
DGKS

DRUŠTVO GRAĐEVINSKIH KONSTRUKTERA SRBIJE

14. KONGRES

NOVI SAD
24-26. SEPTEMBAR

2014.

14

K

O

N

G

R

E

S

2014

U SARADNJI SA:



**GRAĐEVINSKIM FAKULTETOM
UNIVERZITETA U BEOGRADU**

**MINISTARSTVOM PROSVETE,
NAUKE I TEHNOLOŠKOG RAZVOJA
REPUBLIKE SRBIJE**



**INŽENJERSKOM KOMOROM
SRBIJE**

ZBORNİK RADOVA



**CHINA ROAD AND BRIDGE
CORPORATION SERBIA BRANCH**

Izdavač: **Društvo građevinskih konstruktora Srbije**
Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73/1

Urednici: prof. dr **Miloš Lazović**
prof. dr **Boško Stevanović**

Tehnička
priprema: **Saška - Stoja Todorović**

Priprema za
štampu: **Nebojša Ćosić**

Štampa: **DC Grafički centar**

Tiraž: **150 primeraka**

Beograd, septembar 2014.

ORGANIZACIONI ODBOR

PRESEDNIŠTVO DGKS

Prof. dr Miloš LAZOVIĆ, dipl.inž.grad., predsednik
Aleksandar BOJOVIĆ, dipl.inž.grad., potpredsednik
Prof. dr Boško STEVANOVIĆ, dipl.inž.grad., sekretar
Prof. dr Đorđe VUKSANOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Mihajlo ĐURĐEVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Dragoslav STOJIC, dipl.inž.grad.
Prof. dr Đorđe LADINOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Snežana MARINKOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Aleksandar RISTOVSKI, dipl.inž.grad.
Doc. dr Bratislav STIPANIĆ, dipl.inž.grad.
Dr Zoran FLORIĆ, dipl.inž.grad.
Mr Slobodan GRKOVIĆ, dipl.inž.grad.
Branko KNEŽEVIĆ, dipl.inž.grad.
Gojko GRBIĆ, dipl.inž.grad.
Goran VUKOBRATOVIĆ, dipl.inž.grad.
Đorđe PAVKOV, dipl.inž.grad.
Svetislav SIMOVIĆ, dipl.inž.grad.

ČLANOVI ORGANIZACIONOG ODBORA IZVAN PRESEDNIŠTVA

Prof. dr Zlatko MARKOVIĆ, dipl.inž. grad.
Miroslav MIHAJLOVIĆ, dipl.inž.grad.
Aleksandar TRAJKOVIĆ, dipl.inž.grad.

NAUČNO-STRUČNI ODBOR

1. Prof. dr Radenko Pejović, Građevinski fakultet Podgorica, Crna Gora
2. Prof. dr Duško Lučić, Građevinski fakultet Podgorica, Crna Gora
3. Prof. dr Goran Markovski, Univerzitet "Kiril i Metodij" Gradežen fakultet, Skopje, Makedonija
4. Prof. dr Meri Cvetkovska, Univerzitet "Kiril i Metodij" Gradežen fakultet, Skopje, Makedonija
5. Prof. dr Tatjana Isaković, Univerzitet u Ljubljani Fakultet građevinarstva i geodezije, Ljubljana, Slovenija
6. Prof. dr Viktor Markelj, Ponting d.o.o., Maribor, Slovenija
7. Prof. dr Zlatko Šavor, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, Katedra za mostove, Zagreb, Hrvatska
8. Prof. dr Radu Bancila, University "POLYTEHNICA", Temišvar, Rumunija
9. Mr Predrag Popović, Čikago, SAD
10. Prof. dr Kostadin Topurov, Sofija, Bugarska
11. Prof. dr Dušan Najdanović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
12. Prof. dr Miloš Lazović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
13. Prof. dr Đorđe Vuksanović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
14. Prof. dr Dejan Bajić, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
15. Prof. dr Đorđe Ladinović, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
16. Prof. dr Dragoslav Stojčić, Arhitektonsko-građevinski fakultet, Niš, Srbija
17. Doc. dr Bratislav Stipanić, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija

14. KONGRES JE ORGANIZOVAN U SARADNJI SA:

GRAĐEVINSKIM FAKULTETOM UNIVERZITETA U
BEOGRADU

MINISTARSTVOM PROSVETE, NAUKE I TEHNOLOŠKOG
RAZVOJA REPUBLIKE SRBIJE

INŽENJERSKOM KOMOROM SRBIJE, Beograd

DONATORI SIMPOZIJUMA:

DIJAMANTSKI

CHINA ROAD & BRIDGE CORPORATION, SERBIA BRANCH,
Belgrade

SREBRNI

SIKA d.o.o., Novi Sad

BRONZANI

"POTISJE KANJIŽA" AD, Kanjiža

*Aleksandar Bojović¹, Zlatko Marković², Antonio Mora³, Luciano Casasola⁴,
Dimitrije Aleksić⁵, Marko Pavlović⁶, Milan Spremić⁷, Novak Novaković⁸*

ŽELEZNIČKO-DRUMSKI MOST U NOVOM SADU – RACIONALNOST KONSTRUKCIJE MOSTA

Rezime:

Železničko-drumski most preko Dunava u Novom Sadu je u toku gradnje. Most ima dva koloseka, dve drumske trake i dve pešačke staze i širok je 31,440 m. Razmaci stubova su 27+178,5+220,5+ 48 m, pa je ukupna dužina mosta 474 m. Na dva centralna raspona su čelični lukovi sa zategom, dijagonalnim vešaljka i spregnutom kolovoznom konstrukcijom. Konstrukcija mosta (glavni noseći sistemi, vešaljke i kolovozne konstrukcije) je vrlo racionalna po količini materijala i koštanju izgradnje.

Ključne reči: železnički most, lučni most, čelični most.

RAILWAY ROAD BRIDGE IN NOVI SAD – RATIONALITY OF THE BRIDGE STRUCTURE

Summary:

The construction of Railway Road Bridge across the Danube in Novi Sad is in progress. The bridge is designed for two railway tracks, two road lanes and two footpaths, with total width of 31,440 m. The distances of the piers are 27+178,5+220,5+48 m and total bridge length is 474 m. On the central two spans are steel tied arches with network hangers and composite decks. In the article is presented the rationality of the bridge structure – main bearing systems, hangers and deck structures – according to steel material quantities and total construction costs.

Key words: railway bridge, arch bridge, steel bridge.

¹ dipl.ing. građ, odgovorni projektant; tehnički direktor, DEL ING DOO, Beograd, Jastrebovljeva 25.

² Prof. dr dipl.ing. građ, projektant, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73.

³ MScCE, rukovodilac izgradnje mosta, JV Azvi-Taddei-Horta Coslada, Novi Sad, Kej skojevaca bb.

⁴ MScCE, pomoćnik rukovodioca izgradnje mosta, JV Azvi-Taddei-Horta Coslada, Novi Sad, Kej skojevaca bb.

⁵ dipl.ing. građ, projektant; direktor, DEL ING DOO, Beograd, Jastrebovljeva 25.

⁶ dr dipl.ing. građ, projektant, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73.

⁷ dr dipl.ing. građ, projektant, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73.

⁸ dipl.ing. građ, projektant; DEL ING DOO, Beograd, Jastrebovljeva 25.

1 UVOD

Železničko-drumski most preko Dunava u Novom Sadu je u toku gradnje, *slika 1, slika 2*. Most se nalazi na lokaciji prethodnog drumsko-železničkog mosta (1961-1999), srušenog u vazдушnim napadima 1999. Most je na trasi međunarodne magistralne pruge broj 2, Beograd - Novi Sad – Subotica - Državna granica – Budimpešta.

Most gradi italijansko-španski konzorcijum firmi AZVI-Taddei-Horta Coslada na osnovu ugovora sa investitorom – Železnicama Srbije. Gradnju mosta finansiraju Delegacija Evropske komisije za Republiku Srbiju, AP Vojvodina i Grad Novi Sad. Pregled ušesnika izgradnje videti u t. 4.

Projektanti i rukovodioci izgradnje mosta su objavili više radova o mostu u domaćoj i inostranoj stručnoj javnosti, (videti literaturu [2] do [6]), u kojima su izloženi razni aspekti Glavnog projekta mosta [1], izrade i montaže konstrukcije. U ovom uvodu će se stoga samo kratko ponoviti osnovne karakteristike Projektnog zadatka i samog mosta. U narednim poglavljima članka biće reč o racionalnosti konstrukcije i minimalnom koštanju mosta – aspektima koji su u prethodnim člancima o mostu samo kratko i generalno pomenuti.



Slika 1 – Železničko-drumskog mosta u Novom Sadu: vizuelizacija i u izgradnji.

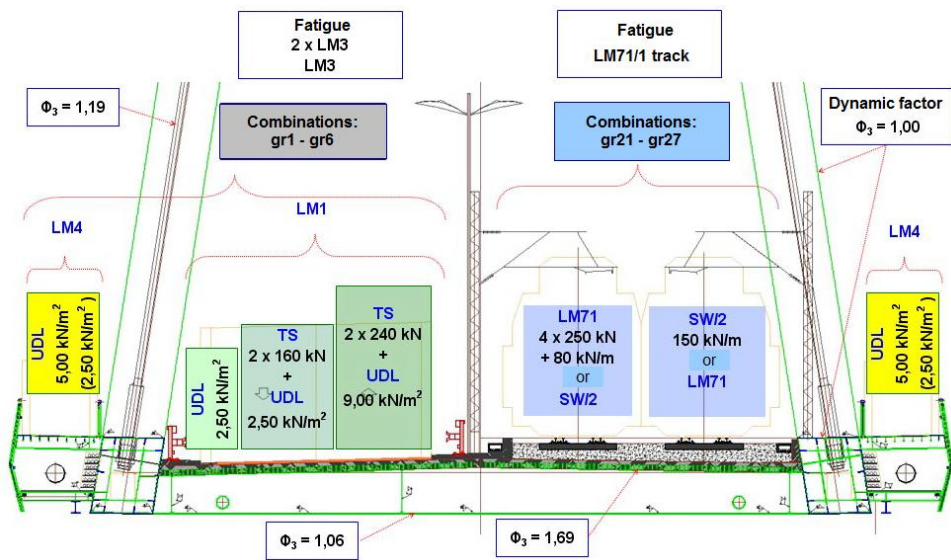
1.1 Projektni zadatak

Projektni zadatak sastavljen od strane Železnica Srbije sadržao je sledeće osnovne zahteve:

- lokacija mosta: lokacija starog mosta, na trasi međunarodne magistralne pruge broj 2 Beograd - Stara Pazova – Indija – Subotica - državna granica – Budimpešta;
- saobraćaj na mostu: 2 koloseka + 2 drumske trake + 2 pešačke staze, *slika 2*;
- sistem konstrukcije: lučni, čelični; (ovo je bio urbanistički uslov);
- brzine vozova: putnički 160 km/h, teretni 120 km/h; vertikalno ubrzanje konstrukcije $a_v \leq 1,3 \text{ m/s}^2$;
- saobraćajnice: razmak koloseka = 4,20 m, drumske trake = 2 x (3,50+0,35) m;
- instalacije na mostu: dve vodovodne cevi 2 x $\Phi 610$ mm, razni električni i telekomunikacioni kablovi, rasveta javna i dekorativna, saobraćajna signalizacija, sistem za odvodnjavanje;
- fundiranje: iskoristiti temelje starog mosta u meri koliko je to moguće;
- norme za projektovanje: vodeća norma Smernice Nemačkih železnica Ril 804:2003 [9] i sa njima u vezi norme serije DIN-Fachbericht 101 do 104 izdanje 2009, tj. odgovarajuće

aktuelne Evropske norme serija EN 1990, EN 1991, EN 1992, EN 1993, EN 1994 i EN 1998.

Posebno važan uslov, postavljen 2009. prilikom izrade Idejnog projekta je bio da most ne sme da košta više od 60 miliona EUR, uprkos velikom saobraćajnom opterećenju, veličini raspona i izuzetno strogim tehničkim uslovima pomenutih normi za projektovanje. Ovakav uslov inače nije nikad postavljen, ili je to bilo izuzetno retko, za gradnju bilo kog mosta u Srbiji.



Slika 2 – Saobraćajna opterećenja, opterećenja za proračun zamora i dinamički koeficijenti komponenta konstrukcije mosta.

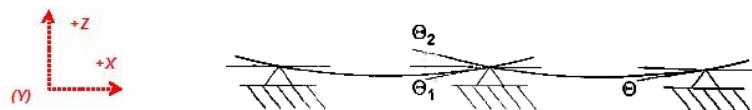
1.2 Osnovne tehničke karakteristike mosta

Osnovne tehničke karakteristike mosta, slika 1:

- Razmak osa stubova 1-2-3-4-5, od desne ka levoj obali: 27,0+178,5+220,5+48,5 m.
- Statički sistem - četiri nezavisne proste grede, raspona i razmaka: 25,3 + (1,7) + 177,0 + (3,0) + 219,0 + (1,7) + 45,3 = 474,0 m. Širina svih mostova je $B = 31,440$ m.
- Prilazni mostovi na desnoj i levoj obali: Konstrukciju mostova čine dve bočne čelične grede (preseka jednakog preseku zatega lučnih mostova) i centralna spregnuta greda. Grede su spojene poprečnim nosačima spregnutim sa armiranobetonском kolovoznom pločom $t_c = 300$ mm.
- Mostovi preko Dunava: Dva lučna mosta sistema punih lukova sa zategama, raspona 177,00 m i 219,00 m i visina lukova $H = 34,0$ m i 42,0 m, gde je $L/H = 5,21$. Vešaljke su kablovi u dijagonalnom rasporedu, nepovezane na mestima ukrštanja i na međusobnom osnom razmaku od $e = 300$ mm. Kolovozna konstrukcija je spregnuta – poprečni nosači sa armiranobetonском kolovoznom pločom $t_c = 300$ i 400 mm. Kolovozna ploča je takođe spregnuta i sa zategama u horizontalnoj ravni, povećavajući tako krutost mosta u horizontalnoj ravni.

- Materijali konstrukcije: čelik klase S355 po EN 10025-2:2004 i vrlo male količine S460 po EN 10025-3:2004, kablovi od paralelnih strukova zatezne čvrstoće žice $f_u \geq 1860 \text{ N/mm}^2$, beton kolovozne ploče klasa C35/45 i C40/50 po EN 206:2000, armaturni čelik B500B ili B500C po EN 10080:2005.
- Sve četiri mostovske konstrukcije su izuzetno krute. Krutost konstrukcija diktirana je strogim zahtevima DIN-Fachbericht 101:2009 i to pre svega ograničenjima uglova rotacija na osloncima, odnosno zbirnih rotacija dveju susednih mostovskih konstrukcija. Izračunate vrednosti deformacija date su tabelom 1. Ovde treba naglasiti da je uslov o ograničenju ugiba mosta pod železničkim opterećenjem od $L/800$ ili čak $L/600$ uveliko nadvladan uslovom ograničenja rotacija ili zbira rotacija dve susedne mostovske konstrukcije. Da bi se ispunio uslov ograničenja rotacija ugibi moraju da budu mnogo manji od $L/800$, gde je L raspon mosta.

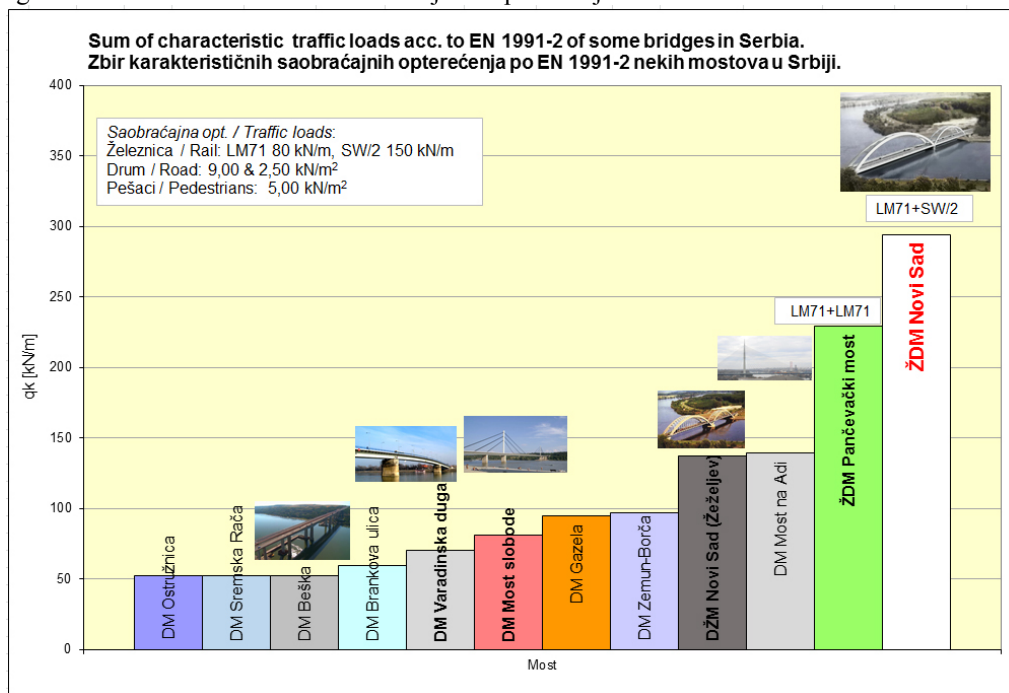
Tabela 1: Pregled deformacija mostovskih konstrukcija prema [1].

Deformacija	Most 1-2A $L = 25,3 \text{ m}$	Most 2-3A $L = 177,0 \text{ m}$	Most 3B-4 $L = 219,0 \text{ m}$	Most 4B-5 $L = 46,3 \text{ m}$
Železnica: Ugibi od LM71/Kolosek 2	$\max \delta_z = 5 \text{ mm}$ $= L/5060$ $< L/800$	$\max \delta_z = 53 \text{ mm}$ $= L/3345$ $< L/800$	$\max \delta_z = 65 \text{ mm}$ $= L/3388$ $< L/800$	$\max \delta_z = 11 \text{ mm}$ $= L/4118$ $< L/800$
Rotacije na osloncima LM71/Kolosek 2 + $+ \Delta T_M$	Kod osa 2 i 2A: $\theta_1 + \theta_2 = 2,3 \text{ mrad}$	Kod 3A i 3B, srednji stub: $\theta_1 + \theta_2 = 3,7 \text{ mrad}$	Kod osa 3B i 4: $\theta_1 + \theta_2 = 3,1 \text{ mrad}$	Uslov DIN-Fb 101: $\theta_1 + \theta_2 \leq 5 \text{ mrad}$
Drum, uzvodna strana: Ugibi od LMI	$\max \delta_z = 4 \text{ mm}$	$\max \delta_z = 34 \text{ mm}$	$\max \delta_z = 43 \text{ mm}$	$\max \delta_z = 13 \text{ mm}$
Oznake osa i uglova rotacija				

Železničko-drumski most (ŽDM) u Novom Sadu je ujedno i most sa najvećim saobraćajnim opterećenjem u Srbiji. Ako, naime, za sve železničke i drumske mostove (DM) sa slike izračunamo vrednosti podeljenih opterećenja [kN/m] mosta, na osnovu širina kolovoza i pešačkih staza, odnosno broja koloseka, prema intenzitetima saobraćajnih opterećenja prema EN 1990:2002+A1:2005, dobiju se vrednosti dužnih opterećenja datim slikom – slika 2. Pri tom su osovinska opterećenja zanemarena, gde su osovinska opterećenja železnicom veća od osovinskih opterećenja tandemima osovina kod drumskih mostova.

Ovde treba dodati i izuzetno veliki intenzitet stalnih opterećenja mosta od $g_{2,k} = 223 \text{ kN/m}$ što je približno jednako zbiru težine konstrukcije ($g_{1,k}$) i stalnih opterećenja ($g_{2,k}$) Drumskog mosta Gazela! Iz slike je vidljivo da su saobraćajna opterećenja ŽDM u Novom Sadu dva puta veća od istih na Drumskom mostu na Adi i srušenom DŽ mostu u Novom Sadu („Žeželjevom“ mostu), 3 puta veća na Drumskom mostu Gazela, a čak 6 puta veća od saobraćajnih opterećenja Drumskog mosta kod Beške. Mogu se porediti jedino sa DŽM kod Pančeva, ali u

vreme projektovanja Pančevačkog mosta nije postojala teška šema opterećenja SW/2 koja je ugladnom merodavna u svim kombinacijama opterećenja.



Slika 3 – Zbir karakterističnih vrednosti saobraćajnih opterećenja nekih mostova u Srbiji.

2 RACIONALNOST KONSTRUKCIJE MOSTA

2.1 Opšte

Pomenuto je već da je koštanje izgradnje mosta bilo ograničeno još pre početka izrade Idejnog projekta, na 60 miliona evra. Ovo je bio uslov jednog od dva finansijera izgradnje mosta - Evropske agencije za rekonstrukciju, kasnije preimenovane u Delegaciju Evropske komisije za Republiku Srbiju. Razumljivo je odatle da je rešenje konstrukcije mosta (čije je koštanje oko 70% koštanja mosta u celini), kao celina i u svim svojim detaljima moralo da bude minimalno moguće uprkos izuzetno oštrim uslovima upotrebljivosti po DIN-Fachbericht 101:2009 i EN 1990:2002+A1:2005, rekordnim rasponima lučnih delova (177 i 219 m) i visokim intenzitetima stalnih opterećenja i saobraćajnih opterećenja. Cilj jevtine konstrukcije je dostignut Idejnim projektom, dok je Glavnim projektom [1] dodatno racionalizovan.

Glavne teme na postizanju racionalne konstrukcije mosta su bile:

- izbor statičkog sistema glavnog nosećeg sistema;
- izbor vrste vešaljki;
- izbor vrste kolovozne konstrukcije;
- ciljane količine čelika za noseće konstrukcije, lučne i gredne.

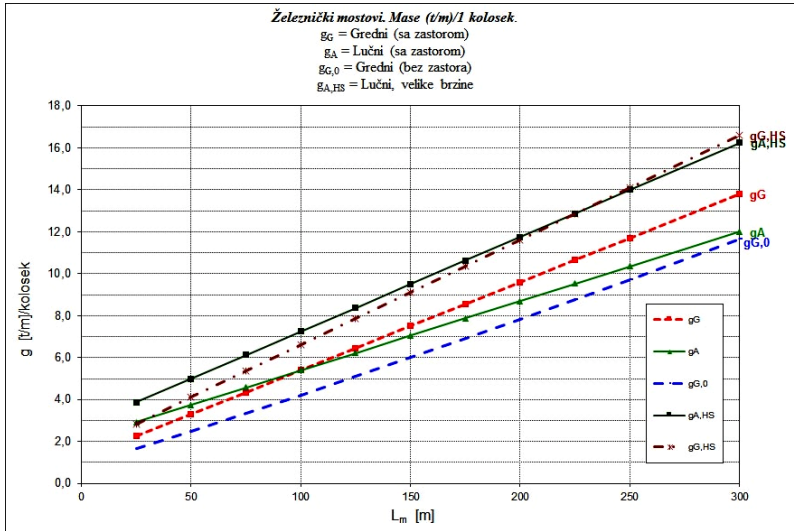
2.2 Statički sistem lučnih delova mosta

Urbanistički uslov grada Novog Sada je bio da most mora da bude lučni i čelični. Ovim zahtevom je izbor mogućih sistema noseće konstrukcije mosta unapred sužen. Namera urbanista je verovatno bila da obnovi nekadašnju vizuru mosta. Ovom prilikom zanemarimo prethodni uslov i razmotrimo primenljivost mogućih statičkih sistema železničko-drumskog mosta na rasponima od oko 180 i 220 m – *tabela 2*.

Tabela 2: Teoretski mogući statički sistemi mosta, dela preko Dunava

<i>Statički sistem</i>	<i>Karakteristike i primenljivost</i>
Rešetkasta greda	Teoretski moguć sistem, bolje kao kontinualna greda nego dve proste grede. Prednosti: klasična dobro poznata konstrukcija za projektovanje i izradu. Nedostaci: Estetski na granici prihvatljivosti, veći utrošak čelika od lukova (<i>slika 4</i>), mnogo veći rad na radioničkoj izradi u odnosu na konkurentske sisteme.
Puna greda	Obzirom na veličine raspona i položaj nivelete pruge i puta u odnosu na gornju ivicu plovnog profila, neprimenljiv sistem sa saobraćajem na gornjem pojasu. Varijanta sa saobraćajem kroz punu sandučastu konstrukciju – potpuno neprihvatljiva.
Most sa kosim kablovima	Teoretski moguć sa pilonom na srednjem stubu. Obzirom na veliku potrebnu krutost grede zbog uslova upotrebljivosti, primenljiv uz velike teškoće obzirom da je na raspolaganju samo 2,55 m visine grede.
Luk, uklješeni luk (<i>Slika 6</i>)	Ovo je bio statički sistem drumsko-železničkog mosta 1961-1999. Osnovni uslov za ovakve mostove nije ispunjen – tlo koje može pouzdano da primi ogromne horizontalne reakcije oslonaca, veće od inače velikih vertikalnih. Na ravnom tlu Dunava i na mestu krivine reke sa velikom brzinom rečnog toka i do 3,5 m/s, neracionalno rešenje zbog velikih i skupih konstrukcija u fundiranju. ¹⁾
Luk sa zategom (<i>Slika 6</i>)	Racionalan sistem, široko primenjen u svetskoj praksi, u svim prilikama gde nema uslova za uklještene lukove. U slučaju ovog mosta, zatega zbog svoje male visine od 2,55 m može da bude samo to – element koji prima zatezanje ali ne i velika savijanja. Manji utrošak čelika u odnosu na rešetkaste grede, <i>slika 4</i> . Sistem sa dijagonalnim vešaljka je krući od sistema sa vertikalnim vešaljka, krući takođe od grednih sistema i sistema sa kosim kablovima. Nedostaci: Vrlo složen proračun i konstruisanje konstrukcije. Kod rešenja sa dijagonalnim vešaljka: složena dispozicija vešaljki (da se izbegne pritisak pri bilo kojoj kombinaciji opterećenja, komplikovana geometrija konstrukcije a odatle i složenija izrada.

¹⁾ 1965. godine prilikom velike poplave desilo se pomeranje oslonaca luka na desnoj obali, (zona stubova 1 i 2, *slika 6*), što je izazvalo velika oštećenja konstrukcije, a i sam opstanak mosta je doveden u pitanje, (v. [8]).



Slika 4 – Utrošak čelika konstrukcije železničkih mostova po metru dužine koloseka, prema literaturi.

Pokazalo se, dakle, da je odluka urbanista – da se zahteva lučni most, u ovom slučaju bila ispravna. Lučni most je estetski daleko prihvatljiviji i lakši oko 10% u odnosu na rešetkasti. Povoljna okolnost je bila i ta što nije uslovljavan statički sistem luka.

U pogledu montaže mosta, obzirom na značaj Dunava kao velikog plovnog puta, moguća je praktično samo montaža sa vrlo velikim delovima konstrukcije, ili konstrukcijama u celini (spuštanjem ili guranjem), kako bi se sužavanje plovnog profila potpuno izbeglo, ili smanjilo na minimalnu meru. Prema ovom zahtevu je metod montaže grednog i lučnog mosta praktično izjednačen.

Lučni most sa zategom – sa vertikalnim ili dijagonalnim vešaljka? Zahtev DIN-Fb 101:2009 o ograničavanju zbira rotacija $\theta_1 + \theta_2 \leq 5$ mrad (tabela 1) doveo je do samo jednog kandidata – lučni most sa zategom i dijagonalnim vešaljka, (videti detaljnije [2] i [3]).

Na koštanje čelične konstrukcije imale su direktan uticaj i druge odluke u projektovanju:

- Visina lukova, (odnos visine i raspona oba luka je $L/H = 5,21$), direktno utiče na veličinu normalnih sila, ove na napone, a naponi na debljine limova sandučastih preseka: Limovi debljina $t \leq 50$ mm i pri iskorišćenju graničnih napona od oko 75% zadovoljavaju sa podklasama J2 i K2, dakle kao S355J2 i S355K2 po EN 10025-2:2004. Ovi čelici se lako nabavljaju na tržištu i jeftiniji su od termomehanički obrađenih čelika podklasa M i ML. Kod određivanja podklasa čelika treba zapaziti da je, prema uslovima Tehničkih specifikacija (koje se zasnivaju na EN 1090-2:2011, DIN 18800-7:2008 i dodatno na normama koje primenjuju Nemačke železnice – Ri804:2003, BN 918002:2000), potrebno da izvođač raspolaže kvalifikacijama zavarivanja za sve primenjene čelike i postupke zavarivanja. Ovi dokazi podobnosti su dugotrajni i skupi, pa pomenuto ograničavanje podklasa čelika ima i finansijski efekt na koštanje konstrukcije.
- Minimalno mogući broj podužnih i poprečnih ukrućenja lukova (slika 5) i zatega: Dužina podužnih ukrućenja meri se kilometrima. Svako je zavareno obostrano. Izuzetno je bitno

smanjiti njihov broj na minimum zbog smanjivanja količina zavarivanja i vremena izrade konstrukcije, što – i jedno, i drugo – direktno utiče na koštanje konstrukcije. Broj ukrućenja direktno je povezan sa debljinama limova flanši i vertikalnih limova prevashodno lukova, drugim rečima sa dokazima sigurnosti na izbočavanje po EN 1993-1-5:2006+AC:2009, odnosno DIN-Fb 103:2009. Potrebno je, dakle, postići balans debljine limova preseka i broja podužnih i poprečnih ukrućenja. Na ovom mostu se pokazalo da je optimalan razmak poprečnih dijafrafmi 3,00 m, a broj podužnih ukrućenja 4 i 6 na lukovima raspona 177 m i 219 m.



Slika 5 – Lukovi lučnog mosta raspona 177 m u montaži.

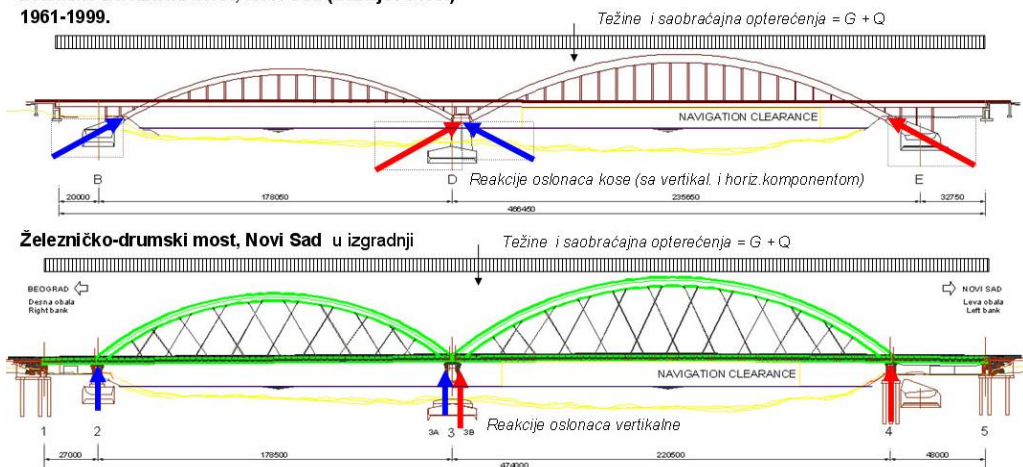
2.3 Izbor vešaljki lučnih mostova

U izboru pune vešaljke (od okruglog čelika ili kao limene), ili vešaljke od kablova, prednost je uveliko na strani vešaljki od kablova, (videti i [3]). Ova prednost se očituje u sledećem:

- veća kategorija zamora: $\Delta\sigma_C = 160,0 \text{ N/mm}^2 > \Delta\sigma_C$ punih vešaljki;
- bez potrebe montažnog nastavljjanja;
- bez potrebe za posebnim prigušivačima vibracija (osim standardnih na devijatorima kablova);
- bolje prilagodljivosti imperfekcijama konstrukcije lukova i zatega posle sastavljanja;
- mogućnosti zamene tokom eksploatacije mosta, zamenom pojedinih ili svih strukova kabla vešaljke.

Limene vešaljke, (primenjene inače na nekim manjim lučnim mostovima u Nemačkoj), nisu razmatrane kao mogućnost zbog svojih nepovoljnih aerodinamičkih osobina.

**Drumsko-železnički most, Novi Sad (Žeželjev most)
1961-1999.**



Slika 6 – Stari (1961-1999.) i novi most: izgled i šema reakcija oslonaca.

U pogledu koštanja vešaljke su morale da budu minimalno mogućeg preseka – određenog prema kriterijuma graničnog stanja nosivosti (ULS), graničnog stanja upotrebljivosti (SLS), zamora i aerodinamičkih stabilnosti – i minimalnog broja takođe. Ovde je takođe morao da se pronade balans nekoliko suprotstavljenih uticajnih faktora. Manji broj vešaljki ima za posledicu smanjenje dinamičkog koeficijenta Φ_3 vešaljki zbog njihovog povećanog razmaka, ali i povećanje momenata savijanja lukova i zatega, a time i njihovih preseka. Veći broj vešaljki ima, razumljivo, obrnut efekt. Finalno usvojeni razmaci su oni iz Idejnog projekta (lučnih mostova sa vertikalnim vešaljkama): $e = 9,00$ m, osim dveju krajnjih gde je $e = 6,00$ m, (slika 6). Ovakvim razmacima vešaljki dobijeni su umereni dinamički koeficijenti vešaljki $\Phi_3 = 1,10$ i $1,19$, dok momenti savijanja lukova i zatega nisu poremetili njihovo opšte stanje napona – pritiska kod lukova i, naročito važno, zatezanja u zategama.

2.4 Izbor vrste kolovozne konstrukcije

Kolovozna konstrukcija – čelična, kao ortotropna ploča ili spregnuta?

U pogledu tehničkih prednosti i koštanja prednost je na strani spregnute kolovozne ploče, (videti detaljnije [2] i [3]). U slučaju ovog mosta kao lučnog sa zategom, gde je cela zona zatege, (dakle i armiranobetska kolovozna ploča), u zoni zatezanja, specifičnost je beton u stanju zatezanja i vezani problem ograničenja širine prslina. Ovaj problem generalno može da bude vrlo veliki imajući u vidu ograničenja koje nameće DIN-Fachbericht 104:2009 za debljine i armiranje kolovozne betonske ploče železničkih lučnih mostova sa zategom.

Uslovi trajnosti armiranobetske kolovozne ploče prema DIN-Fb 104:2009 su sledeći: 1) debljina ploče mora da bude $t_c \geq 300$ mm; 2) podužna armatura (u podužnom pravcu mosta, indeks L), prečnici i razmaci šipki, procenat armiranja: $d_{S,L} \leq 20$ mm, 100 mm $\leq e_L \leq 150$ mm, eventualno potrebni srednji sloj armature može da bude $d_{S,L} \leq 25$ mm, $\mu_L \leq 0,7$ %/1 sloj; 3) poprečna armatura: $d_{S,T} \leq 16$ mm, 100 mm $\leq e_T \leq 150$ mm, $\mu_T \leq 2,5$ %/1 sloj. Klasa betona je

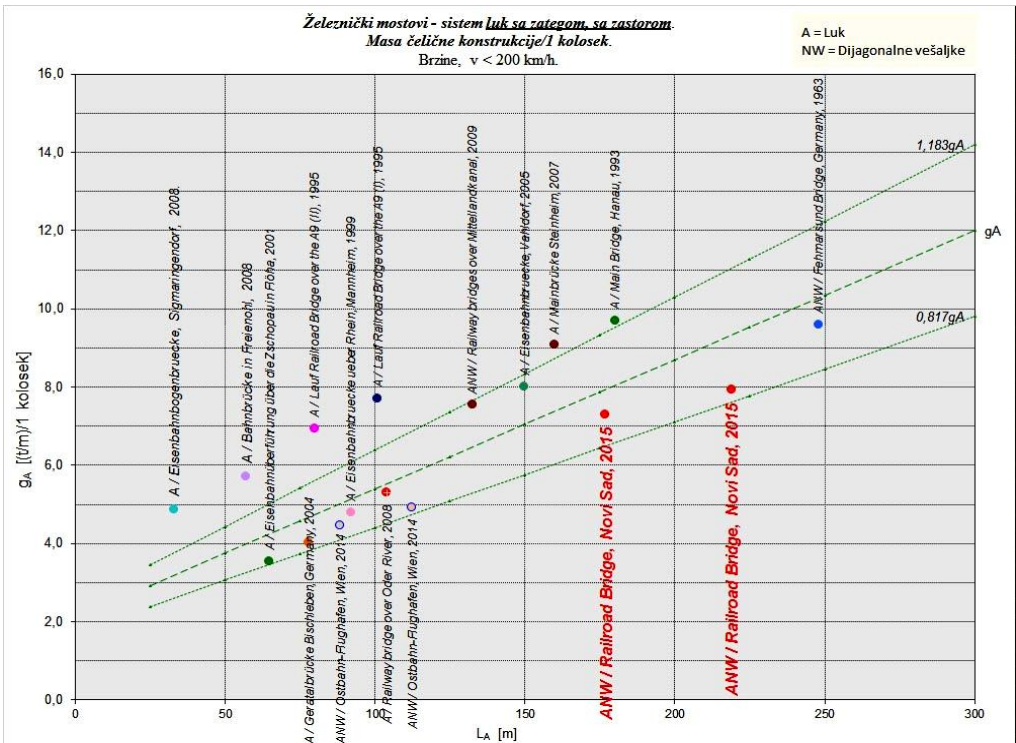
ograničena zahtevima Ril 804:2003, M.4301 kao: $C25/30 \leq$ Klasa betona $\leq C40/50$ za beton liven na licu mesta.

Iz prethodnih uslova je očigledno da je sloboda projektovanja kolovozne ploče bila veoma ograničena, drugim rečima ako se ne postigne zahtevano ograničenje prslina w_k , čitava koncepcija kolovozne konstrukcije, a delom i mosta u celini, pada u vodu.

Zadatak je u Glavnom projektu [1] uspešno rešen u okviru svih pomenutih ograničenja.

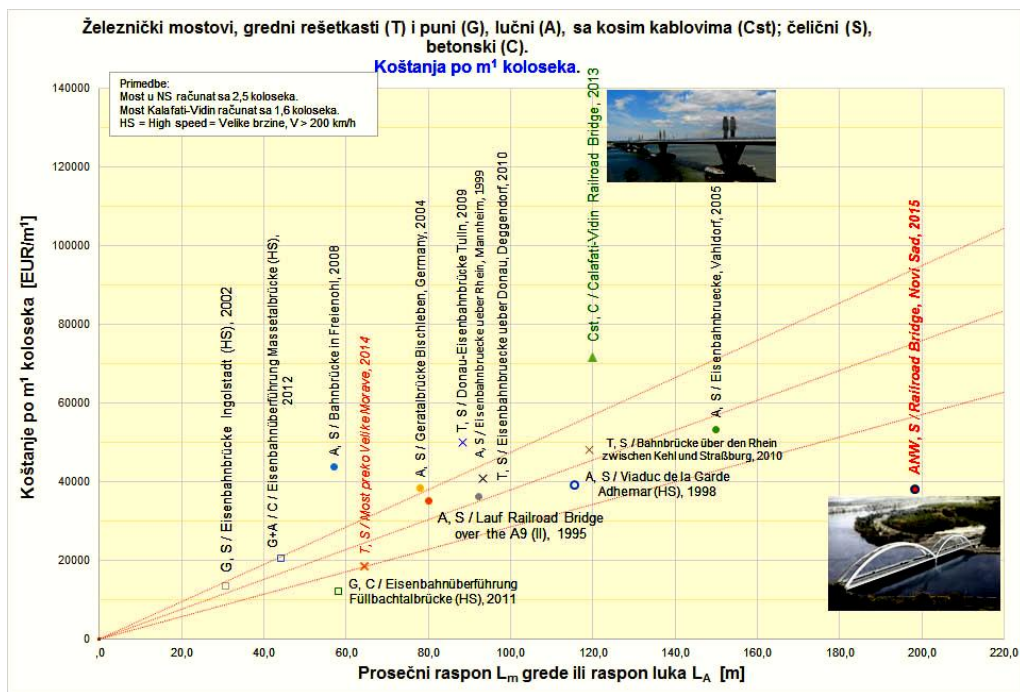
3 KOLIČINE MATERIJALA KONSTRUKCIJE I KOŠTANJE MOSTA

Količina materijala noseće konstrukcije mosta (čelika, kablova, betona, armature), po m^2 osnove mosta za drumske mostove i po m^1 koloseka za železničke mostove izuzetno je bitan pokazatelj racionalnosti i uspešnosti projekta jednog mosta uopšte. Odatle do nalaženja racionalne i očekivane cene izgradnje mosta je samo jedan korak. U razvijenim zemljama o ovome se izuzetno vodi računa. Statistike specifičnog utroška materijala izvedenih mostova rade se još od početka 20. veka u SAD, Japanu, Nemačkoj, Velikoj Britaniji.



Slika 7 – Mase čelične konstrukcije lučnih mostova t/m koloseka, teoretske i izvedenih mostova.

Obzirom da je Železničko-drumski most u Novom Sadu prevashodno železnički most, uporedimo najpre količine materijala sa očekivanim količinama iz literature [7], (slika 4 i slika 7), a zatim i cenu izgradnje sa cenama izgradnje nekih savremenih izvedenih lučnih i grednih mostova u Nemačkoj, Francuskoj, Austriji i Bugarskoj (slika 8).



Slika 8 – Koštanje po m² koloseka nekih izvedenih mostova u Evropi i ŽDM u Novom Sadu.

Po količini čeličnog materijala ŽDM u Novom Sadu (računat sa 2,5 koloseka) je ispod očekivane prosečne vrednosti (slika 7). Po koštanju je oko 30% ispod minimalnog očekivanog koštanja prognoziranog Idejnim projektom mosta, slika 8. Reč je dakle o mostu koji uprkos tome što je svetski rekorder u rasponu (219 m) punih lukova sa zategom i dva koloseka, jeste izuzetno jeftin most. ŽDM u Novom Sadu je sa svojih 3.000 EUR/m², odnosno oko 40.000 EUR/m koloseka, (u koje je ubrojana i demontaža Privremenog mosta i oprema za monitoring!) čak jeftiniji od nekih po rasponu poredivih drumskih mostova u Srbiji, od kojih ima dva i više puta veće saobraćajno opterećenje, a od nekih i veće raspone.

Količine materijala: čelične konstrukcije 10.200 t, sekundarne čel. kon. 400 t, kablovi 200 t, beton konstrukcije mosta 3.800 m³, armatura 1.200 t, moždanice sa glavom 77.000 kom.

4 UČESNICU IZGRADNJE MOSTA

Investitor: JP Železnice Srbije, Beograd.

Finansiranje: Delegacija Evropske komisije za Republiku Srbiju, AP Vojvodina, Grad Novi Sad.

Generalni izvođač: JV Azvi – Taddei – Horta Coslada.

Podizvođači za projektovanje: konstr. mosta – DEL ING DOO; stubovi – ENCODE DOO.

Podizvođač za sastavljanje konstrukcije mosta i centralni stub: Mostogradnja AD.

Podizvođač za kablove: VSL, Švajcarska.

Podizvođač za ležišta i drumske dilatacije: FIP, Italija.

Podizvođač za lansiranje: Mammoet, Holandija.

LITERATURA

- [1] Railway Road Bridge across the Danube in Novi Sad. *Detailed Design of the Bridge Structure*.
DEL ING DOO, Belgrade, (as subcontractor of JV Azvi/Taddei/Horta Coslada).
Belgrade, November 2011.
- [2] Bojović, A., Marković, Z. Mora, A., Blom, J., Aleksić, D., Pavlović, M., Spremić, M., Novaković, N., Janjušević, B.: *Glavni projekt novog Železničko-drumskog mosta u Novom Sadu*.
(Detailed design of the new Railway road bridge in Novi Sad).
Simpozijum 2012 Društva građevinskih konstruktera Srbije. Zbornik radova, str. 39-50.
Vrnjačka Banja, 19-21. septembar 2012.
- [3] Bojović, A., Marković, Z., Mora, A., Casasola, L., Aleksić, D., Pavlović, M., Spremić, M., Novaković, N., Blom, J.: *Projekat i gradnja Železničko-drumskog mosta u Novom Sadu*.
Konferencija "Savremena građevinska praksa 2014", Zbornik radova str. 21 do 35.
Andrevlje, 22-23. maj 2014.
- [4] Bojović, A., Marković, Z., Mora, A., Blom, J., Aleksić, D., Pavlović, M., Spremić, M., Novaković, N., Janjušević, B.: *Railway road bridge across the Danube in Novi sad – Design and construction*.
The Eight International Conference „Bridges in Danube Basin“.
Timisoara – Belgrade, 4-5 October 2013.
Procedings, p.139-150. Springer Vieweg, Springer Fachmedien Wiesbaden 2013.
- [5] Bojović, A., Mora, A., Marković, Z., Aleksić, D., Pavlović, M., Spremić, M.: *Railway road bridge across the Danube in Novi sad – Design and erection*.
37th IABSE Symposium Madrid, Spain, September 3-5, 2014
(U štampi u vreme pripreme ovog članka)
- [6] Bojović, A., Mora, A., Marković, Z., Casasola, L.: *Railway road bridge in Novi sad – Design and construction*.
First international bridges conference – Chile 2014, Future challenges: design, construction and maintenance. Santiago – Chile, September 24 to 26, 2014
(U štampi u vreme pripreme ovog članka)
- [7] Herzog, M.: *Stahlgewichte moderner Eisenbahn- und Strassenbrücken*.
Der Stahlbau, Heft 9/1975
- [8] Folić, R., Vojinović, B., Vugrinčić, V.: *Some experiences in maintenance and repair of reinforced and prestressed concrete bridges in Yugoslavia*.
The Third International Conference „Bridges in Danube Basin“, 1998. Proceedings, p. 49-70.
- [9] Ril 804:2003
DB Richtlinie 804: Eisenbahnbruecken (und sonstige Ingenieurbauwerke).
Planen, Bauen und Instand halten.