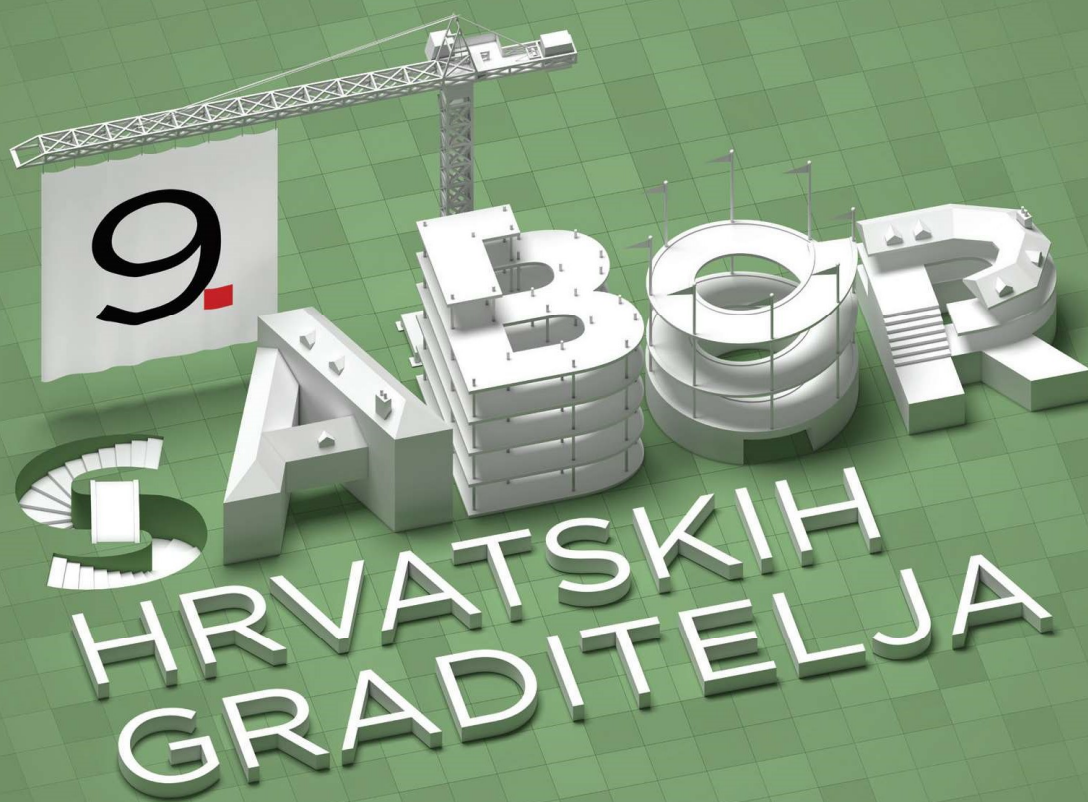


**9. SABOR
HRVATSKIH
GRADITELJA**

ZBORNİK RADOVA

Urednik
Stjepan Lakušić

**HRVATSKA
GRADITELJSKA
IZVRSNOST**



21. - 24. travnja 2024., Cavtat
Hrvatski savez građevinskih inženjera

Izdavač

Hrvatski savez građevinskih inženjera
Zagreb, Berislavićeva 6

Urednik

Prof. dr. sc. Stjepan Lakušić

Tehnička urednica

Tanja Vrančić

Dizajn naslovnice

minimum d.o.o.

Prijelom

Tanja Vrančić

Lektorica

Nataša Bunijevac

Tisak

Tiskara Zelina d.d., 2024.

Naklada

500 kom.

ISBN

978-953-6686-22-3

CIP zapis

je dostupan u računalnome katalogu
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu
pod brojem 001223929.

Iako su poduzete sve mjere da se sačuva integritet i kvaliteta ove publikacije i u njoj sadržanih podataka, izdavač, urednik i autori ne smatraju se odgovornima za bilo koju štetu nanесenu imovini ili osobama zbog primjene ili korištenja ove knjige ili zbog korištenja u njoj sadržanih informacija, uputa ili ideja. Radovi objavljeni u knjizi izražavaju mišljenja autora koji su i odgovorni za objavljene sadržaje. Cjeloviti radovi smiju se reproducirati ili prenositi samo uz pismenu suglasnost izdavača. Manji dijelovi mogu se reproducirati samo uz odgovarajuće citiranje izvora.

**9. SABOR
HRVATSKIH
GRADITELJA**

HRVATSKA GRADITELJSKA IZVRSNOST

ZBORNİK RADOVA

Urednik
Stjepan Lakušić

21. - 24. travnja 2024., Cavtat
Hrvatski savez građevinskih inženjera



Organizacija

Izvršni organizacijski odbor

Dragutin Kamenski
Stjepan Lakušić
Mirna Amadori
Nina Dražin Lovrec
Kruno Komesar
Mirko Habijanec
Josip Škorić
Ante Borovina
Mirjana Čagalj
Dragan Blažević

Tanja Vrančić
Anđela Bogdan
Ivo Haladin
Zlata Dolaček Alduk
Luka Jelić
Zdravko Jurčec
Ratko Matotek
Snježana Špehar
Marko Milidrag
Adela Visković

Znanstveni organizacijski odbor

Prof. dr. sc. Stjepan Lakušić, predsjednik
Prof. dr. sc. Vlatka Rajčić
Izv. prof. dr. sc. Nikola Grgić
Prof. dr. sc. Ivana Štimac Grandić
Prof. dr. sc. Damir Markulak
Prof. dr. sc. Meho Saša Kovačević
Doc. dr. sc. Goran Vlastelica
Izv. prof. dr. sc. Vedran Jagodnik
Izv. prof. dr. sc. Krunoslav Minažek
Izv. prof. dr. sc. Gordon Gilja
Izv. prof. dr. sc. Igor Ružić
Prof. dr. sc. Marija Šperac
Izv. prof. dr. sc. Ivo Haladin
Prof. dr. sc. Dražen Cvitanić
Izv. prof. dr. sc. Sanja Šurdonja
Prof. dr. sc. Sanja Dimter
Prof. dr. sc. Ivica Završki
Doc. dr. sc. Katarina Rogulj

Prof. dr. sc. Diana Car-Pušić
Izv. prof. dr. sc. Mario Galić
Prof. dr. sc. Nina Štirmer
Izv. prof. dr. sc. Sanja Dugonjić Jovančević
Prof. dr. sc. Lidija Tadić
Izv. prof. art. dr. sc. Silvio Bašić
Doc. dr. sc. Snježana Perojević
Izv. prof. dr. sc. Iva Mrak
Izv. prof. dr. sc. Dina Stober
Prof. dr. sc. Anita Cerić
Prof. dr. sc. Nikša Jajac
Doc. dr. sc. Elvis Žic
Prof. dr. sc. Ksenija Čulo
Prof. dr. sc. Damir Lazarević
Prof. dr. sc. Boris Trogrlić
Prof. dr. sc. Davor Grandić
Prof. dr. sc. Ivica Guljaš

Utjecaj uzdužne krutosti oslonaca mosta na dodatna naprezanja u kontinuirano zavarenim tračnicama

Nikola Mirković¹, Maja Ahac², Stjepan Lakušić², Marija Nefovska-Danilović³

¹ Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Beograd

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb

³ Sveučilište u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd

Sažetak

U radu prikazana je analiza utjecaja uzdužne krutosti oslonaca željezničkog mosta na vrijednosti dodatnih naprezanja u dugome tračničkom traku. Primjenom metode konačnih elemenata izrađen je numerički model kolosijeka na mostu (vijaduktu) tipa betonskih prostih greda u nizu raspona 10 x 30 m. Kako bi se zadovoljili najveći dopušteni uzdužni pomaci konstrukcije mosta, utvrđena je optimalna uzdužna krutost nepomičnih oslonaca mosta. Dobiveni rezultati razmotreni su s aspekta smanjenja dodatnih naprezanja u tračnicama i izostavljanja tračničke dilatacijske naprave u kolosijeku na mostu.

Ključne riječi: željeznica, dugi tračnički trak, interakcija kolosijek/most, naponsko stanje tračnice, numerička analiza

Influence of longitudinal stiffness of bridge supports on additional stresses in continuously welded rails

Abstract

The paper presents an analysis of the influence of the longitudinal stiffness of railway bridge supports on the values of additional stresses in continuously welded rails. A numerical model of tracks on the bridge (viaduct) of the type of simply supported concrete beams in a series of spans of 10 x 30 m was created using the finite element method. To meet the maximum permissible longitudinal displacements of the bridge structure, the optimal longitudinal stiffness of the fixed bridge supports was determined. The obtained results were considered from the aspect of reducing additional stresses in rails and avoiding the rail expansion device in the track on the bridge.

Key words: railway, continuously welded rail, track/bridge interaction, stress state of rail, numerical analysis

1 Uvod

Prednosti kontinuiranog zavarivanja tračnica u dugi tračnički trak (DTT) ogledaju se u smanjenju otpora kotrljanja kotača željezničkog vozila po tračnici i poboljšanju voznih karakteristika kolosijeka uz istodobno povećanje brzine i udobnosti vožnje. S druge strane, kod DTT-a ne postoje zazori između zavarenih tračnica koji bi omogućili njihovo uzdužno temperaturno dilatiranje. To uzrokuje pojavu temperaturnih naprezanja u tračnicama koja mogu rezultirati izvijanjem kolosijeka pri ekstremnim ljetnim temperaturama i formiranjem zazora pri pucanju tračnice pri ekstremnim zimskim temperaturama.

U inženjerskoj praksi posebno je problematična pojava takozvanih dodatnih naprezanja u tračnicama zavarenima u DTT na mostovima. Ona su posljedica temperaturne promjene u konstrukciji gornjeg ustroja mosta, ubrzanja/kočenja željezničkog vozila na mostu i vertikalnog opterećenja od željezničkog vozila na mostu, a moguće ih je kontrolirati ugradnjom kolosiječnog pričvrsnog pribora s reduciranim otporom uzdužnome pomaku tračnice i izvedbom konstrukcije mosta s optimalnim uzdužnim krutostima oslonaca ili primjenom tračničkih dilatacijskih naprava. Glavni nedostatak trenutačno važećih preporuka i standarda koji se bave interakcijom kolosijek/most jest to što ne daju detaljne smjernice za smanjenje i ograničavanje vrijednosti dodatnih naprezanja u DTT-u. U slučaju prekoračenja graničnih vrijednosti dodatnih naprezanja u tračnicama na mostu može doći do ugrožavanja sigurnosti željezničkog prometa pa je ova problematika još uvijek aktualna na svjetskoj razini kako s aspekta istraživanja tako i s aspekta tehničkih propisa.

Ruge i Birk [1] su u svojem istraživanju prvi put analizirali uzdužne sile u DTT-u na mostu uzevši u obzir povijest deformacije. Izveli su nelinearne formulacije krutosti za temperaturnu promjenu u konstrukciji gornjeg ustroja mosta kao i za horizontalna i vertikalna opterećenja od željezničkog vozila na mostu. U istraživanju Rugea i skupine autora [2] zaključeno je da naprezanje DTT-a na mostu u velikoj mjeri ovisi o spoju kolosijeka i mosta u uzdužnome smjeru. Tu vezu karakteriziraju nelinearna uzdužna krutost i znatna ovisnost o tome je li kolosijek neopterećen ili opterećen. Cai [3] je u svojem istraživanju prikazao integralni model kolosijeka i mosta za analizu dodatnih uzdužnih sila u DTT-u na mostu, formiranog primjenom metode konačnih elemenata. Razmatrao je raspored dodatnih uzdužnih sila zbog utjecaja temperature, savijanja konstrukcije gornjeg ustroja mosta, kočenja željezničkog vozila na mostu te pucanja tračnice na mostu. Zhang, Wu i Li [4] analizirali su interakciju kolosijek/most kako bi odredili uzdužna naprezanja i pomake sustava pod različitim temperaturnim utjecajima i opterećenjima od željezničkog vozila s aspekta upotrebljivosti i sigurnosti konstrukcije kolosijeka. Utvrdili su da proračunske metode i usvojene krivulje pomaka/uzdužnog otpora sustava pričvršćenja tračnica znatno utječu na točnost dobivenih vrijednosti dodatnih uzdužnih naprezanja u DTT-u i relativnih uzdužnih pomaka kolosiječne i mosne konstrukcije. U istraživanju koje su proveli De Backer i skupina autora [5] detaljno je ispitana mogućnost izostavljanja tračničke dilatacijske naprave u kolosijeku s DTT-om na mostu. Provedena je parametarska

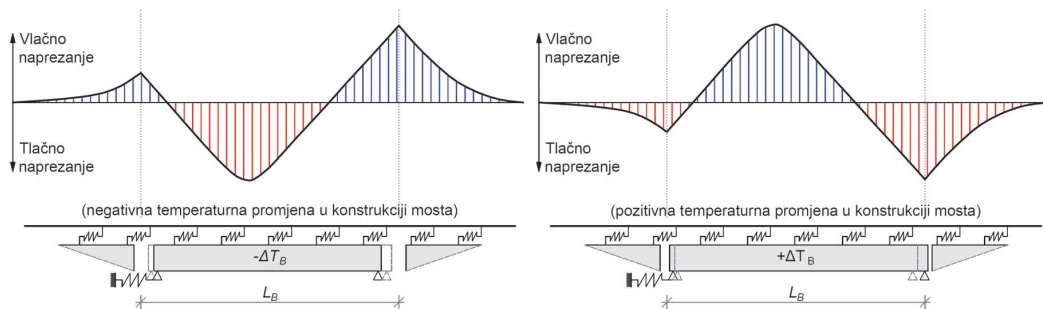
analiza kako bi se ocijenila dodatna naprezanja tračnice zbog utjecaja temperature te od željezničkog vozila na mostu. Dai i Liu [6] razvili su integralni prostorni model interakcije kolosijek/most/stup/temelj primjenjujući metodu konačnih elemenata. Pokazali su da se dodatne sile pritiska i zatezanja mogu drastično smanjiti korištenjem sustava za pričvršćenje tračnica s reduciranim uzdužnim otporom, što s druge strane utječe na vrijednost zazora pri lomu tračnice.

S aspekta tehničkih propisa preporuke UIC Code 774-3 [7] objašnjavaju interakciju kolosijek/most i predlažu granične vrijednosti koje treba zadovoljiti u pogledu dodatnih naprezanja i pomaka u DTT-u na mostu. Preporuke UIC Code 776-2 [8] definiraju smjernice za projektiranje željezničkih mostova s aspekta interakcije vozilo/kolosijek/most. Također, standard EN 1991-2 [9] u jednome svojem dijelu uključuje utjecaje za proračun željezničkih mostova i za proračun interakcije kolosijek/most.

U ovome radu primijenjen je multidisciplinarni pristup u analizi utjecaja uzdužne krutosti oslonaca željezničkog mosta na vrijednosti dodatnih naprezanja u DTT-u koji uključuje sintezu numeričke analize i suvremenih saznanja iz područja gornjeg ustroja željeznica i mostova. Prema rezultatima provedene analize definirane su smjernice za integralno projektiranje konstrukcija kolosijeka i mosta kojima se izbjegava mogućnost prekoračenja graničnih vrijednosti dodatnih naprezanja.

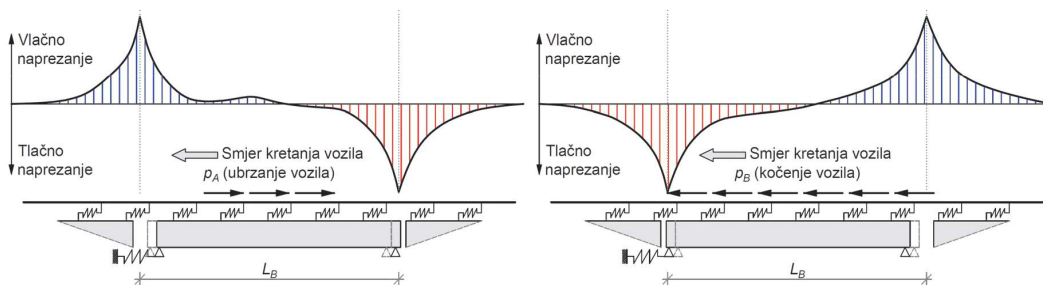
2 Dodatna naprezanja u DTT-u zbog interakcije kolosijek/most

Temperaturna promjena u konstrukciji gornjeg ustroja mosta duljine L_B u odnosu na referentnu temperaturu mosta na kojoj je izvedeno završno zavarivanje tračnica u dugi trak uzrokuje dodatna temperaturna naprezanja u tračnicama. U slučaju negativne temperaturne promjene ($-\Delta T_B$) u zimskim uvjetima dolazi do skraćivanja konstrukcije gornjeg ustroja mosta i pojave dodatnih vlačnih naprezanja u tračnicama iznad pomičnog oslonca mosta. U slučaju pozitivne temperaturne promjene ($+\Delta T_B$) u ljetnim uvjetima dolazi do produljenja konstrukcije gornjeg ustroja mosta i pojave dodatnih tlačnih naprezanja u tračnicama iznad pomičnog oslonca mosta (slika 1.).



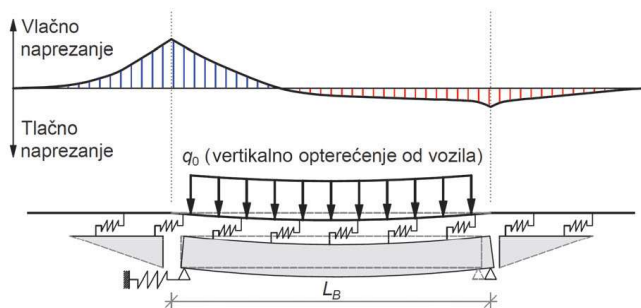
Slika 1. Dijagrami dodatnih naprezanja u DTT-u zbog temperaturnih promjena u konstrukciji gornjeg ustroja mosta

Ubrzanje/kočenje željezničkog vozila na mostu uzrokuje relativna uzdužna pomicanja kolosiječne i mosne konstrukcije, što dovodi do stvaranja dodatnih naprezanja u DTT-u. Ako je smjer kretanja željezničkog vozila od pomičnog prema nepomičnome osloncu mosta, tada sile ubrzanja (p_A) uzrokuju dodatna tlačna naprezanja, dok sile kočenja (p_B) uzrokuju dodatna vlačna naprezanja u tračnicama iznad pomičnog oslonca mosta (slika 2.).



Slika 2. Dijagrami dodatnih naprezanja u DTT-u zbog ubrzanja/kočenja željezničkog vozila na mostu

Vertikalno opterećenje (q_0) od željezničkog vozila na mostu uzrokuje savijanje konstrukcije gornjeg ustroja mosta u vertikalnoj ravni, što dovodi do zakretanja krajeva mosta i stvaranja dodatnih naprezanja u tračnicama (slika 3.).



Slika 3. Dijagram dodatnih naprezanja u DTT-u zbog vertikalnog opterećenja od željezničkog vozila na mostu

Standard EN 1991-2 [9] propisuje dopuštene vrijednosti dodatnih naprezanja u DTT-u na mostu od -72 N/mm^2 za tlačna naprezanja i 92 N/mm^2 za vlačna naprezanja te tehničke karakteristike gornjeg ustroja željezničke pruge za koje se primjenjuju te vrijednosti naprezanja: profil tračnice 60E1 (minimalna vlačna čvrstoća 900 N/mm^2) u skladu s [10], elastični sustavi pričvršćenja tračnica u skladu s [11], najveći razmak između betonskih pragova do 65 cm za kolosijek u zastoru, minimalna debljina zbijenog zastora od 30 cm ispod praga i minimalan radijus horizontalne osi kolosijeka od 1500 m .

3 Optimalna uzdužna krutost oslonca mosta prema UIC Code 774-3

Uzdužna krutost oslonca mosta uzima u obzir zbroj krutosti ležaja, stupa, temelja stupa i temeljnog tla. Vrste ležajeva i njihove karakteristike imaju glavni utjecaj na otpor uzdužnome pomicanju konstrukcije mosta. U općemu slučaju u analizi se razmatraju samo uzdužne krutosti nepomičnih oslonaca mosta. Uzdužna krutost oslonca mosta (K) određuje se na temelju sljedećih izraza [7]:

$$K = \frac{H \text{ [kN]}}{\sum \delta_i \text{ [mm]}} \quad (1)$$

$$\delta_i = \delta_p + \delta_\varphi + \delta_h + \delta_a \quad (2)$$

gdje je

H – uzdužna reakcija oslonca mosta

δ_i – ukupni uzdužni pomak mosta u razini ležaja

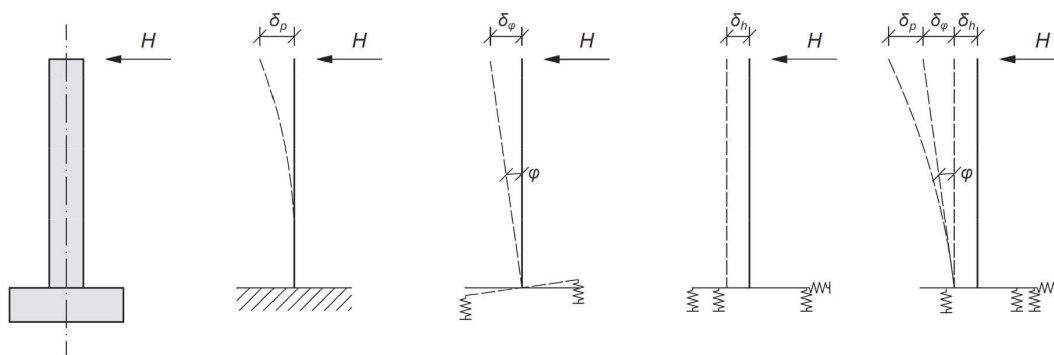
δ_p – pomak vrha stupa mosta zbog elastične deformacije

δ_φ – pomicanje vrha stupa mosta zbog zakretanja temelja ili temeljne ploče

δ_h – pomicanje vrha stupa mosta zbog uzdužnog pomicanja temelja

δ_a – relativni pomak između donjeg i donjeg ruba ležaja mosta.

Na slici 4. prikazane su komponente pomaka stupova koje ovise o uzdužnoj krutosti oslonca mosta.



Slika 4. Komponente pomaka stupova mosta [7]

Pri određivanju krutosti temelja moraju se uzeti u obzir odgovarajuće vrijednosti modula elastičnosti okolnog tla koje odgovaraju različitim slučajevima opterećenja (temperturni utjecaji, utjecaji uslijed ubrzanja/kočenja željezničkog vozila) u skladu s geološkim uvjetima i uvjetima temeljenja. U slučaju utjecaja temperature u konstrukciji gornjeg ustroja mosta uzima se u obzir statički modul elastičnosti tla, dok se u slučaju ubrzanja/

kočenja željezničkog vozila na mostu uzima u obzir dinamički modul elastičnosti tla [7]. Za konstrukciju gornjeg ustroja mosta sa zastorom, s nepomičnim osloncem na jednome kraju mosta i s tračničkom dilatacijskom napravom na pomičnome kraju mosta ili bez nje, optimalna uzdužna krutost oslonca mosta zbog ubrzanja/kočenja željezničkog vozila na mostu treba zadovoljiti sljedeći uvjet [7]:

$$K_o > \frac{20 \cdot \beta \cdot L_B \text{ [kN]}}{5 \text{ [mm]}} \quad (3)$$

gdje je:

K_o – optimalna uzdužna krutost oslonca mosta,

L_B – ukupna duljina konstrukcije mosta

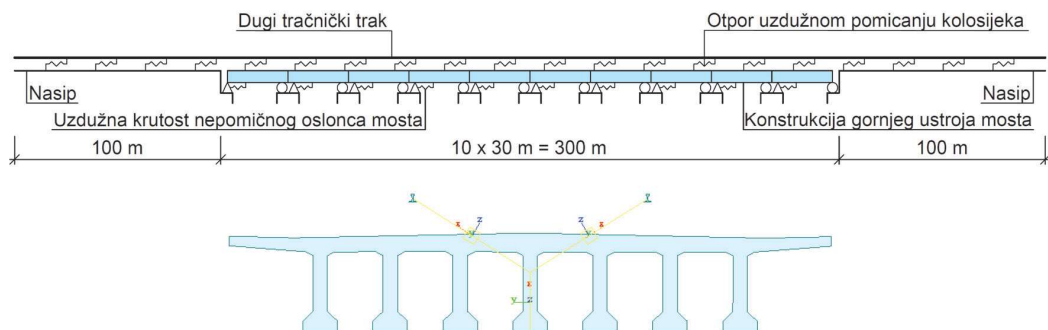
β – redukcijski koeficijent (tablica 1).

Tablica 1. Vrijednosti redukcijskoga koeficijenta (β) za određivanje dijela uzdužne sile koja se prenosi na nepomični oslonac mosta [7]

Ukupna duljina konstrukcije mosta [m]	DTT	DTT s tračničkom dilatacijskom napravom na jednome kraju mosta
	jednokolosiječna ili dvokolosiječna željeznička pruga	jednokolosiječna ili dvokolosiječna željeznička pruga
30	0,50	-
60	0,50	0,60
90	0,60	0,65
120	0,70	0,70
150	0,75	0,75
180	-	0,80
210	-	0,85
240	-	0,90
270	-	0,90
300	-	0,90

4 Numerička analiza dodatnih naprežanja u DTT-u na mostu

U ovoj studiji slučaja proveden je proračun interakcije kolosijek/most te je ispitan utjecaj uzdužne krutosti oslonaca mosta na vrijednosti dodatnih naprežanja u slučaju mosta (vijadukta) tipa betonskih prostih greda u nizu raspona 10 x 30 m s DTT-om. Na slici 5. prikazan je numerički model za analizu interakcije kolosijek/most koji je razvijen u računalnom programu *Midas Civil* [12].



Slika 5. Numerički model za analizu interakcije kolosijek/most – betonske proste grede u nizu raspona 10 x 30 m s DTT-om

U tablici 2. prikazane su karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosijek/most koje se odnose na konačne elemente i elemente veze, parametre konstrukcije kolosijeka, parametre konstrukcije mosta i parametre opterećenja modela.

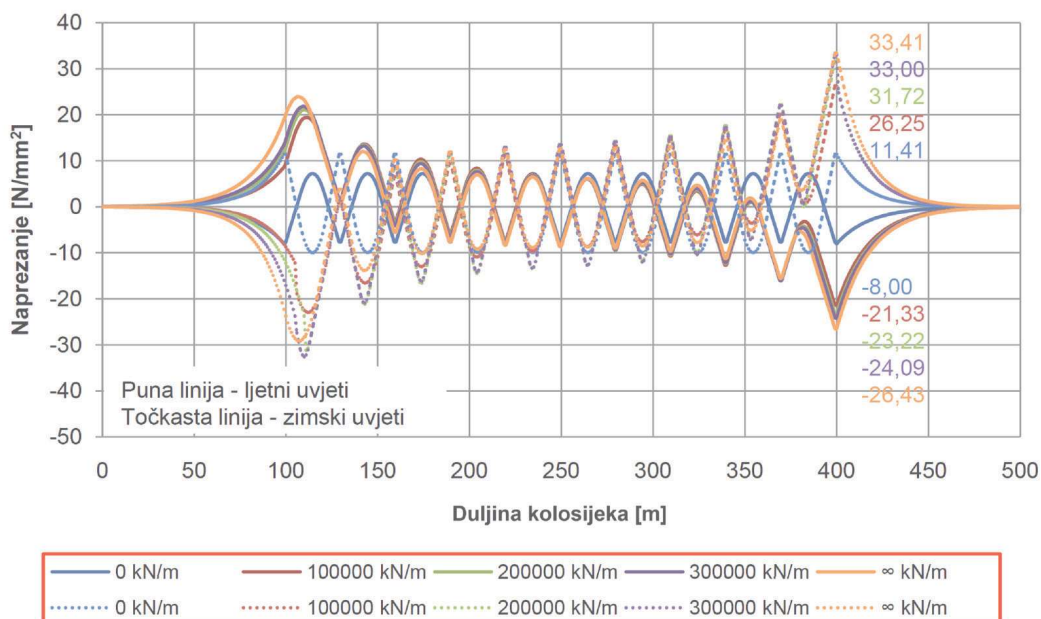
Tablica 2. Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosijek/most – betonske proste grede u nizu raspona 10 x 30 m s DTT-om

Konačni elementi i elementi veza	
Vrsta konačnih elemenata (broj elemenata)	prostorni linijski konačni elementi (2100)
Vrste elemenata veza (broj veza)	General elastic link (622) Rigid elastic link (20) Multi linear elastic link (3668)
Parametri konstrukcije kolosijeka	
Vrsta profila tračnice	60E1
Kvaliteta tračničkog čelika	R260 (klasa čelika)
Otpor uzdužnome pomicanju neopterećenog/opterećenoga kolosijeka (ljetni uvjeti)	neopterećen kolosijek: 20 kN/m, 2 mm (granično relativno pomicanje) opterećen kolosijek: 60 kN/m, 2 mm (granično relativno pomicanje)
Otpor uzdužnome pomicanju neopterećenog/opterećenoga kolosijeka (zimski uvjeti)	neopterećen kolosijek: 30 kN/m, 0,5 mm (granično relativno pomicanje) opterećen kolosijek: 60 kN/m, 0,5 mm (granično relativno pomicanje)
Parametri konstrukcije mosta	
Broj kolosijeka na mostu	2 (dvokolosiječni most)
Statički sustav mosta	proste grede u nizu
Rasponi i ukupna duljina mosta	10 x 30 m = 300 m
Dilatacijske duljine mosta	30 m
Raspored oslonaca mosta	N (nepomični) – P (pomični)

Tablica 2. Karakteristike numeričkog modela za analizu interakcije kolosijek/most – betonske proste grede u nizu raspona 10 x 30 m s DTT-om - nastavak

Uzdužne krutosti nepomičnih oslonaca mosta	0 kN/m (teorijski idealno pomičan oslonac), 100.000 kN/m, 200.000 kN/m (optimalna) , 300.000 kN/m, ∞ kN/m (teorijski idealno nepomičan oslonac)
Geometrijske karakteristike konstrukcije gornjeg ustroja mosta	$A = 8,40 \text{ m}^2$ (površina poprečnog presjeka) $I_{yy} = 3,80 \text{ m}^4$ (moment inercije – Y os) $I_{zz} = 82,60 \text{ m}^4$ (moment inercije – Z os) $h = 2 \text{ m}$ (visina konstrukcije gornjeg ustroja mosta) $W = 2,5 \text{ m}$ (širina konstrukcije gornjeg ustroja mosta)
Materijalne karakteristike konstrukcije gornjeg ustroja mosta	C 40/50 (klasa betona) B500B (tip armaturnog čelika)
Parametri opterećenja modela	
Temperaturna promjena u konstrukciji gornjeg ustroja mosta	+35 °C (ljetni uvjeti) -35 °C (zimski uvjeti)
Ubrzanje/kočenje željezničkog vozila na mostu	33 kN/m ($\leq 1000 \text{ kN}$) (sila ubrzanje) 20 kN/m ($\leq 6000 \text{ kN}$) (sila kočenje)
Vertikalno opterećenje od željezničkog vozila na mostu	LM71 (shema opterećenja)

Na slici 6. i u tablici 3. prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosijek/most i vrijednosti dodatnih temperaturnih napreznja u DTT-u u ljetnim i zimskim uvjetima, ovisno o usvojenim uzdužnim krutostima nepomičnih oslonaca mosta.

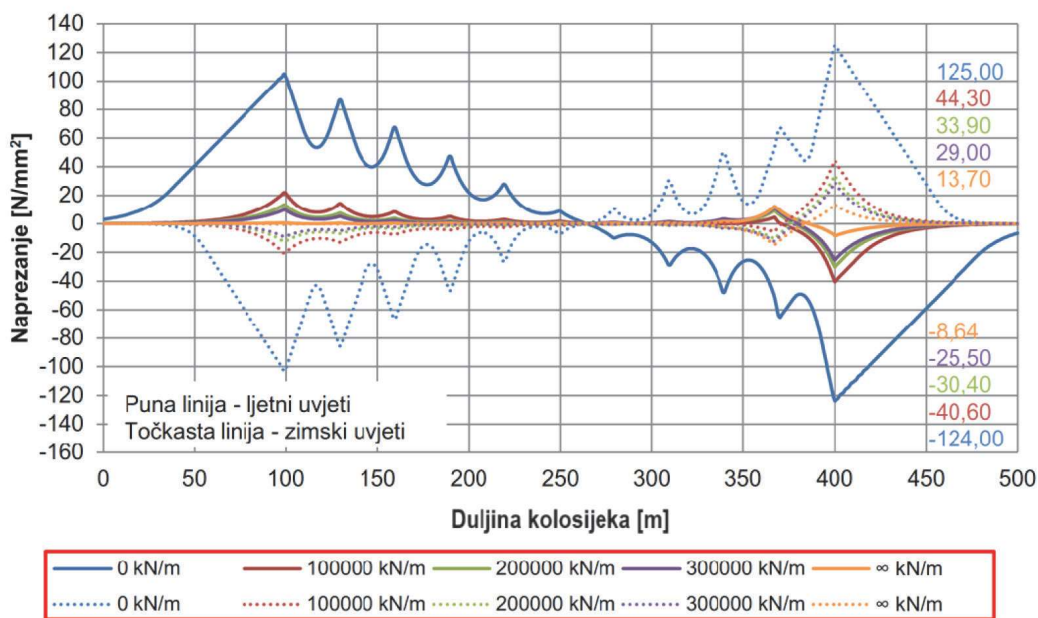


Slika 6. Dijagrami dodatnih temperaturnih napreznja u DTT-u

Tablica 3. Najveće vrijednosti dodatnih temperaturnih naprezanja u DTT-u

Uzdužne krutosti nepomičnih oslonaca mosta	Dodatna naprezanja (ljetni uvjeti) [N/mm ²]	Dodatna naprezanja (zimski uvjeti) [N/mm ²]	Povećanje/smanjenje dodatnih tlačnih naprezanja (ljetni uvjeti) [%]	Povećanje/smanjenje dodatnih vlačnih naprezanja (zimski uvjeti) [%]
300.000 kN/m	-24,09	33,00	+3,75	+4,04
200.000 kN/m	-23,22	31,72	-	-
100.000 kN/m	-21,33	26,25	-8,14	-17,24

Na slici 7. i u tablici 4. prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosijek/most i vrijednosti dodatnih naprezanja u DTT-u zbog ubrzanja/kočenja željezničkog vozila na mostu u ljetnim i zimskim uvjetima, ovisno o usvojenim uzdužnim krutostima nepomičnih oslonaca mosta.



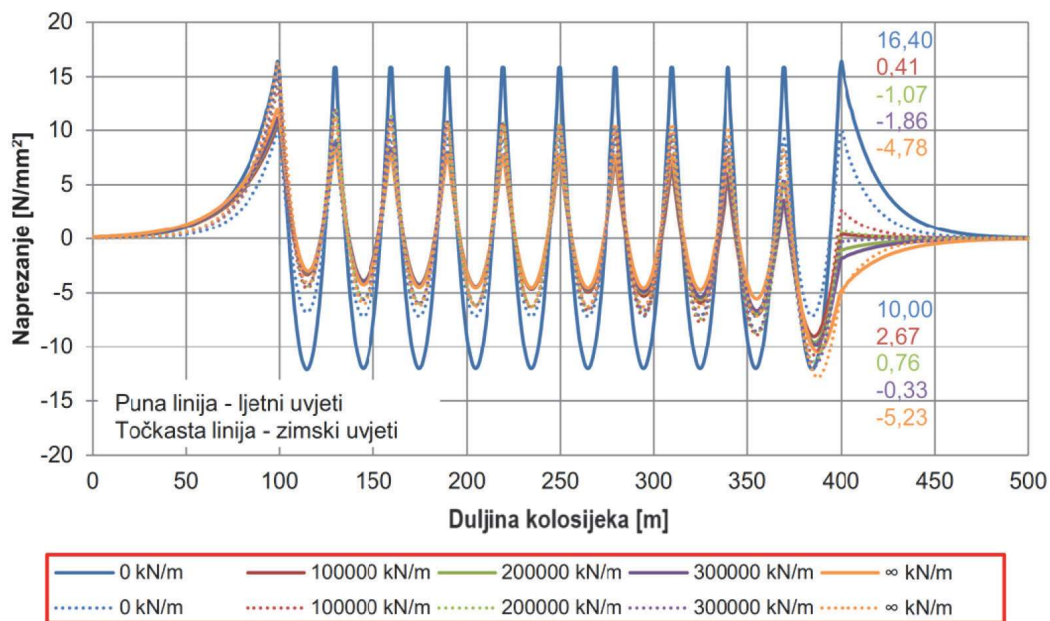
Slika 7. Dijagrami dodatnih naprezanja u DTT-u zbog ubrzanja/kočenja željezničkog vozila na mostu

Tablica 4. Najveće vrijednosti dodatnih naprezanja u DTT-u zbog ubrzanja/kočenja željezničkog vozila na mostu

Uzdužne krutosti nepomičnih oslonaca mosta	Dodatna naprezanja (ljetni uvjeti) [N/mm ²]	Dodatna naprezanja (zimski uvjeti) [N/mm ²]	Povećanje/smanjenje dodatnih tlačnih naprezanja (ljetni uvjeti) [%]	Povećanje/smanjenje dodatnih vlačnih naprezanja (zimski uvjeti) [%]
300.000 kN/m	-25,50	29,00	-16,12	-14,45
200.000 kN/m	-30,40	33,90	-	-
100.000 kN/m	-40,60	44,30	+33,55	+30,68

Na slici 8. i u tablici 5. prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosijek/most i vrijednosti dodatnih naprezanja u DTT-u zbog vertikalnog opterećenja od željezničkog vozila na mostu u ljetnim i zimskim uvjetima, ovisno o usvojenim uzdužnim krutostima nepomičnih oslonaca mosta.

Najveće vrijednosti dodatnih naprezanja zbog vertikalnog opterećenja od željezničkog vozila na mostu (tablica 5.) znatno su manje od najvećih vrijednosti dodatnih temperaturnih naprezanja i najvećih vrijednosti dodatnih naprezanja zbog ubrzanja/kočenja željezničkog vozila na mostu (tablice 3. i 4.) pa njihov postotni porast/smanjenje nije uzet u obzir. Također, pri određivanju ukupnih dodatnih naprezanja u DTT-u na mostu uzimaju se u obzir dodatna naprezanja zbog vertikalnog opterećenja od željezničkog vozila na mostu u situacijama kada njihova vrijednost doprinosi povećanju najvećih vrijednosti ukupnih dodatnih tlačnih i/ili vlačnih naprezanja.

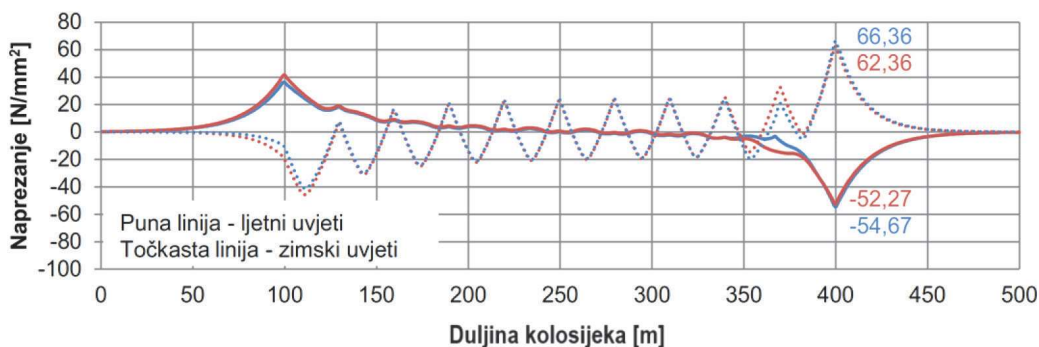


Slika 8. Dijagrami dodatnih naprezanja u DTT-u zbog vertikalnog opterećenja od željezničkog vozila na mostu

Tablica 5. Najveće vrijednosti dodatnih naprezanja u DTT-u zbog vertikalnog opterećenja od željezničkog vozila na mostu

Uzdužne krutosti nepomičnih oslonaca mosta	Dodatna naprezanja (ljetni uvjeti) [N/mm ²]	Dodatna naprezanja (zimski uvjeti) [N/mm ²]
300.000 kN/m	-1,86	-0,33
200.000 kN/m	-1,07	0,76
100.000 kN/m	0,41	2,67

Na slici 9. i u tablici 6. prikazani su rezultati proračuna interakcije kolosijek/most i vrijednosti ukupnih dodatnih naprezanja u DTT-u u ljetnim i zimskim uvjetima ovisno o ubrzanju/kočenju željezničkog vozila na mostu za optimalnu uzdužnu krutost nepomičnih oslonaca mosta od 200.000 kN/m.



- Temperatura promjena u konstrukciji gornjeg ustroja mosta + ubrzanje željezničkog vozila na mostu + vertikalno opterećenje od željezničkog vozila na mostu (+35 °C + 33 kN/m + LM71)
- Temperatura promjena u konstrukciji gornjeg ustroja mosta + kočenje željezničkog vozila na mostu + vertikalno opterećenje od željezničkog vozila na mostu (+35 °C + 20 kN/m + LM71)
- Temperatura promjena u konstrukciji gornjeg ustroja mosta + kočenje željezničkog vozila na mostu + vertikalno opterećenje od željezničkog vozila na mostu (-35 °C + 20 kN/m + LM71)
- Temperatura promjena u konstrukciji gornjeg ustroja mosta + ubrzanje željezničkog vozila na mostu + vertikalno opterećenje od željezničkog vozila na mostu (-35 °C + 33 kN/m + LM71)

Slika 9. Vrijednosti ukupnih dodatnih naprezanja u DTT-u ovisno o ubrzanju/kočenju željezničkog vozila na mostu

Tablica 6. Najveće vrijednosti ukupnih dodatnih naprezanja u DTT-u ovisno o ubrzanju/kočenju željezničkog vozila na mostu

Ubrzanje/kočenje željezničkog vozila na mostu	Ukupna dodatna naprezanja (ljetni uvjeti) [N/mm ²]	Dopuštena dodatna naprezanja (ljetni uvjeti) [N/mm ²]	Ukupna dodatna naprezanja (zimski uvjeti) [N/mm ²]	Dopuštena dodatna naprezanja (zimski uvjeti) [N/mm ²]
ubrzanje	-54,67	≤ -72	66,36	≤ 92
kočenje	-52,27	≤ -72	62,36	≤ 92

U tablici 7. prikazane su najveće vrijednosti uzdužnih pomaka konstrukcija kolosijeka i mosta zbog ubrzanja/kočenja i vertikalnog opterećenja od željezničkog vozila na mostu kao i njihova usporedba s dopuštenim vrijednostima uzdužnih pomaka prema [7, 9].

Tablica 7. Najveće vrijednosti uzdužnih pomaka konstrukcija kolosijeka i mosta zbog ubrzanja/kočenja i vertikalnog opterećenja od željezničkog vozila na mostu

Konstrukcija (opterećenje)	Uzdužni pomaci (ljetni uvjeti) [mm]	Dopušteni uzdužni pomaci (ljetni uvjeti) [mm]	Uzdužni pomaci (zimski uvjeti) [mm]	Dopušteni uzdužni pomaci (zimski uvjeti) [mm]
Most (ubrzanje/kočenje)	3,44	≤ 5	3,32	≤ 5
Kolosijek/most (ubrzanje)	0,77	≤ 4	1,16	≤ 4
Kolosijek/most (kočenje)	0,88	≤ 4	1,36	≤ 4
Most (LM71)	2,14	≤ 8	1,74	≤ 8

5 Zaključak

Na temelju rezultata dobivenih numeričkom analizom dodatnih naprezanja u DTT-u na mostu mogu se definirati sljedeće smjernice za integralno projektiranje konstrukcija kolosijeka i mosta.

Smanjenje uzdužne krutosti nepomičnih oslonaca mosta dovodi do smanjenja dodatnih temperaturnih tlačnih/vlačnih naprezanja u DTT-u na mostu (tablica 3.), pri čemu treba voditi računa o tome da smanjenje uzdužne krutosti nepomičnih oslonaca mosta ne prijeđe granicu optimalne uzdužne krutosti prema uvjetu iz (3), jer u tome slučaju može doći do pomaka konstrukcija kolosijeka i mosta koji prelaze dopuštene vrijednosti prema [7, 9].

Povećanje uzdužne krutosti nepomičnih oslonaca mosta dovodi do smanjenja dodatnih tlačnih/vlačnih naprezanja u DTT-u zbog ubrzanja/kočenja željezničkog vozila na mostu (tablica 4.). Kako bi se zadovoljili dopušteni uzdužni pomaci konstrukcije mosta zbog ubrzanja/kočenja željezničkog vozila na mostu (tablica 7.), potrebno je ispuniti uvjet iz (3) za optimalnu uzdužnu krutost oslonaca mosta.

Smanjenje uzdužne krutosti nepomičnih oslonaca mosta dovodi do smanjenja dodatnih tlačnih naprezanja u DTT-u zbog vertikalnog opterećenja od željezničkog vozila na mostu (tablica 5.). Doprinos tih naprezanja u zbroju ukupnih dodatnih naprezanja znatno je manji od doprinosa dodatnih temperaturnih naprezanja i dodatnih naprezanja zbog ubrzanja/kočenja željezničkog vozila na mostu. Također, oni se uzimaju u obzir kada njihova vrijednost doprinosi povećanju najvećih vrijednosti ukupnih dodatnih tlačnih i/ili vlačnih naprezanja u DTT-u na mostu.

Cilj predloženih smjernica jest unaprijediti proces projektiranja željezničkih mostova s DTT-om iz aspekta interakcije kolosijek/most i optimalne uzdužne krutosti oslonaca mosta tako da dodatna naprezanja i deformacije u DTT-u na mostu tijekom eksploatacije budu unutar propisanih dopuštenih vrijednosti prema [7, 9].

Zahvala

Rezultati prikazani u ovome radu dio su istraživanja doktorske disertacije [13] autora Nikole Mirkovića. Autori zahvaljuju tvrtki *Mostprojekt a.d. Beograd* na tehničkoj podršci pri izradi doktorske disertacije.

Literatura

- [1] Ruge, P., Birk, C.: Longitudinal forces in continuously welded rails on bridgedecks due to nonlinear track-bridge interaction, *Computers & Structures*, 85 (2007) 7-8, pp. 458-475.
- [2] Ruge, P., Widarda, D.R., Schmälzlin, G., Bagayoko, L.: Longitudinal track-bridge interaction due to sudden change of coupling interface, *Computers & Structures*, 87 (2009) 1-2, pp. 47-58.
- [3] Cai, C.B.: Calculation of additional longitudinal forces in continuously welded rails on super-large bridges of high-speed railways, *Journal of Southwest Jiaotong University*, 38 (2003) 5, pp. 609-614.
- [4] Zhang, J.L., Wu, D.J., Li, Q.: Loading-history-based track-bridge interaction analysis with experimental fastener resistance, *Engineering Structures*, 83 (2015), pp. 62-73.
- [5] De Backer, H., Outtier, A., Ferdinande, B., Schotte, K., Mys, J.: Application limits for continuously welded rails on temporary bridge decks, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 231 (2017) 4, pp. 482-497.
- [6] Dai, G.L., Liu, W.S.: Applicability of small resistance fastener on long-span continuous bridges of high-speed railway, *Journal of Central South University*, 20 (2013) 5, pp. 1426-1433.
- [7] UIC Code 774-3 (R): Track/bridge Interaction, Recommendations for calculations, Paris, France, 2001.
- [8] UIC Code 776-2 (R): Design requirements for rail-bridges based on interaction phenomena between train, track and bridge, Paris, France, 2009.
- [9] CEN/TC 250: EN 1991-2:2003/AC:2010, Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges, Brussels, Belgium, 2010.
- [10] CEN/TC 256: EN 13674-1:2011+A1:2017, Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above, Brussels, Belgium, 2017.
- [11] CEN/TC 256: EN 13481-2, Railway applications - Track - Performance requirements for fastening systems - Part 2: Fastening systems for concrete sleepers in ballast, Brussels, Belgium, 2022.
- [12] Midas Engineering Software, www.midasoft.com/bridge-library/civil/products/midascivil, 20.02.2024.
- [13] Mirković, N.: Prilog numeričkoj analizi osnovnih i dodatnih temperaturnih napona u kontinualno zavarenim šinama, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2023.