

ODREĐIVANJE PRORAČUNSKE ŠIRINE T-PRESJEKA POPREČNOG NOSAČA REBRASTOG GREDNOG MOSTA

Ivana Štimac Grandić

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, doc.dr.sc.

Davor Grandić

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, doc.dr.sc.

Goran Brezac

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, dipl.ing.građ.

Sažetak: U ovom radu analizira se i vrjednuje proračunska širina T-presjeka poprečnog nosača podvoznjaka Vrata 1 na temelju proračuna i rezultata pokusnog opterećenja. Rebrasti gredni mostovi najčešće se proračunavaju kao štapni roštiljni sustavi. Uzdužni i poprečni nosači se, zajedno sa sudjelujućim dijelom kolničke ploče, promatraju kao T-presjeci. Njihova krutost ovisi o proračunskoj (sudjelujućoj) širini T-presjeka koja ovisi o više čimbenika, među ostalim i o opterećenju koje na mostu može biti različito po intenzitetu i položaju. U ovom radu se određuju proračunske širine T-presjeka poprečnog nosača u polju roštiljne rasponske konstrukcije pomoću numeričkih proračuna po metodi konačnih elemenata za različite položaje pokusnog opterećenja. Na taj način određene proračunske širine rabe se za proračun progiba na jednostavnim roštiljnim modelima. Proračunani progibi uspoređuju se s odgovarajućim progibima podvoznjaka izmjerenima pri pokusnom opterećenju i progibima proračunanima na jednostavnom roštiljnom modelu u kojemu je uporabljena proračunska širina T- presjeka poprečnog nosača u polju prema normi HRN ENV 1992-1-1.

Ključne riječi: gredni rebrasti most, poprečni nosač, proračunska širina T-presjeka

DETERMINATION OF AN EFFECTIVE WIDTH OF A T-BEAM CROSS SECTION OF TRANSVERSAL RIBBED BRIDGE DECK

Abstract: In this paper an effective width of a T-beam cross section of transversal girder of underpass Vrata 1 is analyzed and valorized on the basis of field testing results and results of conducted calculations. The most common method used in ribbed bridge decks analysis is grillage analogy. Longitudinal and transversal girders, together with an effective part of a deck slab acts as T-shaped beams. Stiffness of longitudinal and transversal structural elements depends on effective width of the T-beams. The effective width of T-beams depends on several factors, among others it depends on the load applied on the bridge, which can vary in intensity and position. In this paper the effective widths of the T-beam of the transversal girder in the span are determined by using numerical calculation on finite element model for different load testing schemes. The effective widths of T-beam determined in this way are used for the calculation of deflection on a simple grillage models. Calculated deflections are compared with the corresponding measured deflection on underpass under test loading and deflections calculated on a simple grillage model in which the effective width of T-beam cross-section in the span is determined according to HRN ENV 1992-1-1.

Key words: ribbed bridge decks, transversal girder, effective width of T-beam

1 Uvod

Mnoge rasponske konstrukcije grednih mostova malih i srednjih raspona (10-40 m), u svijetu i u Hrvatskoj, projektirane su i izgrađene kao rebraste gredne konstrukcije [1-4]. Rebraste gredne rasponske konstrukcije sastavljene od uzdužnih (glavnih) nosača, poprečnih nosača i betonske ploče djeluju kao roštiljni sustavi [5-9]. Proračun se može provesti uz pomoć pojednostavnjenih analitičkih metoda ili se konstrukcija zamjenjuje proračunskim roštiljnim numeričkim modelom za proračun na računalo [5]. Iako suvremene konfiguracije računala omogućuju izradu proračunskih modela korištenjem štapnih, pločastih i prostornih elemenata ili njihovom kombinacijom, jednostavni roštiljni modeli sastavljeni od štapnih konačnih elemenata nisu izgubili svoje mjesto u inženjerskoj primjeni [7-13]. Jednostavne roštiljne modele karakterizira brzina i lakoća modeliranja te jednostavnost interpretacije rezultata, zadovoljavajuća točnost u usporedbi s rezultatima ispitivanja i rezultatima složenijih modela, kao i neovisnost o snažnim računalima [9,10,14,15].

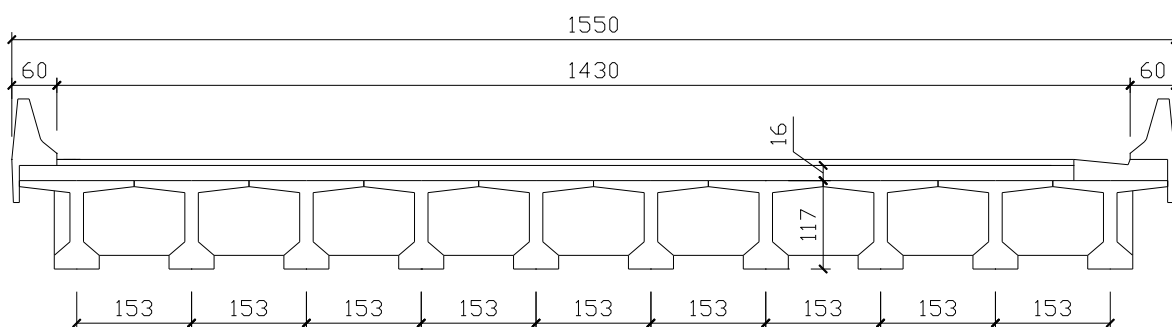
Jednostavni roštiljni modeli, osim za proračun i dimenzioniranje konstrukcije, jednostavni su i pouzdani za određivanje položaja mjernih mjesta i odabir mjerne opreme prije provođenja ispitivanja [14]. Često se rabe i u istraživačke svrhe, kao na primjer za vrjednovanje razdiobe opterećenja na rebrastim grednim mostovima prema preporukama norme AASHTO [9,16] ili vrjednovanje ekvivalentne proračunske širine štapnih elemenata za pojednostavnjeni roštiljni proračun pločastih mostova prema preporukama norme AASHTO [15].

U ovom radu jednostavni roštiljni model je korišten za vrjednovanje preporuke za određivanje proračunske širine T-presjeka poprečnog nosača na sredini raspona rebrastog grednog mosta Vrata 1 prema normi HRN ENV 1992-1-1 [17].

2 Opis podvožnjaka

Podvožnjak Vrata 1 nalazi se na dionici Vrata – Oštrovica autoceste Rijeka – Zagreb. Podvožnjak je jednorasponska konstrukcija. Svijetli otvor podvožnjaka je 19,00 m, a razmak između osi upornjaka je 20,00 m. Podvožnjak je projektiran s tri prometna traka širine 3,50 m, te zaustavnim trakom širine 2,50 m. Ukupna širina, zajedno sa zaštitnim trakom, rubnim trakom, rigolom i tipskom betonskom ogradom, iznosi 15,50 m.

Poprečni presjek rasponske konstrukcije sastoji se od deset montažnih prednapetih nosača T-presjeka (slika 1). Nosači su povezani kontinuiranom armiranobetonskom pločom te poprečnim nosačima iznad ležajeva i u sredini raspona. U statičkom pogledu, rasponska konstrukcija je roštilj sastavljen od deset uzdužnih, slobodno oslonjenih nosača raspona 20,0 m i poprečnih nosača iznad ležajeva i u sredini raspona.

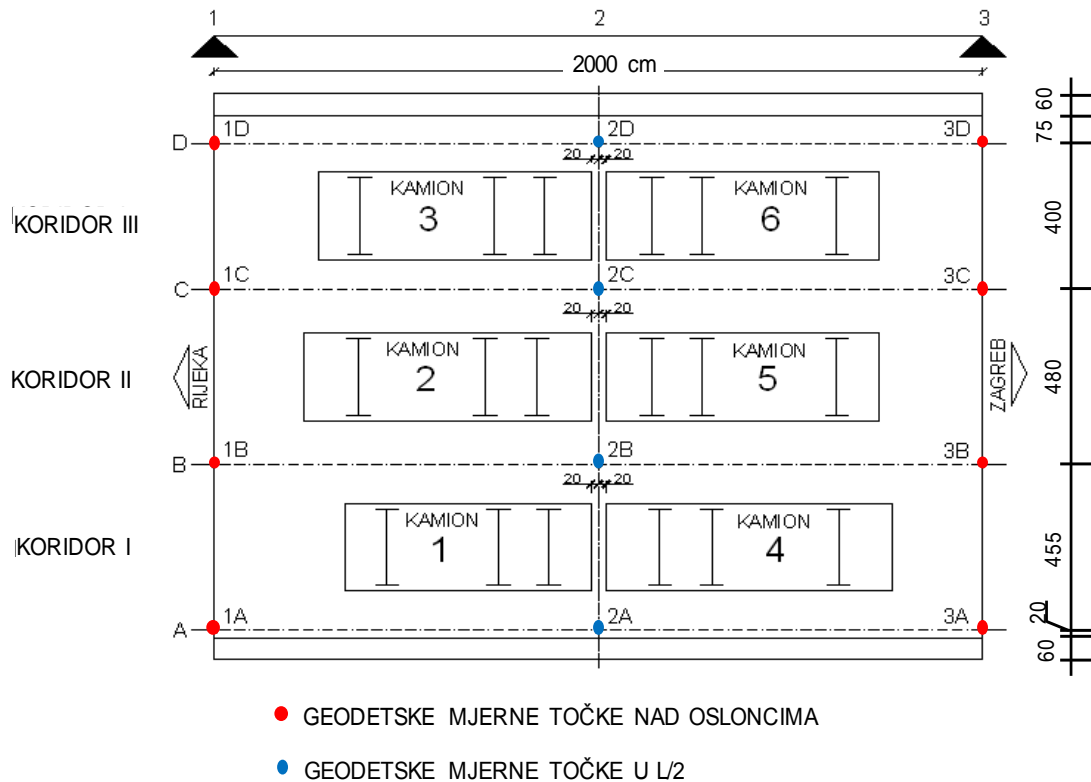


Slika 1 – Poprečna dispozicija mosta

3 Pokusno opterećenje

Ispitivanje podvožnjaka je provedeno u 5 faza. U prvoj i petoj fazi most je neopterećen; mjereno je početno stanje i stanje nakon rasterećenja. U drugoj, trećoj i četvrtoj fazi most je opterećen s dva, četiri ili 6 kamiona. U

poprečnom smjeru mosta kamioni su smješteni u tri koridora. Koridor I je na trasi s istočne strane podvožnjaka (između linija A i B), koridor II je između točaka B i C, a koridor III je između točaka C i D na zapadnoj strani podvožnjaka (slika 2). Razlikuju se nesimetrične faze, kada se kamioni nalaze u koridoru I i u koridorima I i II i simetrična faza, kada se opterećenje nalazi u sva tri koridora. Položaj, dimenzije kamiona i njihove osovinske težine definirane su u izvještaju [18].



Slika 2 – Položaj pokusnog opterećenja i mjernih točaka u tlocrtu mosta

Pomaci konstrukcije mjereni su metodom preciznog geometrijskog nivelmana u mjernim točkama u sredini raspona i iznad oslonaca. Progibi u sredini raspona određeni su iz izmjerenih pomaka [18]. U tablici 1 su prikazani izmjereni progibi u sredini raspona za pojedine faze opterećenja.

Tablica 1 – Izmjereni progibi v_i [mm]

Opterećenje	Mjerne točke			
	2A	2B	2C	2D
Nesimetrično 1	2,55	1,85	0,50	0,1
Nesimetrično 2	2,75	3,65	1,95	0,6
Simetrično	2,50	4,10	3,90	3,0

Razina pokusnog opterećenja na analiziranom podvožnjaku je takva da glavni nosivi elementi koji su prednapeti nisu raspucani (tj. nisu u stanju naprezanja II) pa se izmjereni progibi mogu smatrati elastičnima.

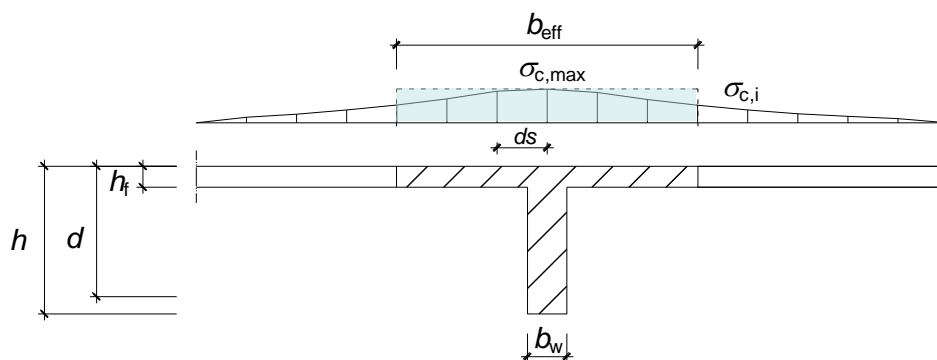
4 Određivanje proračunske širine T-presjeka poprečnog nosača u polju

Određivanje proračunske širine T-presjeka temelji se na analizi tlačnih naprezanja u ploči rebrastog presjeka. Tlačna naprezanja u ploči nisu konstantna, nego rastu prema rebro (hrptu). Kod vitkih T-presjeka, kod kojih neutralna os prolazi kroz rebro i koji zadovoljavaju uvjet $b_{\text{eff}}/b_w > 5$ i da je $h_f \leq 0,264 \cdot d$, dijagram naprezanja u tlačnoj ploči je približno jednak pravokutniku [19].

Stoga se, općenito, proračunska širina vitkih T-presjeka kod kojih neutralna os prolazi kroz rebro može odrediti prema izrazu:

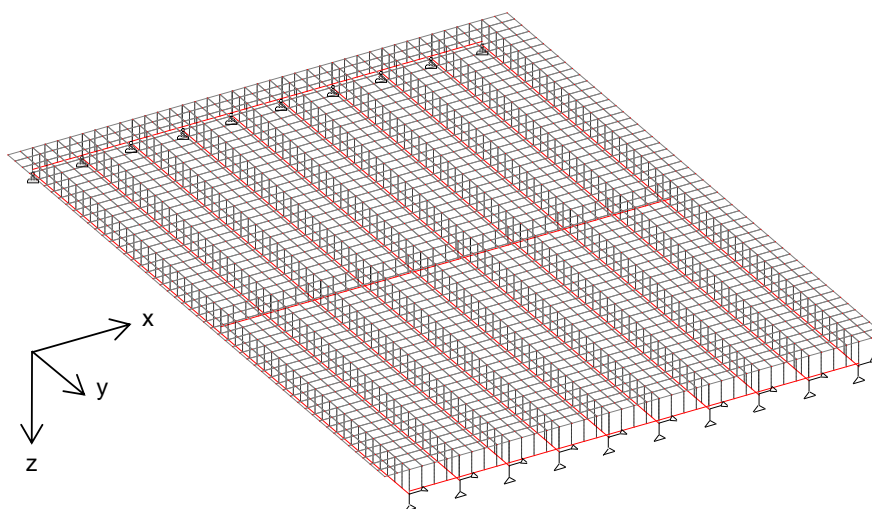
$$b_{\text{eff}} \cdot \sigma_{c,\text{max}} = \int \sigma_c \cdot ds \quad (1)$$

gdje $\int \sigma_c \cdot ds$ predstavlja ploštinu dijagrama tlačnih naprezanja (slika 3).



Slika 3 – Definicija proračunske širine T-presjeka b_{eff}

U analiziranom slučaju poprečnog nosača u polju raponske konstrukcije podvožnjaka Vrata 1 neutralna os prolazi kroz rebro, a presjek zadovoljava uvjete za vitki T-presjek ($h=113$ cm, $d=107$ cm, $b_w=30$ cm) pa se za određivanje sudjelujuće širine može koristiti izraz (1). Tlačna naprezanja u ploči analizirana su na proračunskom trodimenzionalnom modelu koji se sastoji od štapnih i pločastih konačnih elemenata (slika 4).

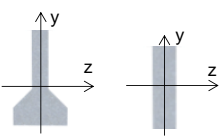


Slika 4 – Proračunski trodimenzionalni model

Geometrijske karakteristike štapnih elemenata koji se poklapaju s osima glavnih i poprečnih nosača određene su uzimajući u obzir samo hrptove tih nosača. Debljina pločastih elemenata je određena zbrojem debljine ploče i pojasnice glavnog nosača (prosječna debljina kolničke ploče je 27 cm).

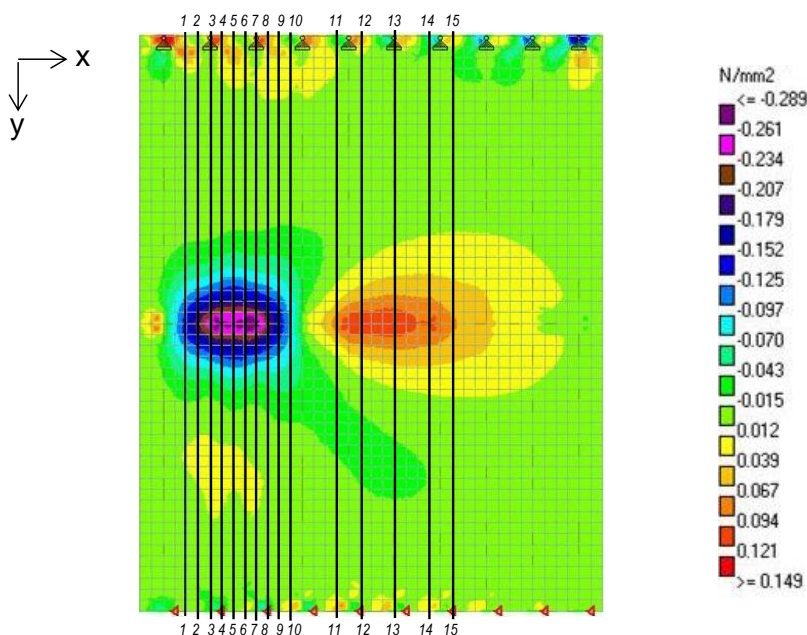
Geometrijske karakteristike štapnih elemenata prikazane su u tablici 2. Analiza tlačnih naprezanja provedena je za tri slučaja opterećenja pri ispitivanju pokusnim opterećenjem: nesimetrično opterećenje 1 (koridor I → 2 kamiona), nesimetrično opterećenje 2 (koridor I + II → 4 kamiona), simetrično opterećenje (koridor I + II + III → 6 kamiona).

Tablica 2 – Geometrijske karakteristike štapnih elemenata

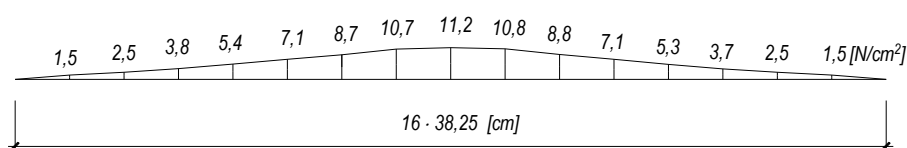
Štapni element	Orijentacija lokalnih koordinatnih osi	Ploština presjeka [m ²]	Moment tromosti [m ⁴]	
			I_z	I_y
Glavni nosač		0,3171	0,02698	0,00439
Poprečni rubni nosač		0,2140	0,02042	0,000713
Poprečni srednji nosač		0,2550	0,01535	0,001913

4.1 Proračunska širina T-presjeka za nesimetrično opterećenje 1

Na slici 5 prikazana su tlačna naprezanja u ploči za podvožnjak opterećen nesimetričnim opterećenjem 1.



Slika 5 – Tlačna naprezanja u ploči za nesimetrično opterećenje 1



Slika 6 – Tlačna naprezanja u ploči u presjeku 1-1 za nesimetrično opterećenje 1

Na slici 5 crte predstavljaju presjeke u kojima se određuju proračunske širine T-presjeka iz uvjeta postavljenog formulom (1). Kao primjer bit će prikazano na koji je način određena b_{eff} za presjek koji je označen kao prvi lijevo na slici 5. Za sve ostale presjeke vrijedi analogija. Iz slike 6 i izraza (1) slijedi:

$$b_{\text{eff},1-1} = \frac{\int \sigma_c \cdot ds}{\sigma_{c,\text{max}}} = \frac{3465}{11,2} \approx 310 \text{ cm} \quad (2)$$

Ostale proračunske širine su određene na istovjetan način i prikazane su u tablici 3.

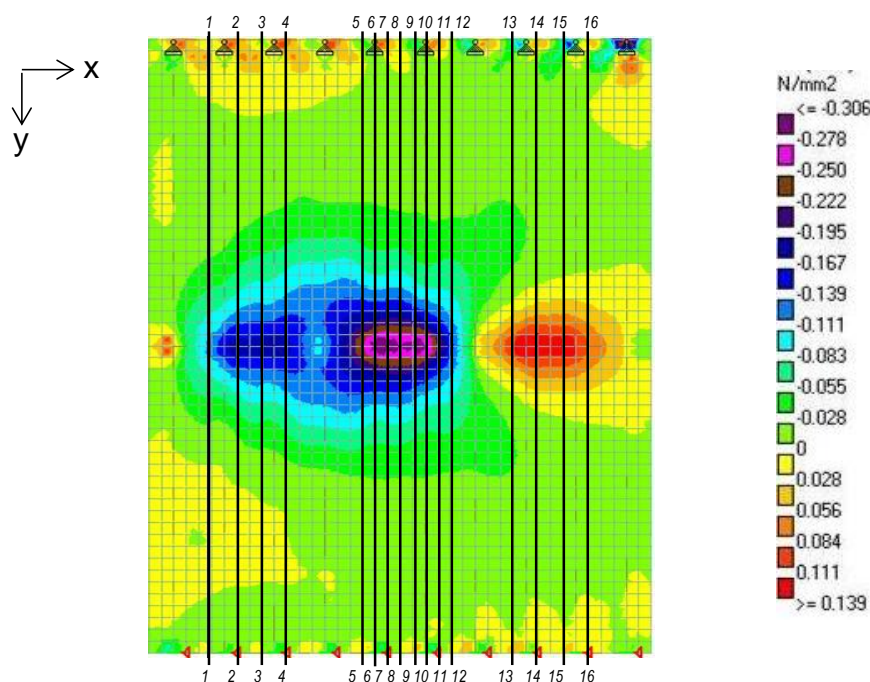
Tablica 3 – Proračunske širine određene za nesimetrično opterećenje 1

presjek	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	7-7	8-8	9-9	10-10	11-11	12-12	13-13	14-14	15-15
b_{eff} [cm]	310	228	189	205	254	274	213	185	260	348	117	182	211	251	303

Prosječna proračunska širina T-presjeka za nesimetrično opterećenje iznosi 230 cm.

4.2 Proračunska širina T-presjeka za nesimetrično opterećenje 2

Na slici 7 prikazana su tlačna naprežanja u ploči za podvožnjak opterećen nesimetričnim opterećenjem 2.



Slika 7 – Tlačna naprežanja u ploči za nesimetrično opterećenje 2

Na slici 7 crte predstavljaju presjeke u kojima se određuju proračunske širine T-presjeka iz uvjeta postavljenog formulom (1) za nesimetrično opterećenje 2. Proračunske širine su određene na istovjetan način kao u točki 4.1 i prikazane su u tablici 4.

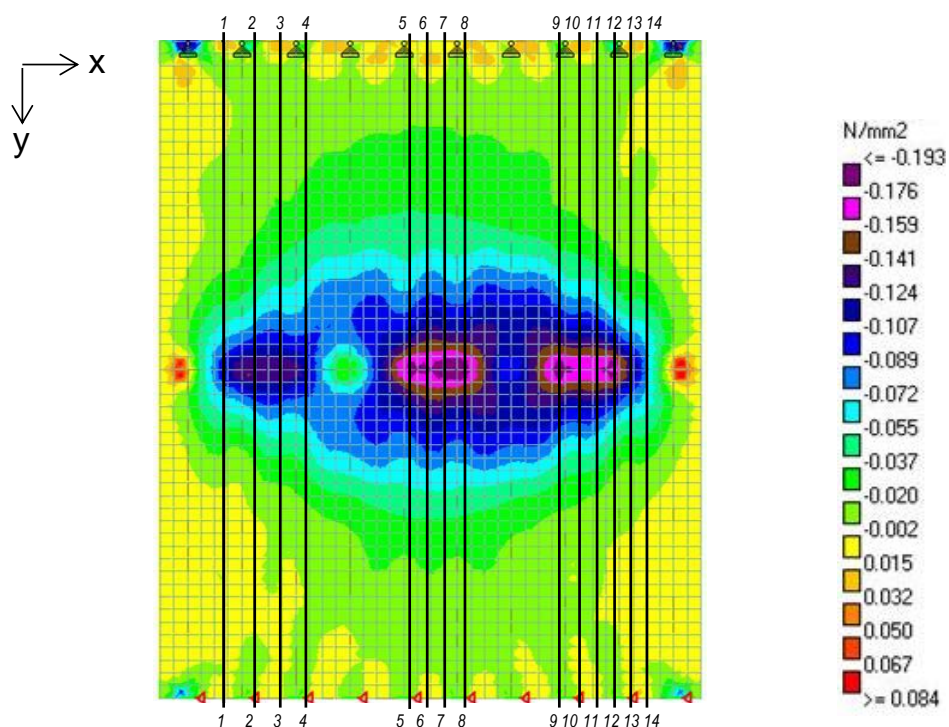
Tablica 4 – Proračunske širine određene za nesimetrično opterećenje 2

presjek	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	7-7	8-8	9-9	10-10	11-11	12-12	13-13	14-14	15-15	16-16
b_{eff} [cm]	335	325	391	396	404	300	294	340	325	245	237	335	117	172	197	204

Prosječna proračunska širina T-presjeka za nesimetrično opterećenje iznosi 288 cm.

4.3 Proračunska širina T-presjeka za simetrično opterećenje

Na slici 8 prikazana su tlačna naprezanja u ploči za podvožnjak opterećen simetričnim opterećenjem. Crne crte predstavljaju presjeka u kojima se određuju proračunske širine T-presjeka iz uvjeta postavljenog formulom (1) za simetrično opterećenje. Proračunske širine su određene na istovjetan način kao u točki 4.1 i prikazane su u tablici 5.

**Slika 8 – Tlačna naprezanja u ploči za simetrično opterećenje****Tablica 5 – Proračunske širine određene za simetrično opterećenje**

presjek	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	7-7	8-8	9-9	10-10	11-11	12-12	13-13	14-14
b_{eff} [cm]	296	312	422	491	451	484	541	451	354	373	314	235	206	321

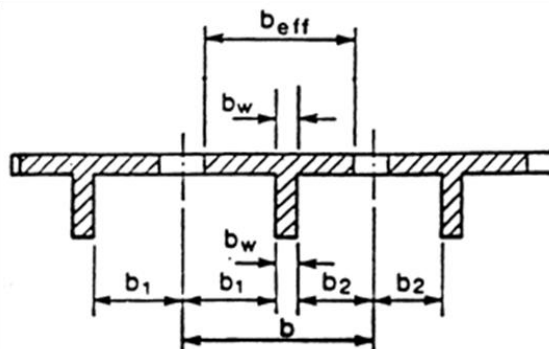
Prosječna proračunska širina T-presjeka za nesimetrično opterećenje iznosi 375 cm.

4.4 Proračunska širina T-presjeka za prema HRN ENV 1992-1-1

Proračunska širina T-presjeka b_{eff} (slika 10) prema [17] definira se kao:

$$b_{\text{eff}} = b_w \cdot \frac{1}{5} l_0 \leq b \quad (3)$$

gdje je l_0 razmak nul-točaka momentnog dijagrama, a oznake b_w i b su definirane na slici 9.



Slika 9 – Oznake iz HRN ENV 1992-1-1 [17]

U slučaju poprečnog nosača u polju podvožnjaka koji je posredno oslonjen na uzdužne nosače nije moguće jednoznačno odrediti razmak nul-točaka momentnog dijagrama (jer je za različite položaje opterećenja razmak nul-točaka momentnog dijagrama drugačiji). Za potrebe ovog istraživanja pretpostavlja se da je l_0 jednak osnom razmaku krajnjih uzdužnih nosača na koje se poprečni nosač oslanja. U slučaju analiziranog podvožnjaka tada je $l_0 = 9 \cdot 153 = 1377$ cm. Širina hrpta poprečnog nosača b_w je 30 cm. Prema izrazu (3) slijedi:

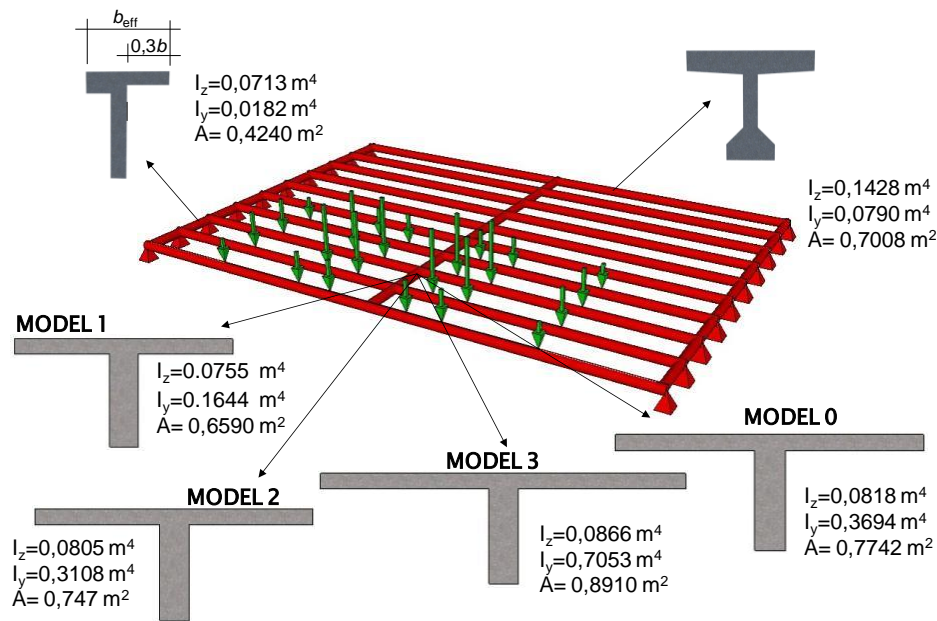
$$b_{\text{eff}} = b_w + \frac{1}{5} l_0 = 30 + \frac{1}{5} 1377 = 305,4 \text{ cm} \quad (4)$$

Usvojena proračunska širina T-presjeka prema normi [17] je 305 cm.

5 Jednostavni roštiljni model podvožnjaka

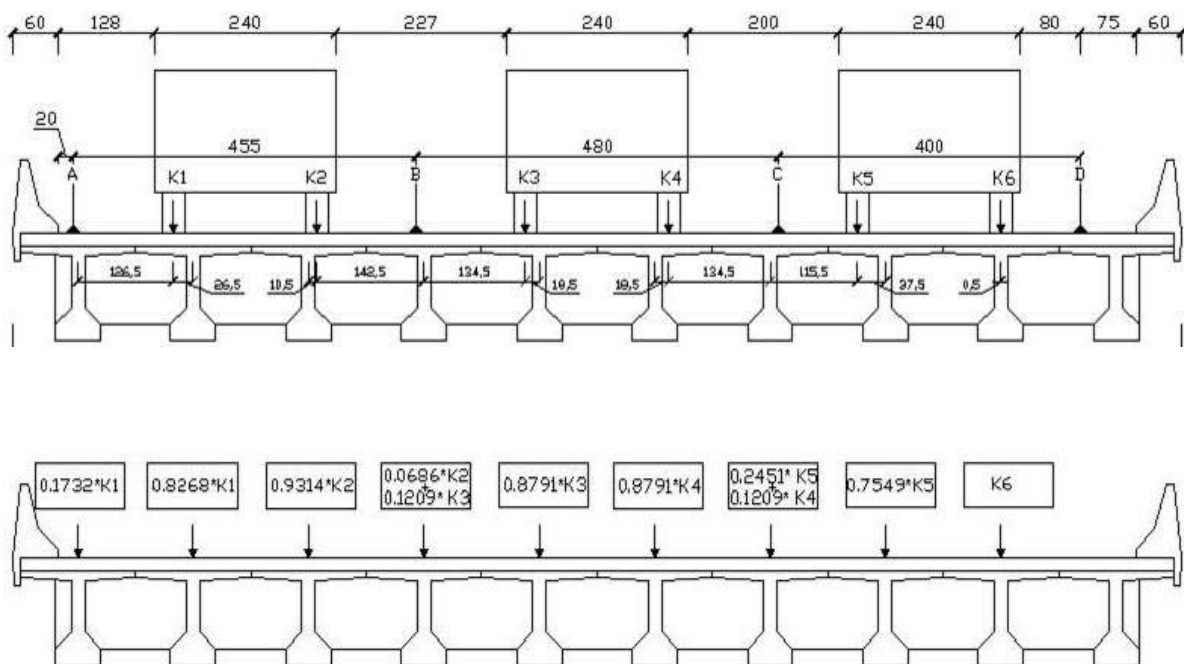
5.1 Opis modela

Jednostavni roštiljni proračunski model sastavljen je od 47 štapnih elemenata s 30 čvorova te 20 oslonaca (slika 10). Određivanje geometrijskih karakteristika zasniva se na određivanju proračunske širine T-presjeka pojedinih glavnih nosivih elemenata (uzdužnih nosača, poprečnih nosača u polju i poprečnih nosača nad osloncima). Proračunska širina T-presjeka glavnih nosača jednaka je osnom razmaku između uzdužnih nosača. S obzirom da je svaki glavni nosač izravno oslonjen na upornjake preko ležajeva, u poprečnim nosačima nad osloncima neće se pojaviti znatni momenti. Proračunska širina poprečnog nosača nad osloncem je određena temeljem preporuka za modeliranje mostova prema literaturi [20, 21] i prikazana na slici 10. Na poprečnu razdiobu opterećenja ovakvog roštiljnog sustava dominantno utječe savojna krutost poprečnog nosača u polju [9, 22]. Određivanje proračunske širine T-presjeka poprečnog nosača u polju je problematično zbog velike širine između poprečnih nosača (10 m) i elastičnog oslanjanja poprečnog na glavne nosače, tj. nedefiniranosti razmaka nul-točaka momentnog dijagrama (jer su za različite položaje prometnih opterećenja različiti momentni dijagrami).



Slika 10 – Prikaz jednostavnog roštiljnog modela podvožnjaka opterećenog nesimetričnim opterećenjem 1

Radi usporedbe veličina proračunskih širina T-presjeka b_{eff} određenih u točkama 4.1, 4.2 i 4.3 (kao idealnih za pojedino opterećenje) s vrijednošću b_{eff} , predloženom normom HRN ENV 1992-1-1 modelirane su četiri varijante jednostavnog roštiljnog modela. Svi modeli imaju iste geometrijske karakteristike uzdužnih nosača i poprečnih nosača nad osloncima, a različite su geometrijske karakteristike poprečnih nosača u polju (ovisno o proračunskoj širini T-presjeka). Zbog jednostavnosti, model u kojem je usvojena proračunska širina T-presjeka 230 cm nazvan je Model 1, model u kojem je usvojena proračunska širina T-presjeka 288 cm nazvan je Model 2, model u kojem je usvojena proračunska širina T-presjeka 375 cm nazvan je Model 3, a model u kojem je usvojena proračunska širina T-presjeka 305 cm prema normi HRN ENV 1992-1-1 nazvan je Model 0.



Slika 11 – Raspored pokusnog opterećenja na glavne nosače u poprečnom presjeku mosta

Jednostavni roštiljni model je opterećen koncentriranim silama koje predstavljaju težine po pojedinim kotačima kamiona i djeluju na uzdužne štapove. S obzirom da se težišta kotača ne poklapaju s težištima glavnih nosača, određen je udio opterećenja svakog kotača koji prihvaćaju najbliži glavni nosači (slika 11).

5.2 Rezultati statičkog proračuna na Modelu 0

Model 0 modeliran je s geometrijskim karakteristikama poprečnog nosača u polju s proračunskom širinom 305 cm, dobivenom prema formuli koja je predložena normom HRN ENV 1992-1-1. Proračun obuhvaća sve tri vrste pokusnog opterećenja zbog usporedbe rezultata s modelima čije su proračunske širine određene za pojedini tip opterećenja. Veličine proračunanih progiba računalni program Staad.PRO daje u čvorovima modela. Na mjestima gdje se položaj mjernih točaka ne podudara s položajem čvorova u modelu, progib je određen linearnom interpolacijom. U tablici 6 su prikazani proračunani progibi na mjestima mjernih točaka 2A, 2B, 2C i 2D na Modelu 0. Negativnim predznakom označeno je izdizanje konstrukcije na promatranom mjestu.

Tablica 6 – Proračunani progibi $v_{t,0}$ na Modelu 0 [mm]

Opterećenje	Mjerne točke			
	2A	2B	2C	2D
Nesimetrično 1	4,295	2,450	0,550	-0,407
Nesimetrično 2	4,915	4,973	3,073	0,458
Simetrično	4,455	5,643	5,675	4,501

5.3 Rezultati proračuna na Modelu 1

Za Model 1 usvojene su karakteristike poprečnog nosača u polju s proračunskom širinom 230 cm koja je dobivena analizom dijagrama naprezanja za slučaj nesimetričnog opterećenja 1. U tablici 7 su prikazani proračunani progibi za nesimetrično opterećenje 1 na mjestima mjernih točaka 2A, 2B, 2C i 2D na Modelu 1. Negativnim predznakom označeno je izdizanje konstrukcije na promatranom mjestu.

Tablica 7 – Proračunani progibi $v_{t,1}$ na Modelu 1 [mm]

Opterećenje	Mjerne točke			
	2A	2B	2C	2D
Nesimetrično 1	4,295	2,451	0,536	-0,394

5.4 Rezultati proračuna na Modelu 2

U Modelu 2 usvojene su geometrijske karakteristike poprečnog nosača u polju s proračunskom širinom 288 cm koja je dobivena analizom dijagrama naprezanja za slučaj nesimetričnog opterećenja 2. U tablici 8 su prikazani proračunani progibi na Modelu 2 za nesimetrično opterećenje 2 na mjestima mjernih točaka 2A, 2B, 2C i 2D.

Tablica 8 – Proračunani progibi $v_{t,2}$ na Modelu 2 [mm]

Opterećenje	Mjerne točke			
	2A	2B	2C	2D
Nesimetrično 2	4,942	4,978	3,076	0,453

5.5 Rezultati proračuna na Modelu 3

U Modelu 3 geometrijske karakteristike poprečnog nosača u polju određene su za T-presjek s proračunskom širinom 375 cm koja je dobivena analizom dijagrama naprezanja za slučaj simetričnog opterećenja. U tablici 9 su prikazani proračunani progibi za simetrično opterećenje na mjestima mjernih točaka 2A, 2B, 2C i 2D na Modelu 3.

Tablica 9 – Proračunani progibi $v_{t,3}$ na Modelu 3 [mm]

Opterećenje	Mjerne točke			
	2A	2B	2C	2D
Simetrično	4,479	5,633	5,663	4,521

6 Usporedba rezultata

6.1 Nesimetrično opterećenje 1

U slučaju nesimetričnog opterećenja 1 provodi se usporedba progiba Modela 1 (čija je proračunska širina T-presjeka poprečnog nosača u sredini raspona određena upravo za taj tip opterećenja), progiba Modela 0 (proračunska širina određena prema HRN ENV 1992-1-1) i izmjerenih progiba zbog nesimetričnog opterećenja 1.

Tablica 10 – Usporedba progiba za nesimetrično opterećenje 1

Mjerna točka	Izmjereni progibi v_i [mm]	Progibi modela 0 $v_{t,0}$ [mm]	Progibi modela 1 $v_{t,1}$ [mm]	$v_i/v_{t,0}$	$v_i/v_{t,1}$	$ v_{t,0}-v_{t,1} /v_{t,0}$
2A	2,55	4,295	4,295	59 %	59 %	0
2B	1,85	2,450	2,451	76 %	76 %	0,04 %
2C	0,5	0,550	0,536	91 %	93 %	2,55%
2D	0,1	-0,407	-0,394	*	*	0,39%
* __ Napomena: S obzirom da je izmjerena veličina progiba na tom mjestu mala, a procijenjena srednja pogreška mjerenja je $\pm 0,2$ mm, treba je uzeti s rezervom.					srednja vrijednost	0,75 %

Primjenom proračunske širine određene iz prostornog modela za nesimetrično opterećenje 1, u Modelu 1 smo dobili neznatno bolje rezultate u usporedbi s izmjerenim vrijednostima nego što to daje Model 0 s proračunskom širinom prema normi [17] (tablica 10). Proračunani progib u točkama 2C i 2D na Modelu 1 bliži je izmjenom progibu nego progib proračunan na Modelu 0 u tim istim točkama. Vrijednosti progiba u točkama 2A i 2B su identične za oba jednostavna roštiljna modela. Ostvareno poboljšanje može se smatrati zanemarivim uzmemo li u obzir da srednja vrijednost odstupanja progiba ova dva modela iznosi samo 0,75 %.

6.2 Nesimetrično opterećenje 2

Za nesimetrično opterećenje 2 usporedba progiba Modela 2 (čija je proračunska širina T-presjeka poprečnog nosača u sredini raspona određena upravo za taj tip opterećenja), progiba Modela 0 (proračunska širina određena prema HRN ENV 1992-1-1) i izmjerenih progiba zbog nesimetričnog opterećenja 2.

Tablica 11 – Usporedba progiba za nesimetrično opterećenje 2

Mjerna točka	Izmjereni progibi v [mm]	Progibi modela 0 $v_{t,0}$ [mm]	Progibi modela 2 $v_{t,2}$ [mm]	$v/v_{t,0}$	$v/v_{t,2}$	$ v_{t,0}-v_{t,2} /v_{t,0}$
2A	2,75	4,951	4,942	55 %	56 %	0,24 %
2B	3,65	4,973	4,978	73 %	73 %	0,1 %
2C	1,95	3,073	3,076	63 %	63 %	0,1%
2D	0,6	0,458	0,453	131 % *	132 % *	1,09%
* Napomena: S obzirom da je izmjerena veličina progiba na tom mjestu mala, a procijenjena srednja pogreška mjerenja je $\pm 0,2$ mm, treba je uzeti s rezervom.					srednja vrijednost	0,38 %

Iz tablice 11 vidljivo je da u odnosu na izmjerene vrijednosti progiba, Model 2 daje zanemarivo bliže vrijednosti progiba u mjernoj točki 2A u odnosu na vrijednosti progiba Modela 0, dok u mjernim točkama 2B, 2C i 2D Model 2 daje zanemarivo dalje vrijednosti progiba. Razlike u veličinama proračunanih progiba na Modelu 2 i Modelu 0 vrlo su male (razlika u tisućinkama milimetra).

6.3 Simetrično opterećenje

U slučaju simetričnog opterećenja uspoređuju se progibi Modela 3 (čija je proračunska širina T-presjeka poprečnog nosača u sredini raspona određena upravo za taj tip opterećenja), progiba Modela 0 (proračunska širina određena prema HRN ENV 1992-1-1) i izmjerenih progiba zbog simetričnog opterećenja.

Tablica 12 – Usporedba progiba za simetrično opterećenje

Mjerna točka	Izmjereni progibi v [mm]	Progibi modela 0 $v_{t,0}$ [mm]	Progibi modela 3 $v_{t,3}$ [mm]	$v/v_{t,0}$	$v/v_{t,3}$	$ v_{t,0}-v_{t,3} /v_{t,0}$
2A	2,5	4,455	4,479	56 %	56 %	0,53 %
2B	4,1	5,643	5,633	73 %	73 %	0,18 %
2C	3,9	5,675	5,663	69 %	69 %	0,21 %
2D	3,0	4,501	4,521	67 %	66 %	0,44 %
					srednja vrijednost	0,34 %

Progibi Modela 3 u odnosu na progibe Modela 0 u točkama 2A i 2D su neznatno dalji, a u točkama 2B i 2C neznatno bliži izmjerenim progibima. Razlike u proračunanim progibima su zanemarive uzmemo li u obzir da srednja vrijednost odstupanja progiba ova dva modela iznosi samo 0,34 %.

Općenito, omjeri izmjerenih i izračunanih progiba u ovom radu se kreću u granicama od 55-93% osim u slučaju gdje su izmjerene vrijednosti male pa na njih može bitno utjecati točnost mjerenja (vidjeti napomenu u

tablici 11). Kod betonskih mostova često se uočava znatna razlika izmjerenih i proračunanih veličina progiba [23-25]. Pritom su izmjereni progibi manji od proračunanih. Razlozi ovakvim odstupanjima izmjerenih i proračunanih veličina progiba mogu biti sljedeći: moduli elastičnosti su određeni prema projektiranom razredu tlačne čvrstoće betona određenom u projektu (ne postoje rezultati terenskih ispitivanja), dimenzije glavnih nosivih elemenata su usvojene iz projektne dokumentacije (izvedene dimenzije mogu odstupati od projektom predviđenih), nosivosti rasponske konstrukcije doprinose i nekonstrukcijski dijelovi (betonske ograde, pješačke staze, asfalt i slično). Doprinos nekonstrukcijskih dijelova, prema sadašnjoj razini znanja, ne može se pouzdano obuhvatiti proračunskim modelom te se kod proračuna mostova zanemaruje.

7 Zaključak

Roštiljni modeli su jednostavni za modeliranje i interpretaciju rezultata te se stoga često koriste za proračun mostova. U radu je analizirano i vrjednovano nekoliko varijanti jednostavnog roštiljnog modela kojim je modelirana rebrasta gredna rasponska konstrukcija podvožnjaka Vrata 1.

U proračunu rebrastih grednih mostova izuzetno je važno modeliranje krutosti sastavnih konstrukcijskih elemenata. Određivanje geometrijskih karakteristika potrebnih za modeliranje krutosti jednoznačno je za uzdužne (glavne) nosače i poprečne nosače iznad oslonaca. Određivanje krutosti poprečnih nosača u polju je složenija zadaća s obzirom na činjenicu da je razmak između susjednih poprečnih nosača velik i da je poprečni nosač elastično oslonjen na glavne nosače pa za različite položaje opterećenja ima različit razmak nul-točaka momentnog dijagrama na temelju kojeg se određuje proračunska širina poprečnog nosača. Zbog toga je za određivanje proračunske širine T-presjeka za tri različite vrste pokusnog opterećenja podvožnjaka Vrata 1, korištenjem metode konačnih elemenata izrađen trodimenzionalni model sastavljen od štapnih i pločastih elemenata. Analizom tlačnih naprezanja u pločastim elementima kojima se modelira ploča rasponske konstrukcije određene su proračunske širine za svako od tri primijenjena opterećenja.

Na temelju ovako određenih proračunskih širina T-presjeka određene su geometrijske karakteristike poprečnog nosača u polju i izrađene različite varijante jednostavnog roštiljnog modela. Progibi proračunani na ovakvim modelima uspoređeni su s izmjerenim progibima nastalim pokusnim opterećenjem i progibima proračunanim na jednostavnom roštiljnom modelu za koji je proračunska širina T-presjeka poprečnog nosača u polju određena prema normi HRN ENV 1992-1-1. Na temelju provedenih usporedbi utvrđeno je da je razlika između progiba koji su proračunani na različitim varijantama jednostavnih roštiljnih modela zanemariva. Također su zanemariva i poboljšanja točnosti proračuna vrijednosti progiba u odnosu na izmjerene vrijednosti progiba koja su postignuta na modelima za koje je proračunska širina T-presjeka poprečnog nosača u polju određena pomoću trodimenzionalnog modela od štapnih i pločastih konačnih elemenata za svako pojedino pokusno opterećenje za koje su proračunavani i mjereni progibi.

Stoga se može zaključiti da je u promatranom slučaju podvožnjaka Vrata 1 proračunska širina T-presjeka poprečnog nosača u polju, određena prema normi HRN ENV 1992-1-1, uz pretpostavku da je razmak nul-točaka momentnog dijagrama na poprečnom nosaču u polju jednak razmaku najudaljenijih glavnih nosača, potpuno prihvatljiva za uporabu u jednostavnom roštiljnom modelu rasponske konstrukcije. Sličnu analizu valja provesti na većem broju rebrastih grednih mostova s poprečnim nosačem (ili nosačima) u polju kako bi se mogla dati općenita preporuka za određivanje sudjelujuće širine T-presjeka poprečnih nosača u polju.

Literatura

- [1] Sesar, P. 2005: Optimizacija spojeva kontinuiranih mostova. Disertacija. Građevinski fakultet. Sveučilište u Osijeku. Osijek



- [2] Hastak, M., Mirmiran, A., Miller, R., Shah, R., Castrodale, R. 2003: State of Practice for Positive Moment Connections in Prestressed Concrete Girders Made Continuous. *Journal of Bridge Engineering*. 8(5): 267-272.
- [3] Marić, Z.; Tkalčić, D. 2003. Nova postignuća u građenju betonskih mostova u Hrvatskoj. *Građevinar*. 55(4). 191-200.
- [4] Radić, J., Šavor, Z., Puž, G. 2000: Tipizacija mostova za autoceste. *Građevinar*. 52(6). 621-330.
- [5] Mondorf, Paul E. 2006. *Concrete bridges*. Taylor and Francis. New York
- [6] Kayal, S. 2007: Plastic Rotation of an RCC T-Beam Bridge Girder under the Combined Influence of Flexure and Torsion. *Journal of Bridge Engineering*. 12(1). 21-30.
- [7] Qaqish, M. & Fadda, E. & Akawwi, E. 2008: Design of T-beam bridge by finite element method and AASHTO specification. *KMITL Science Journal*. 8(1): 24-34.
- [8] Gupta, T., Misra, A. 2007: Effect on support reactions of T-beam skew bridge decks. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2(1). 1-8.
- [9] Kaskish, M. 2007: Bending moments Distribution at the Main Structural Elements of Skew Dech-Slab and Their implementation on Cost Effectiveness. *Americal Journal of Applied Sciences*. 4(12). 1036-1039.
- [10] Linzell, D. G., Shura, J. F. 2010: Erection behaviour and grillage model accuracy for a large radius curved bridge. *Journal of constructional steel research*. 66. 342-350.
- [11] Hajjar, J. F., Krzmarzick, D. and Pallarés, L. 2010: Measured behaviour of curved composite I-girder bridge. *Journal of constructional steel research*. 66. 351-368.
- [12] Kaveh, A., and Talatahari, S. 2010: Charged system search for optimum grillage system design using LRFD – AISC code. *Journal of constructional steel research*. 66. 767-771.
- [13] Al-Sarraf, S. Z., Ali, A. A., Al-Dujaili, R.A. 2009: Analysis of composite bridge superstructures using modified grillage method, *Eng. & Tech. Journal*. 27(5). 942-953.
- [14] Neving, D., Linzell, D., Laman, J. 2006: Examination of Level of Analysis Accuracy for Curved I-Girder Bridges through Comparisons to Field Data. *Journal of Bridge Engineering*. 11(2). 160-168.
- [15] Amer, A., Arockiasamy, M. 1999: Load Distribution of Existing Solid Slab Bridges Based on Field Tests. *Journal of Bridge Engineering*. 4(3). 189-193.
- [16] Barr, P. J., Eberhard, M. O., Stanton, J. F. 2001: Live-Load Distribution Factors in Prestressed Concrete Girder Bridges. *Journal of Bridge Engineering*. 6(5). 298-306.
- [17] HRN ENV 1992-1-1, Eurokod 2, 2004: Projektiranje betonskih konstrukcija – 1-1. dio: Opća pravila i pravila za zgrade (prema ENV 1992-1-1:1991), Zagreb
- [18] Izvještaj o ispitivanju pokusnim opterećenjem: Most Vrata 1 na dionici Vrata – Oštrovica poluautoceste Rijeka – Zagreb u km 31+780. 1996: IGH, Zagreb
- [19] Tomičić, I. 1996: *Betonske konstrukcije*. HDGK, Zagreb
- [20] O'Brien, E. J. & Keogh, D. L. 2005: *Bridge deck analysis*. Taylor&Francis group, London
- [21] Radić, J. 2007: *Masivni mostovi*. Hrvatska sveučilišna naklada. Zagreb
- [22] Ardalić, Z. 2011: *Valoriziranje različitih roštiljnih proračunskih modela na temelju provedenih terenskih ispitivanja podvožnjaka Vrata 1*. Diplomski rad. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci. Rijeka
- [23] Šimunić, Ž., Radić, J., Mekjavić, I., Pavlović, B. 2001: Analiza trajnosti grednih mostova na temelju dinamičkih i statičkih pokazatelja, *Građevinar*, 52(2). 61-74.
- [24] Čajić, A., Damjanović, D., Rak, M. 2008: Test Loading of Underpass Kikovica with Emphasis on Transverse Distribution of Loading. *Proceedings of 25th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*. Daniel, M. ; Holy, S. ; Ružička, M. (ur.). Prag: Czech Technical University, 33-34.
- [25] Marović, P., Bertolino, M., Marović, I. 2009: Experimental static and dynamic testing of the Dabar Bridge near Šibenik . *Proceedings of the 26th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics*. Eichseder, Wilfried (ur.). Leoben: MontanUniversitaet, 143-144.