

PROJEKTOVANJE HLADNO OBLIKOVANIH ROŽNJAČA I FASADNIH RIGLI

HLADNO OBLIKOVANE ROŽNJAČE I FASADNE RIGLE PRIDRŽANE LIMOM

- U slučaju hladno oblikovanih rožnjača i fasadnih rigli, krovni pokrivač ili fasadna obloga, koji se oslanjaju na rožnjače ili fasadne rigle, svojom krutošću obezbijavaju određenu torzionu uklještenost i bočnu nepomjerljivost ovih elemenata. Ova činjenica ima za posljedicu nešto racionalnije dimenzije presjeka rožnjača i rigli, u skladu sa odgovarajućim proračunom koji se u nastavku izlaže.
- Rožnjače ili fasadne rigle Z, C, Σ, U i *šeširastog* poprečnog presjeka sa $h / t < 233$, $c / t \leq 20$ za jednostruke prevoje i $d / t \leq 20$ za dvostruke ivične prevoje, pridržane limom (krovni lim ili panel ili fasadni lim ili panel), mogu da se proračunaju prema odredbama MEST EN 1993-1-3, Poglavlje 10.
- Ove odredbe mogu da se primjene za rožnjače sa zategama, kontinualne rožnjače i rožnjače sa umecima i preklopima.
- Kada je trapezasti lim spojen sa rožnjačom (fasadnom riglom), rožnjača može da se smatra bočno pridržanom u ravni lima na mjestu spoja, ako je ispunjen uslov izražen sljedećom jednačinom:

$$S \geq \left(EI_w \frac{\pi^2}{L^2} + GI_t + EI_z \frac{\pi^2}{L^2} 0,25h^2 \right) \frac{70}{h^2}$$

gdje je:

S dio krutosti na smicanje koju obezbjeđuje profilisani lim ispitivanom elementu (rožnjača ili fasadna rigla) koji je spojen sa limom u svakom rebu (ako je lim povezan sa rožnjačom u svakom drugom rebu, S treba zamijeniti sa 0,2 S);

I_w sektorski moment inercije rožnjače;

- I_t torzioni moment inercije rožnjače;
- I_z moment inercije oko slabije ose poprečnog presjeka rožnjače;
- L dužina rožnjače;
- h visina rožnjače.

- Krutost na smicanje trapezastog lima koji je spojen sa rožnjačom u svakom rebru i spojen sa svake strane preklopa, može se računati kao:

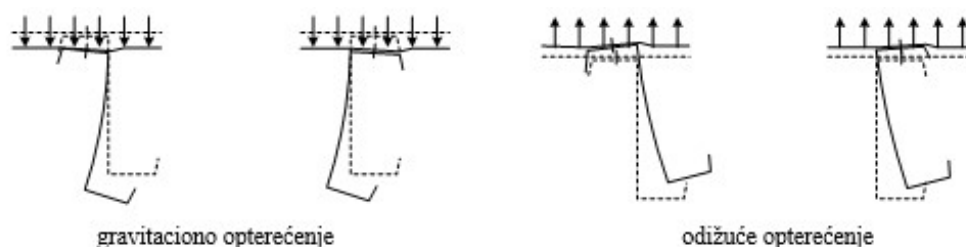
$$S = 1000 \sqrt{t^3 (50 + 10 \sqrt[3]{b_{\text{roof}}})} \frac{s}{h_w} \quad (N) \quad t \text{ i } b_{\text{roof}} \text{ u mm}$$

gdje je:

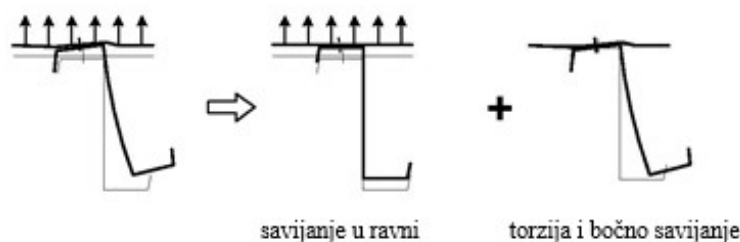
- t proračunska debljina trapezastog lima;
- b_{roof} širina krova;
- s udaljenost između rožnjača;
- h_w visina profila trapezastog lima

- Ponašanje bočno pridržanih rožnjača treba da se modelira kako je naznačeno na sljedećim skicama. Može se podrazumijevati da spoj rožnjače sa limom djelimično sprečava uvijanje rožnjače. To djelimično torziono pridržavanje može se predstaviti rotacionom oprugom koja ima krutost C_D . Naponi u slobodnoj nožici, koja nije direktno povezana sa limom, treba da se izračunaju superponiranjem uticaja usljed savijanja u ravni i uticaja torzije, uključujući bočno savijanje usljed krivljenja poprečnog presjeka.
- Kada je slobodna nožica rožnjače, sistema proste grede, pritisnuta usljed odižućeg opterećenja, takođe treba da se uzme u obzir povećanje napona usljed torzije i krivljenja presjeka.
- Ukoliko se ne sprovodi proračun po teoriji drugog reda, treba da se koristi metoda koja uzima u obzir tendenciju slobodne nožice ka bočnom pomjeranju (prouzrokujući dodatne napone), tretirajući je kao gredu koja je izložena dejstvu bočnog opterećenja $q_{h,Ed}$ (prikazano na sljedećim skicama).

- Za primjenu u ovoj metodi, rotaciona opruga treba da se zamijeni ekvivalentnom bočnom linearnom oprugom krutosti K . Pri određivanju krutosti K treba uzeti u obzir uticaj krivljenja poprečnog presjeka. U tu svrhu slobodna nožica može da se tretira kao pritisnuti element izložen dejstvu promjenljive aksijalne sile sa kontinualnim elastičnim bočnim osloncem krutosti K (prikazano na sljedećim skicama).



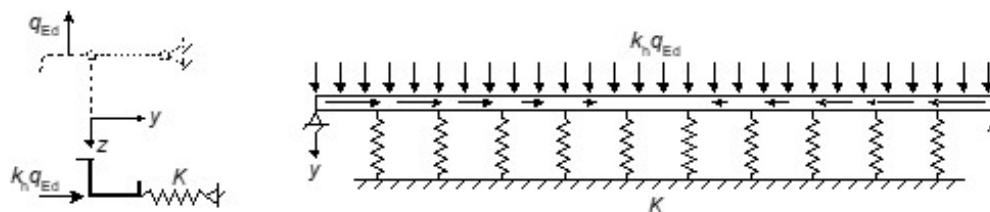
a) Z i C rožnjače sa gornjom nožicom spojenom za lim



b) Ukupna deformacija razdvojena na dva dijela



c) Model rožnjače bočno pridržane rotacionom oprugom krutosti C_D od lima



d) Pojednostavljenje zamjenom rotacione opruge C_D bočnom oprugom krutosti K

e) Slobodna nožica rožnjače modelirana kao greda na elastičnim osloncima. Model obuhvata uticaj torzije i bočnog savijanja (uključujući krivljenje poprečnog presjeka) za prostu gredu sa odižućim opterećenjem

Slika 10.1: Modeliranje bočno pridržanih rožnjača koje su rotaciono pridržane limom

- Za precizniji proračun treba sprovesti numeričku analizu sa vrijednostima rotacione krutosti opruge C_D (proračun se daje u sljedećem poglavlju u kome se obrađuje uprošćeni proračun rožnjača). Treba uzeti u obzir uticaje početne imperfekcije zakrivljenja (e_0) slobodne nožice. Početna imperfekcija treba da bude kompatibilna sa oblikom relevantnog tona izvijanja, određenog svojstvenim vektorima dobijenim na osnovu elastične analize izvijanja prvog reda.

Nosivost poprečnih presjeka

- Za rožnjače izložene dejstvu aksijalne sile i poprečnog opterećenja, nosivost poprečnog presjeka treba da se provjeri kako je naznačeno na sljedećoj skici, superponirajući napone usljed:
 - momenta savijanja u ravni $M_{y,Ed}$;
 - aksijalne sile N_{Ed} ;
 - ekvivalentnog bočnog opterećenja $q_{h,Ed}$ koje djeluje na slobodnu nožicu usljed torzije i bočnog savijanja.
- Maksimalni naponi u poprečnom presjeku treba da zadovolje sljedeće:

- za pridržanu nožicu:

$$\sigma_{\max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{\text{eff},y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{\text{eff}}} \leq f_y / \gamma_M$$

- za slobodnu nožicu:

$$\sigma_{\max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{\text{eff},y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{\text{eff}}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq f_y / \gamma_M$$

gdje je:

A_{eff} efektivna površina poprečnog presjeka samo za ravnomjerni pritisak;

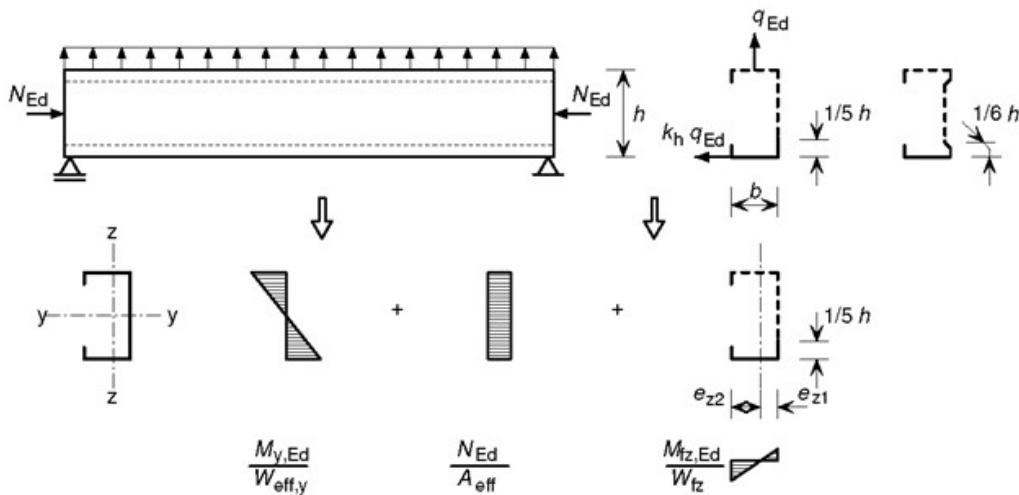
f_y granica razvlačenja;

$M_{fz,Ed}$ moment savijanja u slobodnoj nožici usljed bočnog opterećenja $q_{h,Ed}$;

$W_{\text{eff},y}$ efektivni otporni moment poprečnog presjeka za savijanje oko y-y ose;

W_{fz} bruto elastični otporni moment slobodne nožice i sadejstvujućeg dijela rebra za savijanje oko z-z ose; može se usvojiti da je sadejstvujući dio rebra jednak 1/5 visine rebra od tačke presjeka nožice i rebra za slučaj C i Z presjeka, odnosno 1/6 visine rebra za slučaj Σ presjeka, vidjeti sljedeću skicu;

- Treba voditi računa da je $\gamma_M = \gamma_{M0}$ ako je $A_{\text{eff}} = A_g$ ili ako je $W_{\text{eff},y} = W_{\text{el},y}$ i $N_{\text{Ed}} = 0$, u suprotnom $\gamma_M = \gamma_{M1}$.



- Ekvivalentno bočno opterećenje $q_{h,\text{Ed}}$ koje djeluje na slobodnu nožicu, usljed torzije i bočnog savijanja, treba da se odredi iz:

$$q_{h,\text{Ed}} = k_h q_{\text{Ed}}$$

- Koeficijent k_h za uobičajene vrste poprečnih presjeka treba da se odredi prema metodologiji koja se daje u MEST EN 1993-1-3, Poglavlje 10.
- Radi se o nešto komplikovanijoj proceduri koja podrazumijeva proračun: krutosti bočne opruge po jedinici dužine K , koeficijenta oslonačke opruge R (koji zavisi, pored ostaloga i od rastojanje između zatega) i rotacione krutosti opruge C_D .

- Umjesto ovog postupka, kao i obavezne provjere na izvijanje slobodne nožice (sljedeće poglavlje), u ovom predavanju će se izložiti nešto manje zamešan postupak proračuna koji se izlaže u MEST EN 1993-1-3, Aneks E: Pojednostavljeni proračun rožnjača.

Otpornosti na izvijanje slobodne nožice

- Ako je slobodna nožica pritisnuta, njenu otpornost na izvijanje treba provjeriti koristeći:

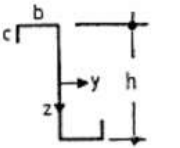
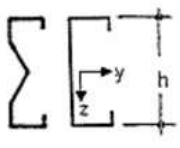
$$\frac{1}{\chi_{LT}} \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq f_{yb} / \gamma_{M1}$$

- Pri čemu je χ_{LT} redukcionni faktor za bočno-torziono izvijanje (fleksiono izvijanje slobodne nožice).
- Prema odredbama MEST EN 1993-1-3 NA, vrijednosti χ_{LT} može da se odredi primjena EN 1993-1-1, korišćenjem krive izvijanja b ($\alpha_{LT} = 0,34$; $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$; $\beta = 0,75$) za relativnu vitkost $\bar{\lambda}_{fz}$ definisanu u standardu.
- U nastavku standarda daje se detaljni postupak proračuna za redukcionni faktor bočno-torzionog izvijanja χ_{LT} .

Pojednostavljeni proračun hladno oblikovanih rožnjača prema MEST EN 1993-1-3, Aneks E

- Rožnjače sa C, Z i Σ poprečnim presjekom, sa ili bez dodatnih ukrućenja na rebru ili nožici, mogu da se proračunaju prema odredbama MEST EN 1993-1-3, Aneks E ako su ispunjeni sljedeći uslovi:
 - dimenzije poprečnog presjeka su u okviru oblasti datih u sljedećoj tabeli;
 - rožnjače su horizontalno pridržane trapezastim limom, a horizontalno pridržavanje ispunjava uslove krutosti na smicanje koju obezbjeđuje profilisani lim S (jednačine data u prethodnom poglavlju);

- rožnjače su rotaciono pridržane trapezastim limom i uslovi za koeficijent rotacije C_{100} su ispunjeni (tabela za C_{100} se daje u nastavku);
- rožnjače su istih raspona i opterećene su ravnomjernim opterećenjem.

Rožnjače	t [mm]	b/t	h/t	h/b	c/t	b/c	L/h
	$\geq 1,25$	≤ 55	≤ 160	$\leq 3,43$	≤ 20	$\leq 4,0$	≥ 15
	$\geq 1,25$	≤ 55	≤ 160	$\leq 3,43$	≤ 20	$\leq 4,0$	≥ 15

- Ova metoda ne treba da se koristi:
 - za sisteme sa zategama;
 - za sisteme sa preklonom ili umetkom;
 - kada djeluje aksijalna sila N_{Ed} .
- Proračunska vrijednost momenta savijanja M_{Ed} treba da zadovolji:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{LT,Rd}} \leq 1$$

$$M_{LT,Rd} = \left(\frac{f_y}{\gamma_{M1}} \right) W_{eff,y} \frac{\chi_{LT}}{k_d}$$

gdje je:

$W_{eff,y}$ otporni moment efektivnog poprečnog presjeka u odnosu na y-y osu;

χ_{LT} faktor redukcije za bočno-torziono izvijanje;

faktor redukcije χ_{LT} (vidjeti Čelične konstrukcije I, Bočno torziono izvijanje) treba sračunati u zavisnosti od $\bar{\lambda}_{LT}$, pomoću krive izvijanja b , a umjesto faktora imperfekcije α_{LT} , treba koristiti $\alpha_{LT,eff}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{\text{eff},y} f_y}{M_{\text{cr}}}}$$

$$\alpha_{LT,\text{eff}} = \alpha_{LT} \sqrt{\frac{W_{\text{el},y}}{W_{\text{eff},y}}}$$

gdje je:

$W_{\text{el},y}$ otporni moment bruto poprečnog presjeka u odnosu na y-y osu;

k_d koeficijent kojim se uzima u obzir nepridržani dio rožnjače:

$$k_d = \left(a_1 - a_2 \frac{L}{h} \right), \text{ ali } \geq 1,0$$

gdje je:

a_1, a_2 koeficijenti iz sljedeće tabele;

L raspon rožnjače;

h ukupna visina rožnjače.

Sistem	Z - rožnjače		C - rožnjače		Σ - rožnjače	
	a_1	a_2	a_1	a_2	a_1	a_2
prosta greda gravitaciono opterećenje	1,0	0	1,1	0,002	1,1	0,002
prosta greda odižuće opterećenje	1,3	0	3,5	0,050	1,9	0,020
kontinualna greda gravitaciono opterećenje	1,0	0	1,6	0,020	1,6	0,020
kontinualna greda odižuće opterećenje	1,4	0,010	2,7	0,040	1,0	0

- Za slučaj proste grede opterećene gravitacionim opterećenjem, kada se može smatrati da je gornja pritisnuta nožica kontinualno bočno pridržana krovnom pokrivačem, usvaja se da je faktor redukcije za bočno-torziono izvijanje:

$$\chi_{LT} = 1.0$$

- U svim ostalim slučajevima faktor redukcije za bočno-torziono izvijanje χ_{LT} se izračunava prema prethodno izloženom postupku. Elastični kritični moment bočnog torzionog izvijanja M_{cr} može se sračunati po uprošćenom izrazu:

$$M_{cr} = \frac{k}{L} \sqrt{G I_t^* E I_v}$$

gdje je:

I_v moment inercije bruto poprečnog presjeka u odnosu na slabiju glavnu osu v-v;

I_t^* fiktivni St.Venant-ov torzioni moment inercije koji uzima u obzir efektivno rotaciono pridržavanje:

$$I_t^* = I_t + C_D \frac{L^2}{\pi^2 G}$$

gdje je:

I_t St.Venant-ov torzioni moment inercije rožnjače;

C_D ukupnu rotacionu krutost opruge:


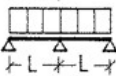
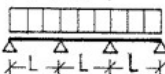
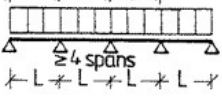
$$1/C_D = \frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,B}} + \frac{1}{C_{D,C}}$$

$C_{D,A}$ rotaciona krutost veze između lima (krovnog pokrivača, fasadne obloge) i rožnjače;

$C_{D,B}$ rotaciona krutost usljed krivljenja poprečnog presjeka rožnjače;

$C_{D,C}$ rotaciona krutost koja odgovara krutosti lima (krovnog pokrivača, fasadne obloge) na savijanje;

k koeficijent bočnog torzionog izvijanja, prema sljedećoj tabeli:

Statički sistem	Gravitaciono opterećenje	Odižuće opterećenje
	∞	10,3
	17,7	27,7
	12,2	18,3
	14,6	20,5

Proračun rotacionih krutosti $C_{D,A}$, $C_{D,B}$ i $C_{D,C}$

- Ukoliko su spojna sredstva kojima se spaja lim sa rožnjačom postavljena u sredini nožice rožnjače, vrijednost $C_{D,A}$ za trapezasti lim koji je spojen sa gornjom nožicom rožnjače može da se odredi kako slijedi:

$$C_{D,A} = C_{100} \cdot k_{ba} \cdot k_t \cdot k_{bR} \cdot k_A \cdot k_{bT}$$

gdje je:

$$k_{ba} = (b_a / 100)^2$$

ako je $b_a < 125 \text{ mm}$;

$$k_{ba} = 1,25(b_a / 100)$$

ako je $125 \text{ mm} \leq b_a < 200 \text{ mm}$;

$$k_t = (t_{\text{nom}} / 0,75)^{1,1}$$

ako je $t_{\text{nom}} \geq 0.75 \text{ mm}$; pozitivan položaj;

$$k_t = (t_{\text{nom}} / 0,75)^{1,5}$$

ako je $t_{\text{nom}} \geq 0.75 \text{ mm}$; negativan položaj;

$$k_t = (t_{\text{nom}} / 0,75)^{1,5}$$

ako je $t_{\text{nom}} < 0.75 \text{ mm}$;

$$k_{bR} = 1,0$$

ako je $b_R \leq 185 \text{ mm}$;

$$k_{bR} = 185 / b_R$$

ako je $b_R > 185 \text{ mm}$;

za gravitaciono opterećenje:

$$k_A = 1,0 + (A - 1,0) \cdot 0,08 \quad \text{ako je } t_{\text{nom}} = 0.75 \text{ mm; pozitivan položaj;}$$
$$k_A = 1,0 + (A - 1,0) \cdot 0,16 \quad \text{ako je } t_{\text{nom}} = 0.75 \text{ mm; negativan položaj;}$$
$$k_A = 1,0 + (A - 1,0) \cdot 0,095 \quad \text{ako je } t_{\text{nom}} = 1.00 \text{ mm; pozitivan položaj;}$$
$$k_A = 1,0 + (A - 1,0) \cdot 0,095 \quad \text{ako je } t_{\text{nom}} = 1.00 \text{ mm; negativan položaj;}$$

A opterećenje u $[kN/m]$ koje se prenosi sa lima na gredu, ali $A \leq 12.00 \text{ kN/m}$;

- dozvoljena je linearna interpolacija između $t = 0.75 \text{ mm}$ i $t = 1.00 \text{ mm}$;
- za $t < 0.75 \text{ mm}$, formula ne važi;
- za $t > 1 \text{ mm}$, formula treba da se koristi sa $t = 1 \text{ mm}$;

za odizujuće opterećenje

$$k_A = 1,0 ;$$


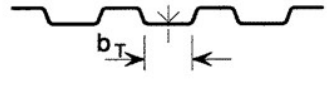
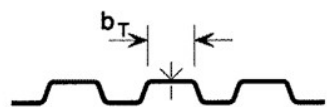
$$k_{bT} = \sqrt{\frac{b_{T,\text{max}}}{b_T}}$$

ako je $b_T > b_{T,\text{max}}$, u suprotnom $k_{bT} = 1$;

gdje je:

- b_a širina nožice rožnjače $[u \text{ mm}]$;
- b_R širina profilacije lima $[u \text{ mm}]$;
- b_T širina nožice lima preko koje je pričvršćen za rožnjaču;
- $b_{T,\text{max}}$ dato u sljedećoj tabeli;

C_{100} koeficijent rotacije, daje se u sljedećoj tabeli (predstavlja vrijednost $C_{D,A}$ ako je $b_a = 100 \text{ mm}$):

Način postavljanja lima		Lim pričvršćen preko		Razmak spojnih sredstava		Prečnik podloške [mm]	C_{100} [kNm/m]	$b_{T,max}$ [mm]
Pozitivan ¹⁾	Negativan ¹⁾	Uvala	Rebro	$e=b_R$	$e=2b_R$			
Za gravitaciono opterećenje:								
X		X		X		22	5,2	40
X		X			X	22	3,1	40
	X		X	X		K_2	10,0	40
	X		X		X	K_2	5,2	40
	X	X		X		22	3,1	120
	X	X			X	22	2,0	120
Za odličuće opterećenje:								
x		x		x		16	2,6	40
x		x			x	16	1,7	40
Legenda: b_R je širina profilacije b_T je širina uvale lima preko koje je pričvršćen za rožnjaču K_2 označava čeličnu sedlastu podlošku prikazanu ispod sa $t \geq 0,75$ mm						Lim pričvršćen:		
						- preko uvale 		
						- preko rebra 		
Vrijednosti u ovoj tabeli važe za:								
- samonarezujuće zavrtņneve prečnika				$\phi = 6,3$ mm;				
- čelične podloške debljine				$t_w \geq 1,0$ mm				

- 1) Način postavljanja lima je pozitivan kada je uža nožica lima na rožnjači, a negativan kada je šira nožica lima na rožnjači.

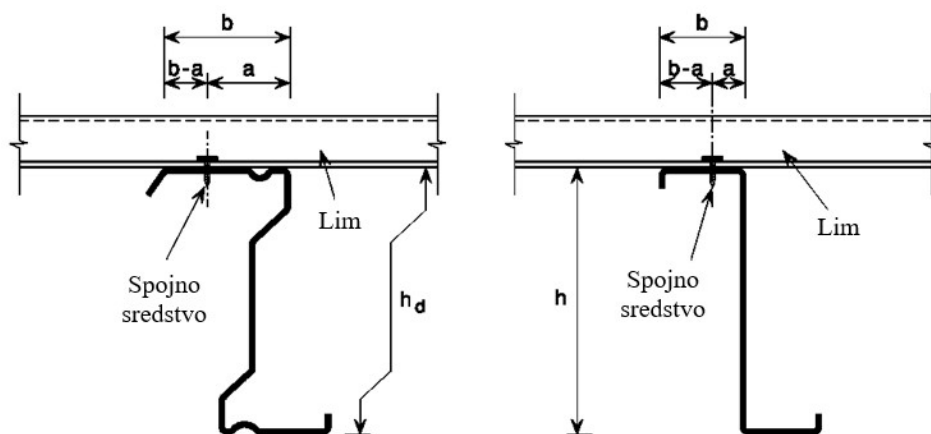
- Rotaciona krutost usljed krivljenja poprečnog presjeka rožnjače $C_{D,B}$, treba sračunati pomoću izraza:

$$C_{D,B} = 1/4 E t^3 / (1 - \nu^2) / (h_d + b_{mod})$$

gdje je:

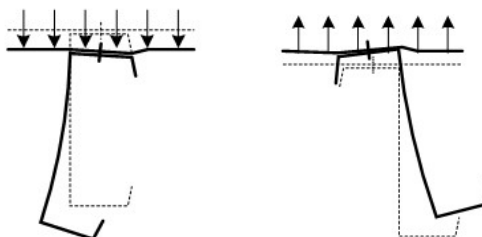
h_d razvijena visina rebra rožnjače, vidjeti sljedeću skicu;

b_{mod} može imati dvije vrijednosti: a i $2a + b$, prema sljedećoj skici:



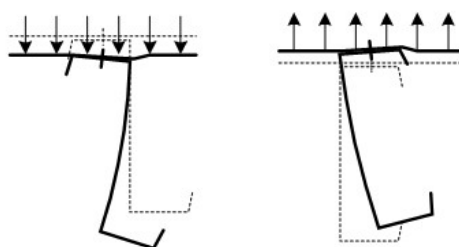
$$b_{\text{mod}} = a$$

za slučajeve kada ekvivalentno bočno opterećenje $q_{h,Ed}$ dovodi rožnjaču u kontakt sa limom preko rebra rožnjače (sljedeća slika):



$$b_{\text{mod}} = 2a + b$$

za slučajeve kada ekvivalentno bočno opterećenje $q_{h,Ed}$ dovodi rožnjaču u kontakt sa limom na vrhu nožice rožnjače (sljedeća slika):

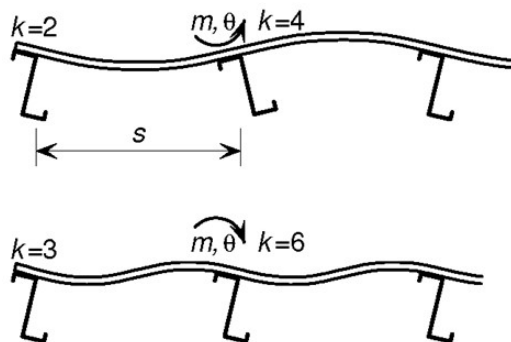


- Da bi se sračunala rotaciona krutost $C_{D,C}$, treba uzeti u obzir rotaciju susjednih rožnjača i stepen kontinuiteta lima. Konzervativno može se koristiti sljedeći postupak:

$$C_{D,C} = \frac{k E I_{\text{eff}}}{s}$$

gdje je:

- k numerički koeficijent, koji se daje na sljedećoj skici i može imati vrijednosti $k = 2, 3, 4$ ili 6 , u zavisnosti od deformacije lima i položaja rožnjače u odnosu na lim (veza na kraju lima ili veza u nekom srednjem polju);
- I_{eff} efektivni moment inercije po jedinici dužine lima;
- s razmak rožnjača.



Zaključak

- Postupak proračuna hladno oblikovanih rožnjača je veoma komplikovan i obiman.
- Takođe, veoma važno je primjetiti da svi postupci proračuna izloženi ovdje, uključujući i pojednostavljeni proračun rožnjača, podrazumijevaju prethodni proračun efektivnih karakteristika poprečnih presjeka (A_{eff} , $W_{\text{eff},y}$...), s obzirom na klasu presjeka 4, kao i specifičnosti hladno oblikovanih presjeka (distorziona izbočavanje). Ova činjenica dodatno komplikuje i onako veoma zametan proračun.

- Velike firme (Ruukki, King Span, MetSEC - Voestalpine ...) koje proizvode hladno oblikovane profile (Z, C, Σ , U i *šeširaste* poprečne presjeke), koji se koriste kao rožnjače i fasadne rigle, u svojim katalogima i tablicama daju efektivne karakteristike poprečnih presjeka i za gravitaciono opterećenje (snijeg) i za odižuće opterećenje (vjetar) ili što je veoma važno daju tablice sa uključenim kompletnim proračunom, tako da je odabir odgovarajuće rožnjače (ili fasadne rigle) veoma pojednostavljen. Najzad postoje i besplatni softveri za proračun rožnjača i fasadnih rigli (Ruukki - PurCalc, MetSPEC ...).

PREDAVANJE 08

Pitanja:

1. Da li krovni panel obezbijeduju određenu torzionu uklještenost i bočnu nepomjerljivost hladno oblikovanim rožnjačama?
2. Koji efekat se modelira sa rotacionom oprugom krutosti C_D u proračunu hladno oblikovane rožnjače?
3. Koliko je χ_{LT} za slučaj hladno oblikovane rožnjače sistema proste grede, bočno pridržane krovnim pokrivačem i opterećene gravitacionim opterećenjem?
4. Da li se pojednostavljeni proračun za hladno oblikovane rožnjače može koristiti ako postoje krovne zatege?
5. Da li se pojednostavljeni proračun za hladno oblikovane rožnjače može koristiti kod kontinualnih rožnjača, kod kojih se kontinualizacija obezbijeduje sa preklopom ili umetkom?