

## Uparedna analiza metoda prora una uticaja lokalnog savijanja pojasa jednošinskih nosa a dizalica

GORAN M. CVIJOVI , Vazduhoplovna akademija, Beograd  
SR AN M. BOŠNJAK, Univerzitet u Beogradu,  
Mašinski fakultet, Beograd

Originalni nau ni rad  
UDC: 621.873-21:519.6  
DOI: 10.5937/tehnika1604563C

*Rezultati numeri ko-eksperimentalnih istraživanja problema lokalnog savijanja, obavljenih na klasi nim i srednje širokim I profilima, predstavljali su osnovu za donošenje aktuelnog standarda (EN 15011:2014) koji propisuje postupak prora una lokalnih napona izazvanih dejstvom to kova kolica. S obzirom na injenicu da se za izradu glavnih nosa a jednošinskih transportnih sistema danas dominantno koriste širokopojasni IPB (HE-A, HE-B) profili, u radu su prezentirani rezultati prora una lokalnih napona izazvanih dejstvom to kova kolica na pojas profila HE-A, primenom metoda i postupaka relevantnih istraživa a, postupka koji propisuje standard EN 15011, kao i rezultati prora una primenom metode kona nih elemenata. Na osnovu uporedne analize rezultata uo eno je da u zoni tranzicije donji pojas/rebro podužni lokalni naponi na donjoj konturi pojasa, odre eni primenom navedenog standarda imaju zatežu i karakter, dok sve ostale metode, uklju uju i i metodu kona nih elemenata, daju pritiskuju i karakter razmatranih napona. Osim toga, svi navedeni postupci, izuzev metode kona nih elemenata, usvajaju pretpostavku da su na gornjoj i donjoj konturi optere enog pojasa apsolutne vrednosti napona izazvanih lokalnim savijanjem jednake, što nema fizi kog opravdanja. Imaju i u vidu injenicu da identifikacija napona izazvanih lokalnim savijanjem pojasa predstavlja izuzetno važnu etapu dokazivanja vrsto e jednošinskih nosa a, zaklju uje se da primena standarda EN 15011 ne daje pouzdane rezultate kada je re o širokopojasnim profilima.*

**Klju ne re i:** jednošinski nosa i dizalica, lokalno savijanje, EN 15011, metoda kona nih elemenata

### 1. UVOD

Razli iti sistemi unutrašnjeg transporta široko koriste koncept kolica ovešenih o valjani profil, koji predstavlja baznu nose u konstrukciju za transport tereta. To kovi kolica kre u se po donjem pojasu profila i, pored opšteg savijanja nosa a, izazivaju i lokalna dejstva.

Istorijski posmatrano, kao glavni nosa i kod svih navedenih konstrukcionih rešenja najpre su koriš eni takozvani obi ni valjani I profili, sa pojasevima pod nagibom. Nedovoljna bo na stabilnost zbog relativno uskih pojaseva nosa a izvedenih od obi nih valjanih I profila zahteva njihovo konstrukciono oja avanje. To se, naj eš e, ostvaruje dodavanjem valjanog U profila na pritisnuti pojas, ili dodavanjem kutijastog nosa a trapeznog ili pravougaonog popre nog preseka.

Obi ne valjane I profile sa pojasevima pod nagib-

Adresa autora: Goran Cvijovi , Vazduhoplovna akademija, Beograd, Bulevar vojvode Bojovi a 2

Rad primljen: 02.06.2016.

Rad prihva en: 13.06.2016.

om tokom vremena potisnuli su srednje široki valjani IPE profili sa paralelnom konturom pojaseva. Me utim, zbog ograni enja vezanih za nosivost IPE profila (maksimalna veli ina IPE 600, tj. maksimalna visina 600 mm) u poslednjih više od 20 godina, za izradu glavnih nosa a jednogredih dizalica i dizali nih staza, dominantno se koriste širokopojasni IPB (HE-A, HE-B) profili.

Njihova nosivost je znatno ve a, jer se izra uju do maksimalne visine profila  $h=1000$  mm. Od posebnog je zna aja i injenica da je po ev od veli ine 300 (HE-A 300, HE-B 300) do veli ine 1000 (HE-A 1000, HE-B 1000) širina pojaseva svih širokopojasnih IPB profila konstantna i iznosi  $b=300$  mm.

Dejstvo to kova kolica izaziva lokalno savijanje donjeg pojasa nosa a i pojavu dvoosnog naponskog stanja, slika 1(a). Podužni napon usled lokalnog savijanja ( $\sigma_{x,l}$ ) menja se po debljini pojasa, slika 1(b), i algebarski se sabira sa naponom od opšteg (globalnog) savijanja ( $\sigma_{x,f}$ ),

$$\sigma_{x,tot} = \sigma_{x,f} + \sigma_{x,l} \quad (1)$$

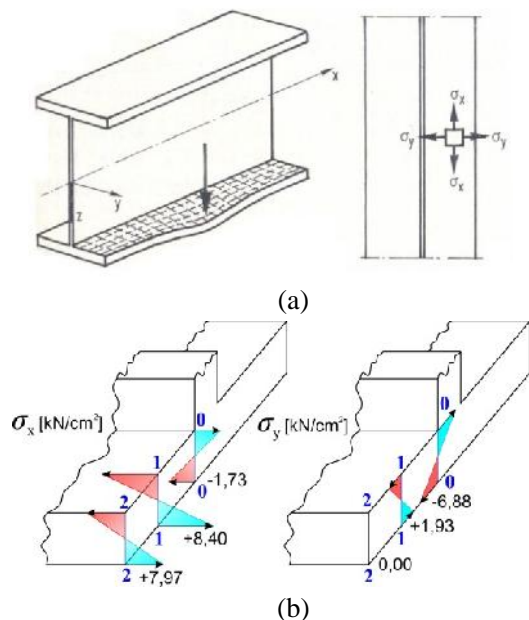
Napon usled popre nog savijanja pojasa nosa  $a$  ( $\sigma_y$ ) tako e se menja po debljini pojasa nosa  $a$ , slika 1 (b).

Naponi izazvani lokalnim dejstvom to ka (optere enje  $F$ ) na rastojanju  $i$  od slobodne ivice donjeg pojasa (debljine  $t$ ), slika 2, odre uju se na osnovu opštih izraza

$$\tau_{Fx} = c_x(i) \frac{F}{t^2}, \quad (2)$$

$$\tau_{Fy} = c_y(i) \frac{F}{t^2}, \quad (3)$$

u kojima su  $c_x(i)$  i  $c_y(i)$  naponski koeficijenti u podužnom i popre nom pravcu, slika 2. Umesto rastojanja  $i$ , esto se koriste bezdimenzioni parametri položaja to ka, koji uzimaju u obzir odnos rastojanja to ka od slobodne ivice pojasa i širine pojasa, na primer:  $c/a = (a-i)/a$ , slike 2 i 9;  $= 2i/(b-s)$ , slike 7 i 10.



Slika 1 – (a) Lokalno dejstvo to kova na donji pojas glavnog nosa  $a$  [1]; (b) distribucija napona izazvanih globalnim i lokalnim savijanjem [2]

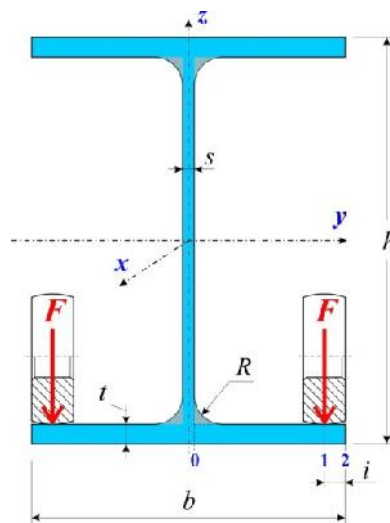
Osim od intenziteta optere enja, veli ine napona izazvanih lokalnim savijanjem zavise i od debljine pojasa. Obi ni (klasi ni) I profili imaju ve u debljinu pojaseva od IPE profila, iji su pojasevi najtanji za istu visinu popre nog preseka. Kod širokopojasnih profila IPB (HE-A, HE-B) debljine pojaseva zna ajno su ve e, zbog ega se oni danas dominantno koriste za izradu glavnih nosa  $a$ .

Prva rešenja [3] problema odre ivanja napona izazvanih lokalnim savijanjem pojaseva nosa  $a$  dobijena su primenom teorije savijanja plo a. Nakon toga, vršena su i eksperimentalna istraživanja sa ciljem da se što ta nije odredi lokalno naponsko stanje. Istraživanja

Hanovera i Rajhvalda [4, 5], obavljena za potrebe FEM (Fédération Européenne de la Manutention), obuhvatala su rezultate svih prethodnih referentnih istraživanja [6, 7, 8, 9] i predstavljala su osnovu za donošenje aneksa E standarda EN 15011 [10], koji je usvojila i naša zemlja (SRPS EN 15011:2014). Na osnovu analize radova od kojih su u svom istraživanju pošli Hanover i Rajhvald, zaključuje se da su sva eksperimentalna istraživanja obavljena na klasi nim I profilima, odnosno na profilima kod kojih su konture pojaseva pod nagibom, kao i na srednje širokim IPE profilima sa paralelnim konturama pojaseva. U postojećoj literaturi, problem identifikacije lokalnog naponskog stanja širokopojasnih IPB profila (HE-A, HE-B) nije razmatran. Upravo zbog toga, nametnulo se pitanje ta nosti primene izraza formiranih na osnovu istraživanja klasi nih I profila, kao i srednje širokih IPE profila, na problem identifikacije lokalnog naponskog stanja širokopojasnih IPB profila, imaju i u vidu injenicu da se njihove geometrijske karakteristike zna ajno razlikuju od geometrijskih karakteristika pomenutih klasa profila.

## 2. PREGLED POSTUPAKA I IZRAZA ZA PRORA UN LOKALNOG NAPONSKOG STANJA

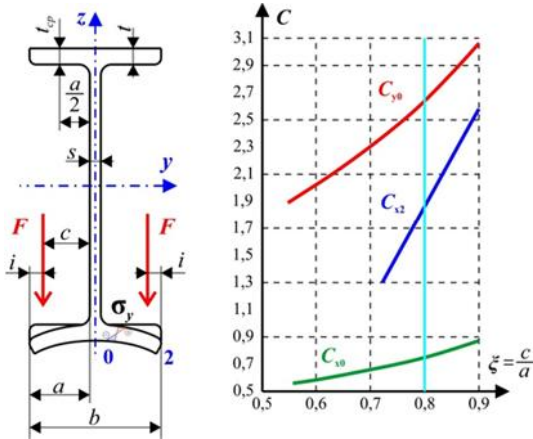
Izgled popre nog preseka nosa  $a$  optere enog lokalnim dejstvom to kova kolica, slika 2, asociirao je i navodio ve inu istraživa a da problem lokalnog savijanja rešava koriš enjem modela ekvivalentne konzole, ija širina odgovara širini zone lokalnog uticaja to ka. Saglasno tome, najve i naponi o ekvivalentni su u zoni tranzicije donji pojas/rebro, odnosno u ukleštenju ekvivalentne konzole, presek 0, slika 2, dok naponska stanja neposredno ispod to ka (presek 1) i na slobodnoj ivici donjeg pojasa (presek 2) nisu podrobno analizirana, osim u standardu EN 15011.



Slika 2 - Nosa otvorenog popre nog preseka (HE-A 360) optere en to kovima kolica

2.1 Gohberg

Sintezom teorijskog rešenja Papkovi a [3] i rezultata eksperimentalnog istraživanja na valjanom I profilu koje je dao Rozenštajn [11], Gohberg [12] je na osnovu rezultata sopstvenih istraživanja definisao krive za identifikaciju lokalnih naponskih stanja donjeg pojasa izloženog dejstvu to kova kolica koja nose vitlo sa teretom, slika 3.

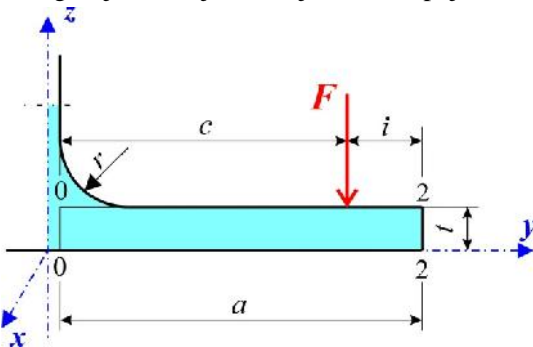


Slika 3 - Položaj optere enja izazvanog dejstvom to ka i dijagrami naponskih koeficijenata [12]

2.2 Klepel i Li (Klöppele, Lie)

Postupak prora una prema Klepelu i Liu [13], zasnovan na teoriji plo a, slika 4, ne omogu ava da se lokalni naponi odrede za širi spektar položaja to ka, ve samo za konstantnu vrednost parametra položaja to ka c/a=0,85.

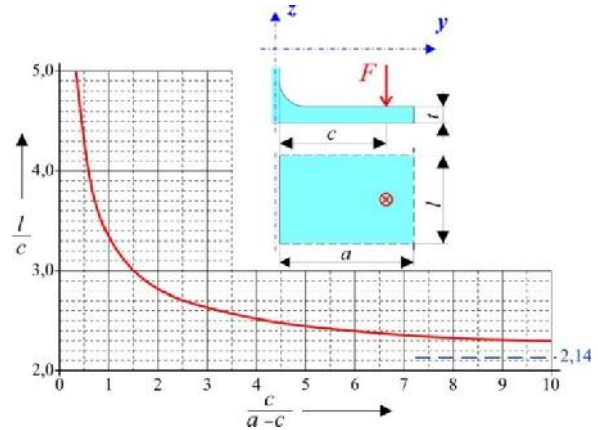
Ona kod širokopojasnog profila HE-A 360 odgovara udaljenosti to ka od slobodne ivice pojasa i=21,8 mm, što pripada domenu koji se dominantno sre e u inženjerskoj praksi. Prema Klepelu i Liu vrednosti naponskih koeficijenata iznose: c\_x0=±0,84; c\_y0=±2,8; c\_x2=∓ 1,6÷1,8; c\_y2=0 (gornji predznak odnosi se na gornju, a donji na donju konturu pojasa).



Slika 4 - Prora unski model po Klepelu i Liu [13]

2.3 Zamel (Sahmel)

Prema Zamelu [9] prora un lokalnih naponskih stanja u zoni tranzicije donji pojas/rebro, izvodi se na modelu ekvivalentne konzole, ija širina (l) zavisi od položaja to ka, slika 5.



Slika 5 - Prora unski model po Zamelu [9]

Moment u ukleštenju ekvivalentne konzole (presek 0) i otporni moment popre nog preseka odre uju se na osnovu izraza

$$M_y = Fc, \tag{4}$$

$$W_y = \frac{lt_f^2}{6}. \tag{5}$$

U preseku 0, normalni napon u popre nom pravcu, izazvan lokalnim savijanjem pojasa, odre uje se na osnovu izraza

$$\dagger_{y0} = \pm \frac{M_y}{W_y}, \tag{6}$$

dok se vrednost lokalnog normalnog napona u po dužnom pravcu izra unava primenom izraza

$$\dagger_{x0} = \pm \epsilon \dagger_{y0}. \tag{7}$$

2.4 Švajcarske preporuke B1

Postupak prora una propisan švajcarskim preporukama iz 1979. godine, „Berechnungsgrundlagen für Kranbahnen“ [14], zasnovan je na Zamelovoj ideji, odnosno, modelu ekvivalentne konzole, slika 6.

Usvaja se da širina ekvivalentne konzole na mestu ukleštenja pojasa u rebro iznosi:

$$l = 2,2c, \tag{8}$$

pri emu je:

$$c = a - r - i, \tag{9}$$

$$a = 0,5(b - s), \tag{10}$$

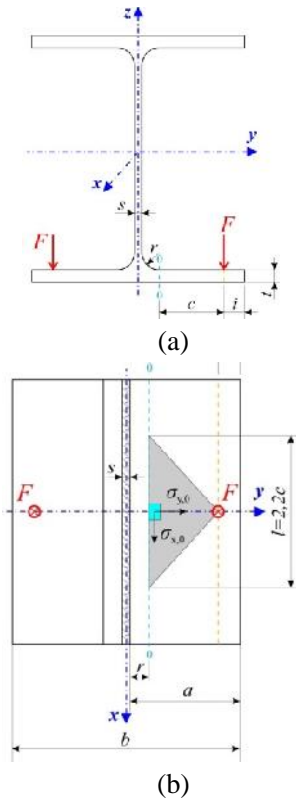
slika 6.

Moment u ukleštenju ekvivalentne konzole (presek 0), otporni moment njenog popre nog preseka, kao i vrednosti popre nih lokalnih napona odre uju se na isti na in kao i kod Zamelovog postupka, analogno izrazima (4), (5) i (6),

$$M_0 = Fc, \quad (11)$$

$$W_0 = \frac{lt_f^2}{6} = \frac{2,2ct_f^2}{6}, \quad (12)$$

$$\tau_{y0} = \pm \frac{M_0}{W_0} = \pm \frac{Fc}{\frac{2,2ct_f^2}{6}} = \pm 2,73 \frac{F}{t_f^2}. \quad (13)$$



Slika 6 - Proraunski model po švajcarskim preporukama B1: (a) centralni poprečni presek nosa a; (b) širina poprečnog preseka ekvivalentne konzole [14]

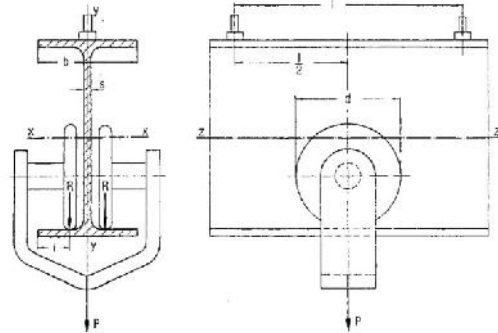
Prema citiranim preporukama, usvaja se da je vrednost podužnog normalnog napona izazvanog lokalnim dejstvom to ka jednaka vrednosti poprečnog napona, odnosno da je

$$\tau_{x0} = \tau_{y0}. \quad (14)$$

### 2.5 Beker (Becker)

Relativno velika odstupanja rezultata dobijenih na osnovu klasične teorije ploha i eksperimentalnih istraživanja, podstakla su Bekera [6] na intenzivno istraživačko rad, dominantno eksperimentalnog karaktera. On je svojim istraživanjima obuhvatio klasične I profile, kao i, tada nove, IPE profile sa paralelnim konturama pojaseva (IPE 200, IPE 300 i IPE 360). Opitni nosa i raspona  $l=4920$  mm, bili su zavrtnjima vezani za oslonce, slika 7, dok se optereenje unosilo

posredstvom simulatora kolica (postavljenog u sredini raspona nosa a) o koji je ovesen teret. Simulatori to kova bili su diskovi prenika  $d=100$  mm i  $d=160$  mm, debljine 14 mm, sa radijusom kontaktne površine 15 mm.



Slika 7 - Opitni nosa i simulator kolica [6]

Na osnovu maksimalnih vrednosti napona koje se javljaju kada se to ak nalazi neposredno iznad mernog mesta, Beker je postavio izraz za odreivanje vrednosti naponskog koeficijenta u tački donjeg pojasa neposredno ispod to ka,

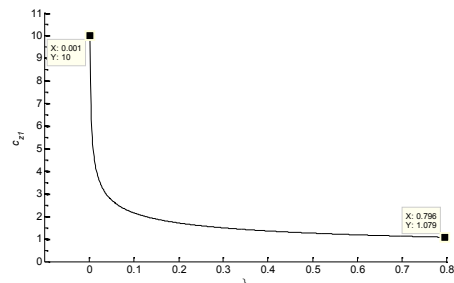
$$c_{z1} = \sqrt[3]{\frac{b-s}{2i}} = \sqrt[3]{\frac{1}{j}}. \quad (15)$$

Na osnovu strukture izraza (15) zaključuje se da on daje izuzetno visoke vrednosti kada se to ak nalazi vrlo blizu slobodne ivice pojasa, slika 8, odnosno da je

$$\lim_{j \rightarrow 0} c_{z1} = \infty, \quad (16)$$

što je, u fizičkom smislu, nemoguće.

Beker je smatrao da podužni napon lokalnog savijanja izraunat korišćenjem naponskog koeficijenta definisanog izrazom (15), odgovara preseku pojasa udaljenom za  $b/4$  od njegove slobodne ivice. Prema Bekeru, superponiranjem napona od opšteg savijanja nosa a i lokalnog podužnog napona u pomenutom preseku, dobija se vrednost napona merodavna za dokaz vrste e.



Slika 8 - Kriva naponskog koeficijenta  $c_{z1}$  prema Bekeru

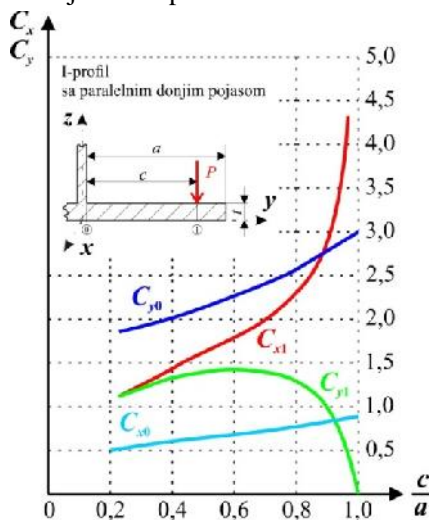
### 2.6 Mendel

U okviru doktorske disertacije Mendel [7, 8] je obavio značajna istraživanja čiji su rezultati, u nekim

delovima, bili u dobroj saglasnosti sa rezultatima Bekерових istraživanja. Dominantan doprinos Mendelovih istraživanja odnosio se na prora un lokalnih naponskih stanja klasi nih I profila, sa pojasevima pod nagibom. Problem je rešavao primenom klasi ne teorije plo a, a uticaj promene debljine pojasa (plo e) uveo je promenljivom krutoš u plo e. Tako postavljenu parcijalnu diferencijalnu jedna inu drugog reda rešavao je primenom metode kona nih razlika. Kao merodavne preseke za identifikaciju lokalnog uticaja optere enja pojasa usvojio je presek u zoni tranzicije donji pojas/rebro (presek 0), kao i presek koji odgovara liniji dejstva optere enja (presek 1). Važno je uo iti da Mendel nije razmatrao naponsko stanje na slobodnom kraju pojasa (presek 2). Osim za klasi ne I profile, Mendel je dao izraze i za identifikaciju lokalnih napona kod srednje širokih IPE profila sa paralelnim konturama pojasa. Primena klasi ne teorije plo a onemogu ava da analizom obuhvati uticaj radijusa tranzicije donji pojas/rebro. Na prikazima popre nih preseka profila, ucrtava se pomenuti radijus, ali je ta ka merodavna za naponsku analizu ipak smeštena u fiktivnoj ta ki preseka gornje konture pojasa i konture rebra. Vrednosti naponskih koeficijenata u podužnom (x) i popre nom (y) pravcu odre uju se u zavisnosti od vrednosti parametra položaja to ka (c/a), na osnovu dijagrama prikazanih na slici 9.

Prema Mendelu, apsolutne vrednosti lokalnih napona u karakteristi nim presecima popre nog preseka profila iste su na gornjoj i donjoj konturi optere enog pojasa. To upu uje na zaklju ak da Mendel nije uzeo u obzir kontaktne napone, što predstavlja ozbiljan propust.

Zna aj Mendelovih istraživanja proisti e iz inje nice da je on prvi izvršio uspešnu uzajamnu validaciju rezultata dobijenih primenom klasi ne teorije plo a i rezultata dobijenih eksperimentom.



Slika 9 - Mendelove krive naponskih koeficijenata za I profile sa paralelnim konturama pojasa [8]

## 2.7 Hanover i Rajhvald (Hannover, Reichwald) – standard EN 15011

Na osnovu kriti ke analize rezultata istraživanja Bekera [6] i Mendela [7, 8], kao i na osnovu rezultata sopstvenih istraživanja, Hanover i Rajhvald [4, 5] su:

- usvojili ta ke 0, 1 i 2, slika 10, kao merodavne za identifikaciju lokalnih napona i dokaz vrsto e nosa a izloženih dejstvu optere enja izazvanih pritiskom to kova kolica koja se kre u po donjem pojasu nosa a;
- za profile sa paralelnim konturama pojasa predložili slede e izraze za izra unavanje vrednosti naponskih koeficijenata u podužnom (x) i popre nom (y) pravcu,

$$c_{x0} = 0,050 - 0,580\} + 0,148e^{3,015\}, \quad (16)$$

$$c_{x1} = 2,230 - 1,490\} + 1,390e^{-18,33\}, \quad (17)$$

$$c_{x2} = 0,730 - 1,580\} + 2,910e^{-6,00\}, \quad (18)$$

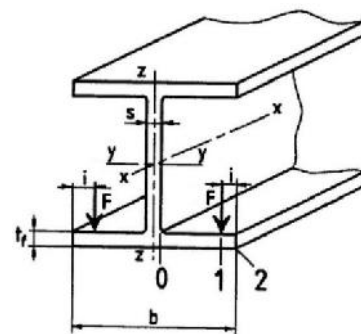
$$c_{y0} = -2,110 + 1,977\} + 0,0076e^{6,53\}, \quad (19)$$

$$c_{y1} = 10,108 - 7,408\} - 10,108e^{-1,364\}, \quad (20)$$

$$c_{y2} = 0, \quad (21)$$

pri emu se vrednost parametra položaja to ka odre uje na osnovu izraza

$$\} = \frac{2i}{b-s}. \quad (22)$$



Slika 10 - Popre ni presek, optere enja i položaj merodavnih ta aka I profila sa paralelnom konturom pojasa [4]

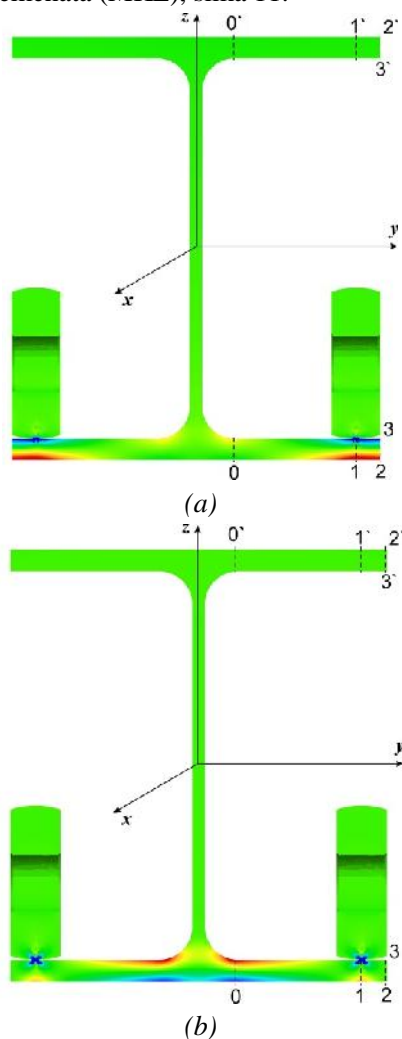
Naponski koeficijenti u korespondentnim ta kama gornje konture pojasa imaju suprotan predznak [4], što zna i da su apsolutne vrednosti napona na gornjoj i donjoj konturi jednake.

Osim eksperimentalnih istraživanja, u okviru radne grupe CETIM koju je formirao FEM (sekcija IX, Nr 9.341, 1978) izvršena su i kona noelementna istraživanja lokalnog naponskog stanja. Hanover i Rajhvald koristili su softver SAP IV-B, diskretizuju i

prora unski domen kona nim elementima tipa plo e. Na taj na in nije bilo mogu e modelirati zonu tranzicije sa odgovaraju im radiusom, što predstavlja ozbiljan problem kada je re o klasi srednje širokih profila (IPE). Upravo zbog toga, Hanover i Rajhvald navode da u ta ki 0 postoji zna ajno odstupanje rezultata kona noelementne analize u odnosu na rezultate dobijene na osnovu eksperimenta.

### 3. NUMERIKI PRIMER I DISKUSIJA

Da bi se izvršila uporedna analiza rezultata koji se dobijaju primenom postupaka i izraza koje daju referentni autori i standardi/norme, izvršen je prora un lokalnih napona za nosa izveden od profila HE-A 360, slika 2, ije su geometrijske karakteristike, karakteristike materijala i optere enje dati u tabeli 1. Osim postupaka prezentiranih u odeljku 2., analiza lokalnog naponskog stanja izvedena je i primenom metode kona nih elemenata (MKE), slika 11.



Slika 11 - Kona noelementna identifikacija naponskih stanja usled dejstva to kova kolica: (a) ukupni normalni naponi u pravcu ose x; (b) ukupni normalni naponi u pravcu ose y

Tabela 1. Veli ine neophodne za identifikaciju lokalnih napona

Naziv	Oznaka	Vrednost
Visina profila	$H$	350 mm
Širina pojasa	$b$	300 mm
Debljina pojasa	$t_f$	17,5 mm
Debljina rebra	$s$	10 mm
Radujus tranzicije rebro/pojas	$r$	27 mm
Udaljenost to ka od slobodne ivice pojasa	$i$	20 mm
Modul elasti nosti	$E$	21000 kN/cm <sup>2</sup>
Poasonov koeficijent		0,3
Optere enje to ka	$F$	10 kN

Eliminacija napona izazvanih globalnim savijanjem u referentnim ta kama donjeg pojasa (0, 1, 2) izvršena oduzimanjem vrednosti odgovaraju ih napona u korespondentnim ta kama gornjeg pojasa (0', 1', 2'), sa promenjenim predznakom.

Rezultati prora una prezentirani su u tabeli 2.

Tabela 2. Naponi izazvani lokalnim savijanjem

Autor	Lokalni naponi (kN/cm <sup>2</sup> )				
	x		y		
	presek				
	0	1	2	0'	1'
Gohberg	$\pm$ 1,96	-	$\mp$ 7,51	$\pm$ 7,35	-
Klepel i Li	$\pm$ 0,84	-	$\mp$ 5,55	$\pm$ 9,14	-
Zamel	$\pm$ 2,48	-	-	$\pm$ 8,28	-
Švajcarske preporuke B1	$\pm$ 8,91	-	-	$\pm$ 8,91	-
Beker	-	+4,56	-		-
Mendel	$\pm$ 2,61	$\mp$ 8,16	-	$\pm$ 8,82	$\mp$ 3,92
Hanover i Rajhvald - EN 15011	$\mp$ 0,63	$\mp$ 6,61	$\mp$ 5,82	$\pm$ 5,94	$\mp$ 2,32
MKE	+1,80 -1,41	* +8,32	$\mp$ 7,12	+7,13 -6,35	* +3,63

\*kontaktni napon

Na osnovu uporedne analize rezultata prezentiranih u tabeli 2 zaklju uje se slede e:

- postoji zna ajno odstupanje prora unskih vrednosti lokalnih napona;
- prema svim referentnim autorima i izvorima, po dužni lokalni naponi na donjoj konturi, u preseku

0, pritiskuju eg su karaktera, izuzev kod Hanovera i Rajhvalda, odnosno, standarda EN 15011;

- svi autori, izvori i standard EN 15011 navode da su apsolutne vrednosti napona u korespondentnim ta kama jednake.

Tvrđnja da su apsolutne vrednosti napona u korespondentnim ta kama gornje i donje konture jednake, u potpunosti je neutemeljena. U preseku 0, zbog uticaja radijusa, odnosno promene lokalne krutosti, naponi na gornjoj i donjoj konturi nisu jednaki, o emu uverljivo svedo e i eksperimentalni rezultati Mendela. Na kontaktnoj površini to ka i gornje površi donjeg pojasa (presek 1) javljaju se vrlo visoki Hercovi naponi, koji zbog ograni enja teorije tankih plo a, nisu ni mogli da budu obuhva eni naponskim analizama prezentiranim u odeljcima 2.1÷2.7. Ukoliko se pretpostavi da se optere enje nosa a unosi to kom oblika kalote pre nika 125 mm, onda primena Hercovih obrazaca daje vrednost površinskog pritiska od  $-186,7 \text{ kN/cm}^2$ , što je gotovo za dva reda veli ine ve a apsolutna vrednost u odnosu na vrednosti date u tabeli 2.

#### 4. ZAKLJU AK

U zoni tranzicije donji pojas/rebro karakter podužnih napona izazvanih lokalnim dejstvom to ka na širokopojasni HE-A profil, odre enih primenom standarda EN 15011 razlikuje se od karaktera razmatranih napona odre enih primenom MKE i postupaka svih referentnih istraživa a, izuzev Hanovera i Rajhvalda, na osnovu ijih istraživanja je pomenuti standard i donet. Osim toga, apsolutne vrednosti lokalnih napona u posmatranoj zoni (i podužnih, i popre nih), odre ene primenom standarda EN 15011 imaju najniže vrednosti, izuzimaju i vrednost podužnog napona neposredno ispod to ka, odre enu primenom Bekerovog obrasca.

Izložene injenice upu uju na zaklju ak da primena navedenog standarda ne daje pouzdane rezultate kada je re o širokopojasnim profilima i ukazuju na potrebu daljeg istraživanja problema identifikacije lokalnih naponskih stanja izazvanih to kovima kolica pri njihovom kretanju po pojasu glavnog nosa a jednošinskih transportnih sistema.

#### 5. ZAHVALNICA

U radu je publikovan deo rezultata istraživanja obavljenih tokom realizacije projekta TR 35006, finansiranog od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

#### LITERATURA

- [1] Petkovi Z, Gaši V, Bošnjak S, Zrni N. Loading capacities curves for HE-A/B section runway beams

according to bottom flange bending, in Proc. 6th Triennial International Conference Heavy Machinery HM 2008, Kraljevo, Serbia, pp. B.51-B.56, 24-29 June 2008.

- [2] Seebelberg C. *Kranbahnen, Bemessung und Konstruktive Gestaltung*, Bauwerk Verlag GmbH, Berlin, 2005.
- [3] Papkovich PF. *Stroitelynaya mekhanika korablya*, Sudpromgiz, Moscow, 1941.
- [4] Hannover H, Reichwald R. Lokale Biegebeanspruchung von Träger-Unterflanschen, Teil I, *Fördern und heben*, Vol. 32, No. 6, pp. 455-460, 1982.
- [5] Hannover H, Reichwald R. Lokale Biegebeanspruchung von Träger-Unterflanschen, Teil II, *Fördern und heben*, Vol. 32, No. 8, pp. 655-660, 1982.
- [6] Becker, K. Trägerflanschbiegung durch Laufkatzen, *Fördern und heben*, Vol. 18, No. 4, pp. 231-234, 1968.
- [7] Mendel G. Berechnung der Trägerflanschbeanspruchung mit Hilfe der Plattentheorie, Teil I: Die Kragplatte veränderlicher Dicke, *Fördern und heben*, Vol. 22, No. 14, pp. 805-814, 1972.
- [8] Mendel G. Berechnung der Träger-flanschbeanspruchung mit Hilfe der Plattentheorie, Teil II: Vergleich zwischen IPE und I Profil, *Fördern und heben*, Vol. 22, No. 15, pp. 835-842, 1972.
- [9] Sahmel, P. Zur Berechnung der durch Laufkatzen hervorgereufenen Biegebeanspruchungen in Trägerflanschen, *Fördern und heben*, Vol. 19, No. 14, pp. 866-868, 1969.
- [10] EN 15011:2011+A1:2014 - *Cranes. Bridge and gantry cranes*, European Committee for Standardization, 2014.
- [11] Rozenshteyn BM. Issledovanie mestnykh napryazheniy v ezdovykh polkakh monorelysovykh putey, *Trudi VNIPT*, No.3. pp. 44-80, Moscow, 1961.
- [12] Gokhberg M. M. *Metallicheskie konstrukcii podymno-transportnyh mashin*, Mashino-stroenie, Moscow, 1964.
- [13] Petersen C. *Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten*, second ed., Vieweg, Braunschweig, 1990.
- [14] Walter H. D, Nachtigal P. Bemessungstabeln für Kranbahnträger von Unterflanschlaufkatzen, *Hebezeuge und Fördermittel*, Vol. 3, No. 1, pp. 15-19, 1963.

## SUMMARY

### CALCULATION METHODS' COMPARATIVE ANALYSIS OF MONORAIL HOIST CRANE LOCAL BENDING EFFECTS

*The results of numerical and experimental researches of local bending problems, carried on classic and medium-wide I profiles, were a basis for the adoption of the current standards (EN 15011: 2014) which regulates the action of the local stress caused by the effect of cart wheels. Regarding the fact that IPB (HE-B) wide flange profiles are largely used for production of the main carriers of monorail transport systems, this paper presents the results of the action of the local stress caused by the effect of cart wheels on the HE-A flange profile, using the methods and procedures of relevant researchers, the procedures prescribed by the standard EN 15011 as well as the results of calculations using finite element method. It has been revealed, based on comparative analysis of the results, that in the transition zone low flange / rib longitudinal local stress on the lower contour flange, determined using the above mentioned standards have tightening characteristic, while all other methods, including finite element method, give the pressing nature of the considered voltage. In addition, all of these procedures, except for the finite element method, adopt the assumption that absolute value of voltage, caused by local bending on upper and lower contour of the loaded flange, are the same, and there is no physical justification. Bearing in mind the fact that stress identification, caused by the flange local bending, is an extremely important phase proving the strength of monorail beams, we may conclude that the application of standard EN 15011 does not provide reliable results when it comes to wide flange profiles.*

**Key words:** *monorail hoist crane, local bending, EN 15011, finite element method*