

Mira PETRONIJEVIĆ, Marija NEFOVSKA-DANILOVIĆ

ANALIZA INTERAKCIJE CEVOVODA I KONSTRUKCIJE MOSTA

ANALYSIS OF WATER PIPES-BRIDGE STRUCTURE INTERACTION

Dr Mira Petronijević, dipl. građ. inž., vanredni profesor Građevinskog fakulteta u Beogradu.

Rođena je 1952. godine. Diplomirala je 1977, magistrirala 1983. i doktorirala 1993. godine na Građevinskom fakultetu u Beogradu. Vanredni profesor je za predmete Statika konstrukcija 2 i Teorija konstrukcija 1. Naučna i stručna oblast rada: dinamika konstrukcija, interakcija tla i objekta.

Mr Marija Nefovska-Danilović, dipl. građ. inž., asistent Građevinskog fakulteta u Beogradu.

Rođena je 1972. godine. Diplomirala je 1997, magistrirala 2003. godine na Građevinskom fakultetu u Beogradu. Asistent je na grupi predmeta Teorija konstrukcija. Naučna i stručna oblast rada: analiza ramova sa fleksibilnim vezama pri dejstvu statičkog i dinamičkog opterećenja, interakcija tla i objekta, vibracije izazvane dejstvom saobraćajnog opterećenja.

Rezime

Projektovanje vodovodnih cevi preko mostova velikih raspona zahteva pažljivu analizu svih relevantnih faktora koji mogu uticati na ponašanje i funkcionisanje cevovoda. Pored sopstvene težine i težine vode u cevima, u analizi opterećenja je potrebno uzeti u obzir i sva druga dejstva koja mogu bitno uticati na naponsko-deformacijsko stanje cevovoda, kao što su: uticaj saobraćajnog opterećenja, vetar, itd. U ovom radu analiziran je uticaj interakcije „Brankovog mosta“ i mosta „Gazela“ preko reke Save u Beogradu i konstrukcije cevovoda preko mosta pri delovanju saobraćajnog opterećenja. Zanemarenje ovog dejstva prilikom proračuna cevovoda i kasnije prilikom rekonstrukcije Brankovog mosta dovelo je do prekoračenja nosivosti elemenata sistema za vešanje cevovoda o konstrukciju mosta i havariju cevovoda, što je prouykovalo velike probleme u vodosnabdevanju. Kod mosta „Gazela“, sadejstvo konstrukcije cevovoda i mosta nije dovelo do bitnog oštećenja cevovoda zahvaljujući dobro konstruisanom sistemu za vešanja cevovoda.

Summary

The construction of water pipes across the bridges requires cautious analysis of all relevant effects. This means that pipeline-bridge connection must be designed not only to withstand the weight of the pipe, water contents and temperature changes, but also the other effects, particularly those caused by bridge-pipeline interaction, such as bridge displacements due to moving load, traffic vibrations, wind effect, etc.

In this paper the influence of moving loads on the pipeline structures of the Branko bridge and Gazela were analyzed. This type of loading is often being neglected during the design and construction of pipelines. This interaction have caused overloading of pipeline carriers and fracturing of hangers at Brankos bridge which disabled over-bridge water supplement. In the case of the bridge Gazela pipeline-bridge interaction did not cause pipes accidents due to the well designed hangers.

1. Uvod

Prilikom projektovanja i proračuna cevovoda preko mostova i njihovog sistema za vešanje o konstrukciju mosta, često se čini greška i konstrukcija cevovoda posmatra nezavisno od

konstrukcije mosta. Standardno, statički proračun se sprovodi za uticaj sopstvene težine, težine vode u cevovodu i dejstvo temperaturne promene. Saobraćajno opterećenje na mostu se, pri tome, potpuno zanemaruje. Međutim, analiza prikazanih slučajeva pokazala je da, u zavisnosti od načina

vešanja cevovoda za konstrukciju mosta, može doći do pojave interakcije cevovoda i mosta usled delovanja saobraćajnog opterećenja. Posledica toga je da se u cevovodu i sistemu za vešanje javlja potpuno drugo naponsko-deformacijsko stanje u odnosu na proračunsko. U nekim slučajevima, kao što je to kod mosta u Brankovoj ulici, može doći do prekoračenja nosivosti elemenata sistema za vešanje, havarije cevovoda i nemogućnosti vodosnabdevanja.

U ovom radu je uticaj interakcije mosta i cevovoda na naponsko-deformacijsko stanje cevovoda i sistema za vešanje, pri dejstvu saobraćajnog opterećenja, prikazan za slučaj cevovoda na "Brankovom" mostu i mostu "Gazela" u Beogradu. Modeliranje konstrukcije mosta i cevovoda izvršena je primenom Metode konačnih elemenata (MKE). Analiza je sprovedena primenom programa SAP2000.

Dobijeni su rezultati koji u potpunosti odgovaraju stanju cevovoda, tj. oštećenjima cevovoda i sistema za vešanje koja su utvrđena neposrednim ispitivanjem istih.

2. Brankov most

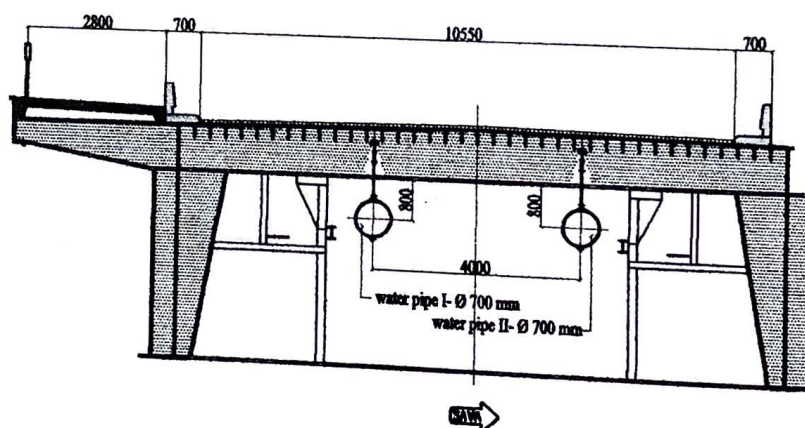
2.1 Opis cevovoda i sistema vešanja

Brankov most, preko reke Save u Beogradu, je kontinualni nosač na tri polja raspona $75 + 261 + 75$ m. Poprečni presek mosta i položaj vodovodnih cevi prikazan je na Slici 1. Cevovod čine dve vodovodne cevi $\text{Ø}700$ mm, koje su simetrično postavljene u odnosu na sredinu mosta.

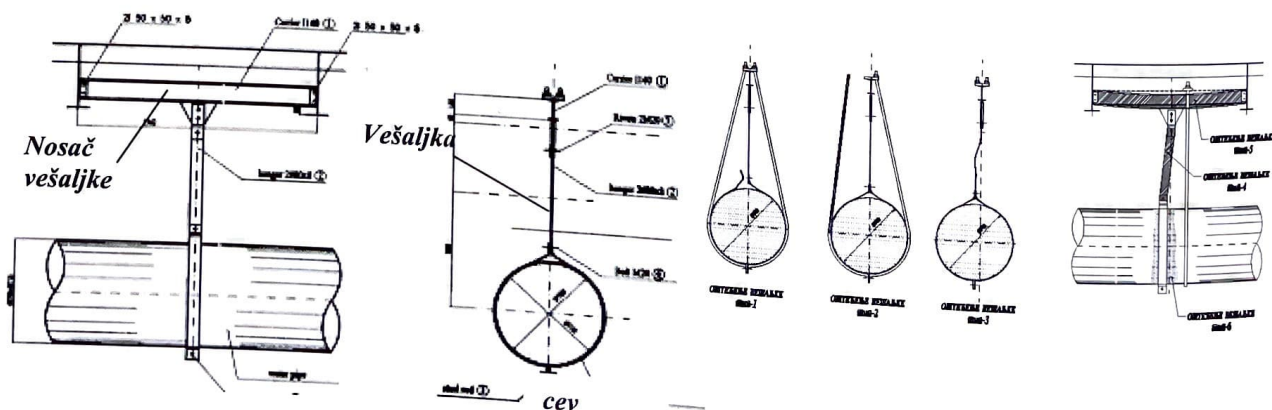
Cevi su obešene o konstrukciju mosta pomoću sistema za vešanje, čiji su osnovni elementi prikazani na Slici 2. Najvažniji elementi sistema vešanja su: nosači vešaljke (I140) koji su postavljeni između poprečnih nosača mosta; obujmice cevi i vešaljke koje povezuje obujmicu i nosač.

2.2 Stanje cevovoda i sistema vešanja

Snimanje stanja Brankovog mosta i cevovoda je uradio "Mostprojekt" 2002. god. Data je generalna ocena sistema vešanja primenjenog na cevovodu. Konstatovano je da je cevovod u vrlo lošem, čak šta više u kritičnom stanju i da njegova noseća konstrukcija predstavlja osnovnu opasnost po egzistenciju vodovoda na mostu.



Slika 1. Poprečni presek Brankovog mosta i položaj vodovodnih cevi



Slika 2. Sistem vešanja cevi na Brankovom mostu

Slika 3. Karakteristična oštećenja sistema vešanja cevi na Brankovom mostu

Utvrđena su sledeća karakteristična oštećenja elemenata vešaljke (Slika 3.):

- Osnovne vešaljke su na više mesta potpuno van funkcije, bilo iz razloga prekida vijka za vezu obujmice i vešaljke ili prekida samih obujmica. Većina oštećenja nastala su usled krug loma koji je karakterističan za konstrukciju opterećenu na zamor. Na nekim mestima došlo je do krivljenja vešaljke oko ose u poprečnoj ravni. Neke, naknadno dodate vešaljke, su se otkočile od I nosača prekidom šipke u zoni navoja.

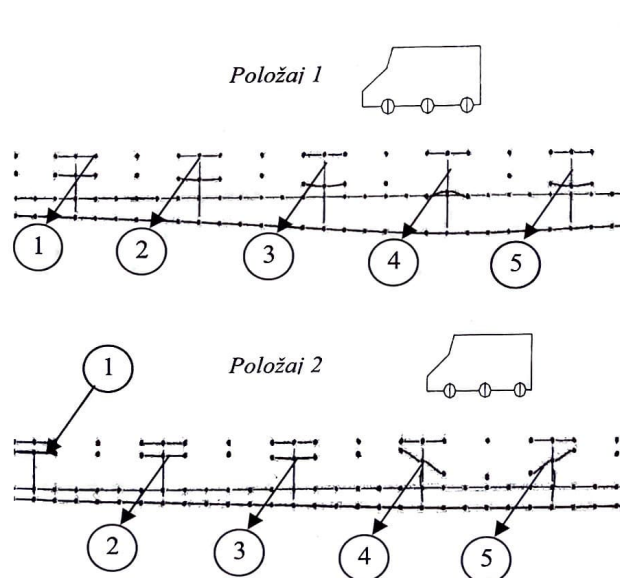
- Nosači vešaljke I140 su deformisani usled preopterećenja, na mestima gde su sistemi vešanja u susednim poljima otkazali.

- Obrtanje preseka krajnjih tačaka nosača vešaljke izazvalo je deformaciju poprečnog nosača ortotropne ploče mosta, što je nedopustiva pojava koja ugrožava stabilnost i funkcionalnost glavne konstrukcije mosta.

2.3 Analiza uticaja sadejstva mosta i cevovoda

Zbog velikih oštećenja cevovod je zatvoren i doneta je odluka da se izvrši zamena cevovoda. Projekatom privremene sanacije iz 1999. god. cevovod je računat kao kontinualni nosač na fiksnim osloncima. Nakon sanacije došlo je do pojave oštećenja kod 53 novougrađene vešaljke na uzvodnoj cevi. Analizirajući uzroke oštećenje došlo se do zaključka da cevovod radi zajedno sa mostom i da se to sadejstvo mora uzeti u obzir kako bi se izbegle predhodne greške.

Statički proračun uticaja sadejstva mosta i cevi je sprovedena primenom programa SAP2000, za slučaj opterećenja teškim vozilom. Korišćena je simetrija nosača. Upotrebljen je 3D linijski

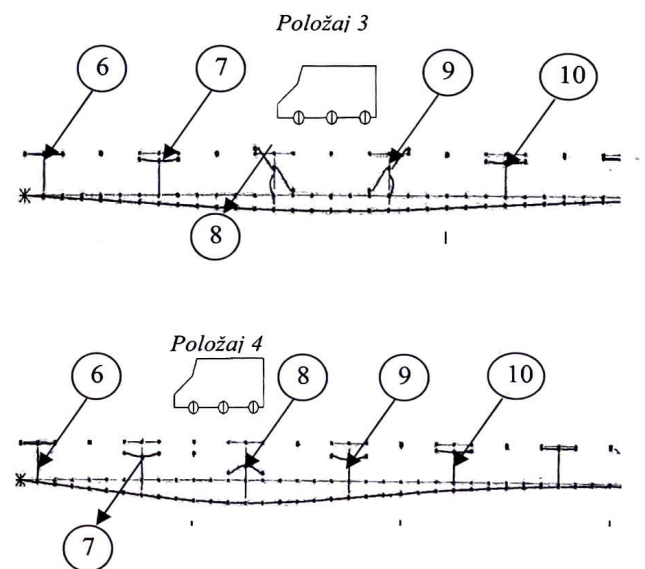


Slika 4. Deformacija sistema za vešanje u sredini mosta

element, kako bi se dobio jednostavan model pogodan za dalju analizu. Razmatrani su različiti položaji teškog vozila. ozilo je

Na slikama 4 i 5 prikazana je proračunom dobijena deformacija elemenata sistema za vešanje i cevi, za dva položaja teškog vozila: u sredini i na kraju mosta. Numerička analiza je pokazala da su kritični položaji pokretnog opterećenja, tj. položaji pri kojima se javlja maksimalno vertikalno pomeranje konstrukcije i cevovoda, mesta gde je debljina ortotropne ploče najmanja (10 mm). Merenjima deformacija je utvrđeno da su se upravo na tim mestima dogodila najveća oštećenja sistema za vešanje.

Lokalna deformacija elemenata mosta izazvana dejstvom teškog vozila dovela je do velikih vertikalnih pomeranja elemenata mosta i sistema za vešanje. Pri tome se cev, kao znatno kruća, nije deformisala, zbog čega je došlo do odvajanja cevi od sistema za vešanje. Usled toga je raspon vešanja cevi na mestu odvajanja povećan sa projektovanih 4.66 m na 9.32 m. Samim tim, povećano je opterećenje na vešaljke, zbog čega je došlo do prekoračenja nosivosti u elementima sistema za vešanja. Otkazivanje jedne vešaljke automatski je povećalo raspona vešanja cevi, usled čega je došlo do preopterećenja susednih vešaljki. Na velikom broju vešaljki je došlo do loma, bilo na mestu veze vešaljke i obujmice, bilo u osnovnom materijalu obujmice. Progradnim procesom, raspon vešanja cevi je na jednom mestu dostigao čak 26.5 m. Preopterećenje krajnjih vešaljki u tim poljima je dovelo do pojave nedozvoljenih deformacija u nosačima vešaljki, kao i u poprečnim nosačima mosta i ortotropnoj ploči.



Slika 5. Deformacija sistema za vešanje na kraju mosta

Tabela 1. Sile u vešaljka na Brankovom mostu usled dejstva teškog vozila na sredini mosta

Redni broj vešaljke	Sila [kN]				
	Stalno opterećenje (1)	Saobraćajno opterećenje 1 (2)	Saobraćajno opterećenje 2 (3)	(1) + (2)	(1) + (3)
1	25.97	17.51	10.11	43.48	36.08
2	25.90	43.28	30.40	69.18	56.30
3	25.83	-115.27	-36.02	-89.44	-10.19
4	25.79	43.24	-36.04	69.01	-10.25
5	25.78	17.47	30.35	43.25	56.13

Tabela 2. Sile u vešaljka na Brankovom mostu usled dejstva teškog vozila na kraju mosta

Redni broj vešaljke	Sila [kN]				
	(1) Stalno opterećenje	(2) Saobraćajno opterećenje 3	(3) Saobraćajno opterećenje 4	(1) + (2)	(1) + (3)
6	7.39	5.7	3.66	13.09	11.05
7	20.53	42.97	31.31	63.5	51.84
8	26.71	-112.02	-33.51	-85.31	-6.8
9	28.52	45.14	-34.51	73.66	-5.99
10	28.52	18.63	31.32	47.15	59.84

U Tabeli 1. date su vrednosti sila u karakterističnim vešaljka usled stalnog i saobraćajnog opterećenja. Znak minus (označava pritisak, koji se inače ne može javiti u štapovima vešaljke) ukazuje da je vešaljka odvojena od cevovoda.

Nakon prikazane analize dat je predlog za zamenu postojećeg sistema vešanja novim sistemom, kod koga raspon između vešaljki treba odrediti tako da pri saobraćajnom opterećenju ne dođe do pojave odvajanja vešaljki od cevovoda usled deformacije mosta.

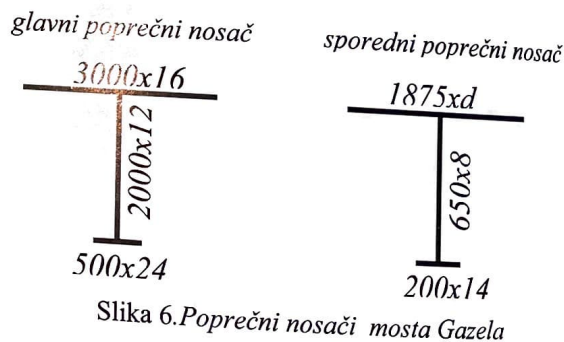
3. Most Gazela

Statički sistem mosta se može definisati kao plitak uklješten okvir, na tri polja raspona 63 + 206 + 63 m.

Proračunski model mosta čine dva sandučasta nosača na osovinskom rastojanju od 17.6 m, koji su povezani poprečnim nosačima. Postoje dve vrste poprečnih nosača:

- **Glavni poprečni nosači** su postavljeni simetrično, na rastojanju od krajnjih stubova mosta: 16.94 m, 39.43 m, 76.94 m, 114.44 m, 151.94m.
- **Sporadni poprečni nosači** leže na razmaku od 1.875 m.

Dimenzije poprečnih nosača su date na slici 6.



Slika 6. Poprečni nosači mosta Gazela

3.1 Opis cevovoda i sistema vešanja

Cevovod preko mosta se sastoji od tri vodovodne cevi $\varnothing 500$, koje prolaze čitavom dužinom čelične konstrukcije mosta. Dve cevi, I i II su postavljene uz sandučasti nosač na nizvodnoj strani, na rastojanju 1000 mm odnosno 4150 mm od nosača do ose cevi. Cev III, je postavljena uz glavni nosač na uzvodnoj strani na osovinskom rastojanju 1000 mm od kraja sandučastog preseka.

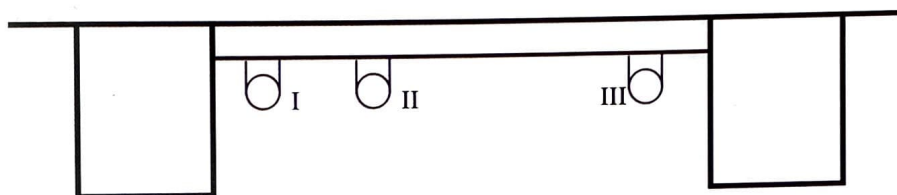
Cevi su po originalnom projektu napravljene od lima debljine 6,3 mm kvaliteta Č0361, koji je zakrivljen na potreban prečnik, a potom je podužno zavaren u radionici. Sada, na sve tri cevi, postoji deo koji je zamenjen spiralno zavarenim cevima u dužini oko 110 m.

Cevi su smeštene su ispod kolovozne ploče, između glavnih nosača mosta, uz revizine staze, Slika 6. Obešene su o poprečne nosače mosta sistemom vešaljki. Shematski prikaz poprečnog preseka mosta i vodovodnih cevi dat je na Slici 7.

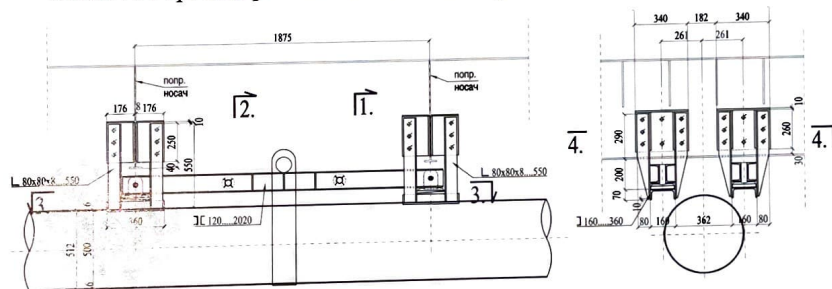
Sistem za vešanje sastoji se od dva nosača cevi [120 i obujmice vešaljke. Nosači cevi su postavljeni između poprečnih nosača mosta. Obujmica, #150x10mm, obuhvata cev i prenosi silu na dva nosača cevi preko pokretnog sistema vešanja koji je konstruisan tako da omogućava nesmetano pomeranje vešaljke u horizontalnom pravcu. Cevi su obešene o sistem za vešanje na svakih 7.5 m. Osnovni elementi sistema za vešanje prikazani su na Slici 8.



Slika 6. Cevovod na mostu Gazela



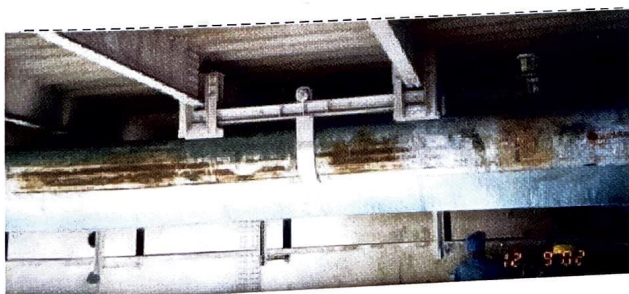
Slika 7. Poprečni presek mosta Gazela i položaj vodovodnih cevi



Slika 8. Sistem vešanja cevi na mostu Gazela

2.2 Stanje cevovoda i sistema vešanja

Pregled stanja cevovoda na mostu je obavila stručna ekipa 'Mostprojekta', u periodu od 10.09. do 14.11.2002. god. što je prikazano u [5]. Nisu konstatovana konstruktivna oštećenja cevovoda. Karakteristična oštećenja cevi evidentirana su na mestima kontakta sa kaišom vešaljke, jer pri dilatiranju cevi ne dolazi do kotrljanja točkova već do njenog proklizavanja kroz obujmicu. Na tim mestima je skinut zaštitni premaz i došlo je do korozije cevi.



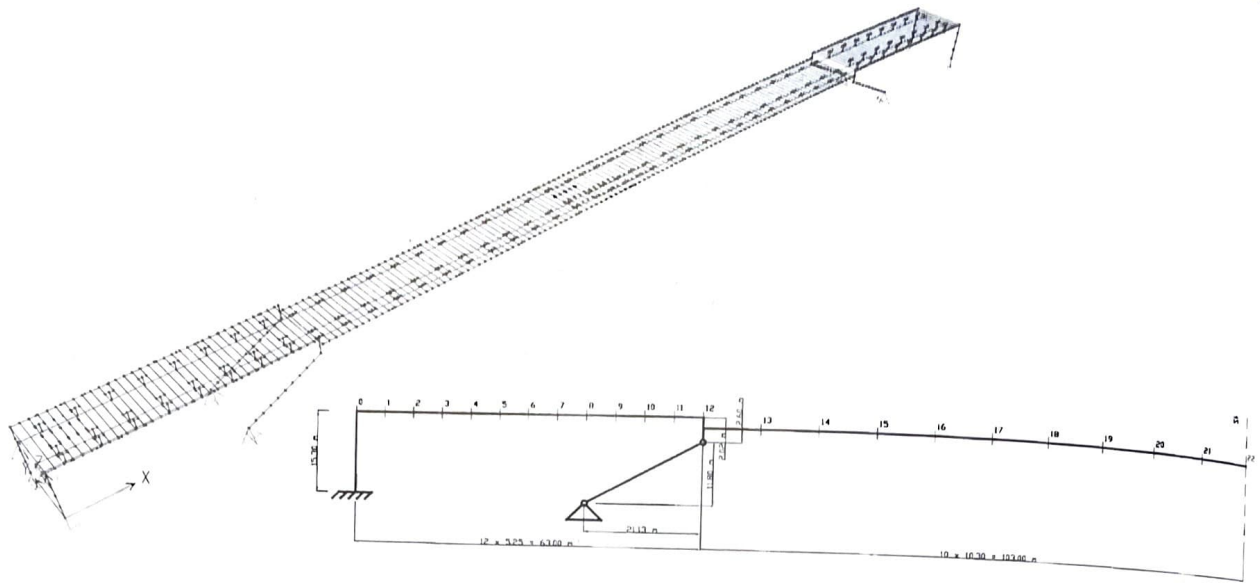
Slika 9. Korozija cevi

2.3 Analiza uticaja sadejstva mosta i cevovoda

Za most Gazela urađena je statička analiza interakcije cevovoda i mosta pri saobraćajnom opterećenju. Proračunski model mosta, prikazan na slici 10, se sastoji od 1831 konačnih elemenata. Sadejstvo kolovozne konstrukcije i sistema za vešanje je analiziran za različite položaje teškog vozila, kako po širini, tako i po dužini mosta primenom programa SAP2000. Analizirani su slučajevi saobraćajnog opterećenja za sledeće položaje točkova vozila, mereno od prvog stuba mosta (S0):

1. POK1: $x = 146.3125, 147.8125, 149.3125$ m
2. POK2: $x = 3.8125, 5.3125, 6.8125$ m

Za svaki od navedenih položaja opterećenja duž ose nosača (Slika 11) sračunati su uticaji za 6 položaja opterećenja u preseku (po 3 na svakoj traci), i to za sledeće položaje osovine teškog vozila u odnosu na osu glavnog nosača:

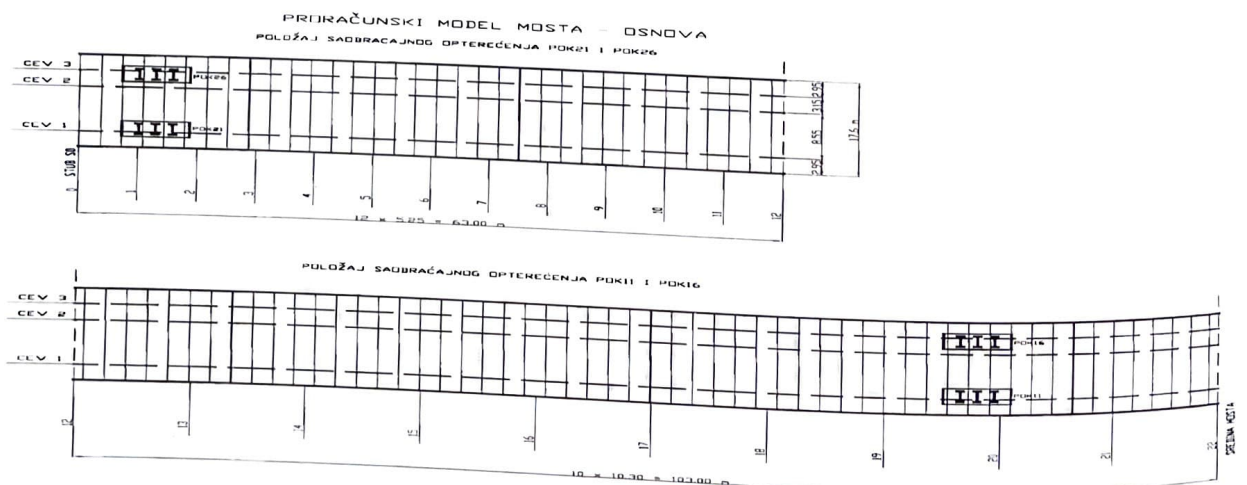


Slika 10. 3D i 2D prikaz modela mosta

1. POK11 i POK21 $y = 3,55$ m
2. POK12 i POK22 $y = 6,55$ m
3. POK13 i POK14 $y = 7,05$ m
4. POK23 i POK24 $y = 10,55$ m
5. POK15 i POK25 $y = 11,05$ m
6. POK16 i POK26 $y = 14,05$ m

Analiza više položaja teškog vozila ($3 \times 200 = 600$ kN) duž mosta je pokazala se da su kritični položaji u zoni krajnjih stubova mosta ($x = 3,8125$ m), gde ortotropna ploča ima najmanju debljinu ($d_p = 10$ mm) i na 20 m od sredine mosta

($x = 146,3125$ m), gde ortotropna ploča menja debljinu sa 20 na 18 mm. Pomeranjem vozila u karakterističnom preseku po širini mosta, od pešačkih staza ka sredini kolovozne trake, dobilo se da je najnepovoljniji položaj teškog vozila za vodovodne cevi II i III, sredinom saobraćajne trake neposredno uz razdelnu traku mosta (POK15, POK25), dok je za cev I najnepovoljniji slučaj kada se točkovi teškog vozila kreću uz ivicu razdelne trake na mostu (POK12, POK22).



Slika 11. Prikaz položaja opterećenja

Pri različitim položajima teškog vozila, najnepovoljniji uticaji se javljaju kod cevi II koja je najudaljenija od ose glavnih nosača.

Deformacija cevi II i sistema za vešanje prikazana je na Slikama 12 i 13. Usled opterećenja teškim vozilom došlo je do pojave sila pritiska u pojedinim vešaljka. To ukazuje da je došlo do odizanja cevi od vešaljke i povećanja raspona vešanja cevi sa 7.5 na 15.0 m. Proračun je ponovljen tako što su isključene sve pritisnute vešaljke. Povećanje raspona vešanja cevi je prouzrokovalo povećanje sila u susednim, preopterećenim vešaljka. Međutim, kontrola napona je pokazala da u tom slučaju napon

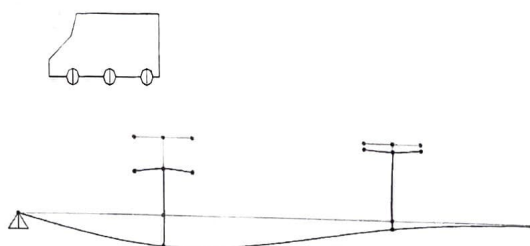
dostize samo 10% nosivosti vešaljke, odnosno 40% nosivosti nosača vešaljke.

U Tabelama 3 i 4 date su vrednosti sila u vešaljka cevi II za najnepovoljnije položaje teškog vozila.

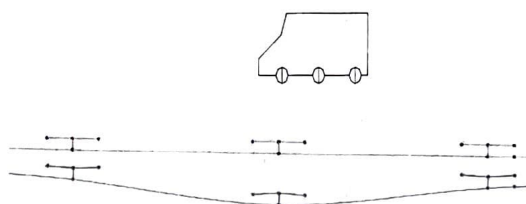
Može se zaključiti da je usled izvesnog sadejstva cevovoda i mosta pri dejstvu saobraćajnog opterećenja došlo do mestimičnog odizanja cevi od vešaljke, ali da to ne ugrožava nosivost cevi i sistema vešanja.

Na osnovu rezultata proračuna dobijenog primenom programa SAP2000, zaključeno je da projektovani sistem vešanja obezbeđuje dobru nosivost vodovodnih cevi i da nije potrebno vršiti izmenu niti ojačanje nosača cevovoda.

Položaj 1

Slika 12. Deformacija sistema za vešanje cevi II na rastojanju $x=3,8125$ m od kraja mosta

Položaj 2

Slika 13. Deformacija sistema za vešanje cevi II na rastojanju $x=146,3125$ m od kraja mostaTabela 3. Sile u vešaljka usled dejstva teškog vozila na na rastojanju $x=3,8125$ m od kraja mosta

Redni broj vešaljke	Sila [kN]		
	(1) Stalno opterećenje	(2) Saobraćajno opterećenje 1	(1) + (2)
1	15,77	-40,0	-24,23
2	21,68	25,04	46,72
3	20,11	-6,55	13,56
4	20,25	0,4	20,65

Tabela 4. Sile u vešaljka usled dejstva teškog vozila na na rastojanju $x=146,3125$ m od kraja mosta

Redni broj vešaljke	Sila [kN]		
	(1) Stalno opterećenje	(2) Saobraćajno opterećenje 2	(1) + (2)
1	20,21	-5,86	14,35
2	20,26	18,24	38,51
3	20,33	-26,47	-6,14
4	17,23	19,71	36,94
5	18,55	-5,73	12,82

4. Zaključak

U ovom radu prikazan je uticaj sadejstva konstrukcije mosta i cevovoda na naponsko-deformacijsko stanje cevovoda i sistema za vešanje pri dejstvu saobraćajnog opterećenja.

U slučaju Brankovog mosta pokazalo se da je sistem za vešanje vodovodnih cevi pretrpeo velika oštećenja i to najviše na mestima gde je debljina ortotropne ploče najmanja. Naime, usled velikih vertikalnih pomeranja pri dejstvu teškog vozila, dolazi do spuštanja sistema za vešanje i odvajanja cevovoda od vešaljki. Usled gubitka oslanjanja i povećanja raspona vešanja cevovoda, dolazi do povećanja opterećenja u pojedinim slonačkim elementima i prekoračenja nosivosti u pojedinim elementima sistema za vešanje.

Na mostu Gazela deformacija ortotropne ploče izazvana dejstvom saobraćajnog opterećenja nije bitno uticala na naponsko-deformacijsko stanje cevovoda i sistema za vešanje. I ovde u pojedinim vešaljka dolazi do pojave spuštanja vešaljki, tj. do povećanja raspona vešanja cevi a samim tim i do povećanja opterećenja susednih vešaljki. Međutim, zbog solidne konstrukcije sistema vešanja ne dolazi do prekoračenja nosivosti elemenata sistema za vešanje, tako da nosivost cevovoda nije ugrožena.

Na osnovu prikazane analize može se zaključiti sledeće:

- Sadejstvo mosta i cevovoda pri dejstvu saobraćajnog opterećenja može bitno uticati na naponsko-deformacijsko stanje cevovoda i sistema za vešanje, pa se neizostavno mora uzeti u obzir pri određivanju dužine vešanja cevovoda kao i u statičkom proračunu sistema za vešanje.
- Nanalizu interakcije treba sprovesti na jednostavnom linijskom modelu, koji treba da dobro aproksimira krutost mostovske konstrukcije i ukaže na moguće nepovoljno delovanje lokalnih deformacija na sistem za vešanje cevovoda.

- Takav model je pogodan i za određivanje raspona vešanja cevi tako da se pojava interakcije svede na najmanju meru. Naime, povećanjem raspona vešanja raste i opterećenje na vešaljke, tako da cev prati deformaciju nosača usled saobraćajnog opterećenja.
- U slučaju da se velike deformacije sistema ne mogu eliminisati menjati sistem vešanja.
- Veza između cevovoda i konstrukcije mosta treba da bude takva da saobraćajno opterećenje u što manjoj meri utiče na deformaciju cevovoda kako bi se izbegla eventualna oštećenja cevovoda i obezbedila njegova funkcionalnost u pogledu vodosnabdevanja.

5. Literatura

- [1] SAP2000 Nonlinear, Computers & Structures Inc.
- [2] Shernjood D.R, D.J. Whistance: The "Piping guide", E & F. Spoon-Limited, London
- [3] Bridge crossings with ductile iron pipe, www.dipra.org.
- [4] Petronijević M., Nefovska M., Water-Pipes Bridge Structure Interaction, 10th Symposium of Macedonian Association of Structural Engineers, Ohrid, 25-27 September, 2003
- [5] "Detaljni pregled mosta "Gazela" - konstrukcija preko reke" (sveska2) - MOSTPROJEKT, 2002. god.