.sofistik.com/>, pristupljeno: 06.12.2021.