

# Otpornost čeličnih elemenata na savijanje

---

**Kraljević, Mirna**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:237775>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-02**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Mirna Kraljević

**OTPORNOST ČELIČNIH ELEMENATA NA  
SAVIJANJE**

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Mirna Kraljević

**OTPORNOST ČELIČNIH ELEMENATA NA  
SAVIJANJE**

ZAVRŠNI ISPIT

Mentor

doc.dr.sc. Ivan Čurković

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Mirna Kraljević

# **BENDING RESISTANCE OF STEEL ELEMENTS**

FINAL EXAM

Supervisor

doc.dr.sc. Ivan Čurković

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Student/ica :

Mirna Kraljević

(Ime i prezime)

0082066367

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu završnog ispita pod naslovom:

Otpornost čeličnih elemenata na savijanje

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

Bending resistance of steel elements

(Naslov teme završnog ispita na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

-

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

-

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

27.8.2024.

Mentor:

doc.dr.sc. Ivan Čurković

Potpis mentora:

*Ivan Čurković*

Komentor:

-



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio završnog ispita pod naslovom:

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

Potpis:



## OBRAZAC 6

### IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Ja :

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela završnog ispita i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela završnog ispita pod naslovom:

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom prijediplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio završnog ispita bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

Potpis:

## SAŽETAK

Unutar rada teorijski je obrađen proračun čeličnih elemenata na savijanje s posebnim osvrtom na gubitak stabilnosti takvih elemenata (izvijanje, bočno-torzijsko izvijanje). Također ukratko su spomenute i klasifikacije poprečnih presjeka, kao i proračun otpornosti poprečnog presjeka, jer prethode proračunu konstrukcijskog elementa. Zasebno je obrađena i tema bočno-torzijskog izvijanja, te dvije vrste proračuna takvog izvijanja (opći i modificirani) prema normama HRN EN 1993-1-1: 2008. i EN 1993-1-1:2022. Na kraju su pomoću parametarske analize prikazani rezultati gore navedenih proračuna i usporedba istih prema spomenutim normama.

**KLJUČNE RIJEČI:** otpornost na savijanje, klasifikacija poprečnog presjeka, bočno-torzijsko izvijanje



## SUMMARY

Within the work, the calculation of bending steel elements is processed theoretically, with special reference to the loss of stability of such elements (buckling, lateral-torsional buckling). Cross-section classifications are also briefly mentioned, as well as the calculation of cross-section resistance, because they precede the calculation of the structural element. The subject of lateral torsional buckling, as well as two types of calculation of buckling (general and modified) according to the HRN EN 1993-1-1 and 1993-1-1:2022. standards were also dealt with separately. To sum up, the results of the above-mentioned calculations and their comparison according to the mentioned norms are presented using parametric analysis.

**KEY WORDS:** bending resistance, cross-section classification, lateral-torsional buckling

## SADRŽAJ

<b>SAŽETAK .....</b>	<b>i</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>ii</b>
<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>iii</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. METODE I TEHNIKE RADA.....</b>	<b>2</b>
<b>3. OTPORNOST ČELIČNIH ELEMENATA .....</b>	<b>3</b>
3.1. Dokaz pouzdanosti - $E_d \leq R_d$ .....	3
3.2. Konstrukcijska svojstva elemenata .....	3
3.3. Krajnje granično stanje .....	6
<b>4. PRORAČUN OTPORNOSTI ELEMENATA IZLOŽENIH SAVIJANJU .....</b>	<b>7</b>
4.1. Element izložen savijanju (bez uzdužne sile) .....	7
4.1.1. Uvod .....	7
4.1.2. Elastično izvijanje jednostavno oslonjenog nosača .....	8
4.1.3. Elastično izvijanje ostalih slučajeva .....	8
4.1.4. Razvoj postupka proračuna .....	9
4.2. Otpornost na bočno-torzijsko izvijanje prema Eurocode 3 .....	9
4.2.1. Krivulje izvijanja .....	10
4.2.2. Elastični kritični moment za bočno-torzijsko izvijanje.....	12
4.2.3. Konstrukcijske mjere za sprječavanje bočno torzijskog izvijanja.....	13
4.3. Elementi izloženi savijanju i uzdužnoj sili .....	14
4.3.1. Uvod .....	14
4.3.2. Interakcijski izrazi za nosače-stupove prema Eurocode 3 .....	16
4.3.2.1. Metoda 1 .....	16
4.3.2.2. Metoda 2 .....	17
4.3.2.2.1. Koncept interakcijskih izraza za $N+M_y$ .....	17
<b>5. PARAMETARSKA ANALIZA OTPORNOSTI ELEMENTA NA SAVIJANJE PREMA HRN EN 1993-1-1:2008.....</b>	<b>19</b>
5.1. Klasifikacija profila .....	19
5.2. Otpornost elementa na savijanje .....	21
5.3. Primjer proračuna otpornosti elementa na savijanje.....	23
5.4. Parametri bočno-torzijskog izvijanja za slučaj $h/b \leq 2$ (HEA 280) .....	24
5.5. Parametri bočno-torzijskog izvijanja za slučaj $h/b \geq 2$ (HEA 700) .....	25

---

5.6.	Usporedba rezultata za opći i modificirani postupak proračuna.....	26
<b>6.</b>	<b>OTPORNOST POPREČNIH PRESJEKA ČELIČNIH ELEMENATA PREMA NORMI HRN EN 1993-1-1:2022.....</b>	<b>28</b>
6.1.	Klasifikacija poprečnog presjeka.....	28
6.2.	Otpornost elementa na savijanje .....	30
<b>7.</b>	<b>PARAMETARSKA ANALIZA OTPORNOSTI ELEMENTA NA SAVIJANJE PREMA NORMI HRN EN 1993-1-1:2022.....</b>	<b>32</b>
7.1.	Primjer proračuna otpornosti elementa na savijanje.....	32
7.2.	Parametri bočno-torzijskog izvijanja za slučaj $h/b \leq 1,2$ ( HEA 280).....	33
7.3.	Parametri bočno-torzijskog izvijanja za slučaj $h/b \geq 1,2$ (HEA 700) .....	34
7.4.	Usporedba rezultata za opći i modificirani postupak proračuna.....	35
<b>8.</b>	<b>USPOREDBA REZULTATA PRORAČUNA OTPORNOSTI ELEMENTA PREMA NORMI HRN EN 1993-1-1 I NORMI HRN EN 1993-1-1: 2022.....</b>	<b>37</b>
8.1.	Usporedba modificiranog postupka za HEA 280 (270/280) .....	37
8.2.	Usporedba modificiranog postupka za HEA 700 (690/300) .....	38
<b>9.</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>40</b>
	<b>POPIS LITERATURE .....</b>	<b>42</b>
	<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>43</b>
	<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>44</b>

## 1. UVOD

Unutar ovog rada objasnit će se otpornost čeličnih elemenata, s posebnim osvrtom na otpornost pri jednoosnom savijanju. Jednoosno savijanje je savijanje elementa u samo jednoj glavnoj ravnini. Postoji slučaj kada djeluje i savijanje i uzdužna sila, te samo savijanje. Pri proračunu otpornosti čeličnih elemenata, prvo se mora odrediti klasa poprečnog presjeka. Prema Eurocodu 3 postoje četiri klase koje su također obrađene u nastavku rada, zatim se radi proračun otpornosti poprečnog presjeka, a tek onda samog elementa. U nastavku rada je obrađena stabilnost štapnih elemenata (ponašanje elemenata kada su izloženi savijanju bez uzdužne sile te kada je i ona prisutna, kao i ponašanje elemenata pri bočno-torzijskom izvijanju.), odnosno slučajevi koji izazivaju izvijanje tj. gubitak stabilnosti. Zadnja poglavlja govore o dvije metode proračuna bočno-torzijskog izvijanja (opći i modificirani) prema normama HRN EN 1993-1-1: 2008. i EN 1993-1-1: 2022.) te kada ih je dozvoljeno koristiti.

## 2. METODE I TEHNIKE RADA

Pored teorijske obrade savijanja čeličnih elemenata provedena je i parametarska analiza na HEA profilima koja prikazuje ovisnost faktora redukcije i bezdimenzijske vitkosti, a ista je prikazana pomoću dijagrama. Istraživačke aktivnosti rađene su na proizvoljno odabranim HEA profilima (HEA 280 i HEA 700) koji su birani tako da zadovolje uvjete koji su propisani normama, a bili su nam potrebni za spomenutu analizu (primjerice odnos  $h/b$ ). Pored Worda, za izradu rada korišten je u velikoj mjeri Excel koji je bio potreban za računanje, provedbu analize te izradu tablica i dijagrama.

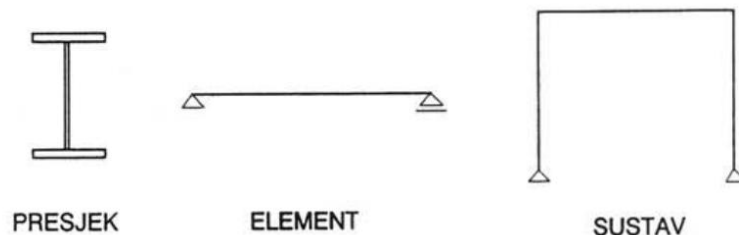
### 3. OTPORNOST ČELIČNIH ELEMENATA

#### 3.1. Dokaz pouzdanosti - $E_d \leq R_d$

Odabir potrebnih dimenzija elemenata konstrukcije kojim se dokazuje da je  $E_d$  - proračunski učinak djelovanja, izražen kao rezna sila ili napon, manji ili jednak od  $R_d$  - proračunska otpornost izražena kao rezna sila ili napon, naziva se dimenzioniranje.

Dimenzioniranje je moguće provoditi na razini poprečnog presjeka, konstrukcijskog elementa (koji će se najviše obrađivati u nastavku) te konstrukcijskog sustava koji su prikazani na slici 1.

Današnji pristup dimenzioniranju elemenata temelj pronalazi u probabilističkom pristupu problemu sigurnosti, odnosno na teoriji vjerojatnosti. Ovakvim rješenjem navedenog problema dimenzioniranje elementa bazira se na operativno-inženjerskoj razini koristeći parcijalne koeficijente pouzdanosti. Ovakav pristup implementiran je u tehničke propise europskih zemalja, koji su za čelične konstrukcije sadržani u dokumentu Eurocode 3.



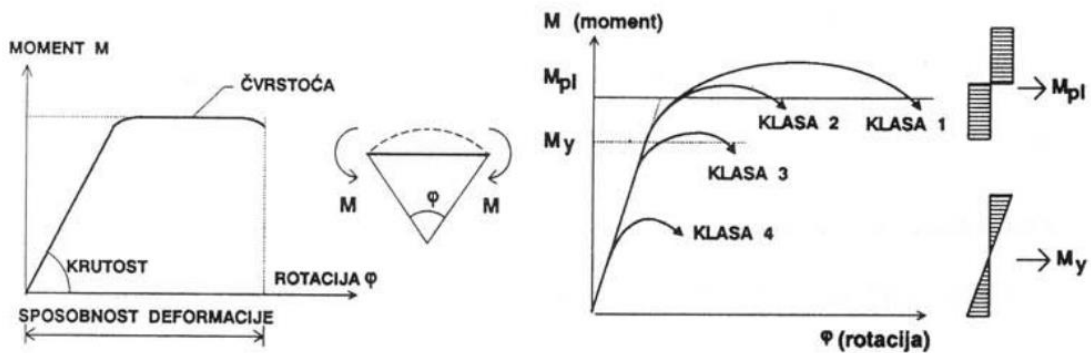
Slika 1.: Prikaz presjeka, elementa i sustava [1]

#### 3.2. Konstrukcijska svojstva elemenata

Važna svojstva svakog elementa su:

- čvrstoća
- krutost
- sposobnost deformacije

Ako je savijanje dominantno, spomenuta svojstva mogu se prikazati na dijagramu ovisnosti momenta savijanja  $M$  i rotacije  $\varphi$  pojedinih poprečnih presjeka elementa (slika 2).



**Slika 2.:** Konstrukcijska svojstva elementa i klase poprečnih presjeka elemenata čeličnih konstrukcija [2]

Rotacijska sposobnost ovisna je o:

- odnosu širine i debljine pojasnice i hrpta poprečnog presjeka
- položaju uzdužne tlačne sile u odnosu na presjek
- udaljenosti nul-točke momentne linije od kritičnog poprečnog presjeka

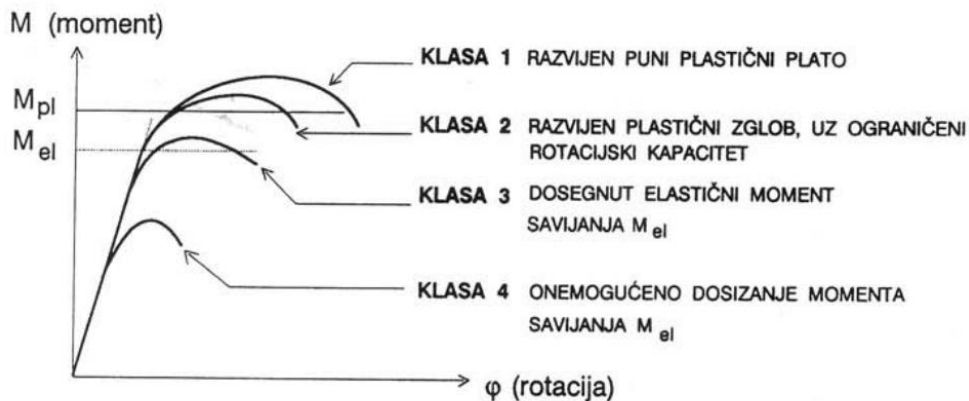
Rotacijska je sposobnost zapravo mogućnost deformacije, koju određeni oblik poprečnog presjeka može „izdržati“ u odnosu na moment plastičnosti  $M_{pl}$ , ali bez privremenog otkazivanja. Kod idealnog slučaja, poprečni bi presjek trebao imati rotacijsku sposobnost koja odgovara deformaciji jednakoj prekidnom izduženju materijala, ali to i ne mora biti ostvarivo zbog mogućih utjecaja sekundarnih učinaka.

Suvremena regulativa (EUROCODE 3), obzirom na svojstvo  $M - \varphi$ , razlikuje četiri klase poprečnih presjeka.

Klasifikacija poprečnih presjeka, prema kojoj radimo daljnji proračun otpornosti (slika 3):

- **KLASA 1** (plastični poprečni presjek)- postupak „*plastično-plastično*“  
Unutar ovog postupka radi se s punom plastifikacijom poprečnog presjeka od momenta savijanja, odnosno s plastičnom interakcijom momenta savijanja, uzdužne i poprečne sile. Također se uzima u obzir formiranje plastičnih zglobova kod statički neodređenih sustava.
- **KLASA 2** (kompaktni poprečni presjek)- postupak „*elastično-plastično*“  
Rezne sile računaju se po teoriji elastičnosti, a otpornost se računa iskorištavajući plastični moment otpornosti poprečnog presjeka, odnosno plastičnu interakciju momenta savijanja, uzdužne i poprečne sile. Granična je nosivost dosegnuta kada se formira prvi plastični zglob.

- KLASA 3 (nekompaktni poprečni presjeci)- postupak „*elastično-elastično*“  
Proračun reznih sila i otpornosti dobiva se prema teoriji elastičnosti. Otpornost (nosivost) poprečnog presjeka dosegnuta je kada rubno vlakance presjeka dosegne granicu popuštanja.
- KLASA 4 (vitki poprečni presjeci)- „*postupak elastično-elastično*“  
Ako je poprečni presjek *tankostijeni*, tj. ne zadovoljava uvjete za klasu 3, svrstava se u klasu 4 i kod računanja nosivosti mora se uzeti u obzir lokalno izbočavanje poprečnog presjeka, odnosno njegovog dijela. Njegova je otpornost ispod otpornosti poprečnog presjeka klase 3 (reducira se napon ili poprečni presjek), stoga je nužno uzeti efektivnu površinu.



**Slika 3.:** Proračun reznih sila i klase poprečnog presjeka [2]

Sumirajući gore navedene kriterije, dobiju se sljedeće formule;

Otpornost poprečnog presjeka u tlaku:

- Klase 1, 2 i 3 :

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M_0}}$$

- Klasa 4 :

$$N_{c,Rd} = N_{0,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M_1}}$$

Otpornost poprečnog presjeka na savijanje:



- Klase 1 i 2 :

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M_0}}$$

- Klasa 3:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M_0}}$$

- Klasa 4:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M_0}}$$

### 3.3. Krajnje granično stanje

Krajnje granično stanje definirano je kao ono kod kojeg dolazi do havarije nosive konstrukcije ili drugih oblika otkazivanja nosivosti koji mogu ugroziti sigurnost ljudi.

Krajnje se granično stanje provodi za navedene elemente i sustave:

- a) Vlačni elementi
- b) Tlačni elementi
- c) Elementi izloženi savijanju
- d) Element izložen istovremeno savijanju i uzdužnoj sili
- e) Okvirni sustav

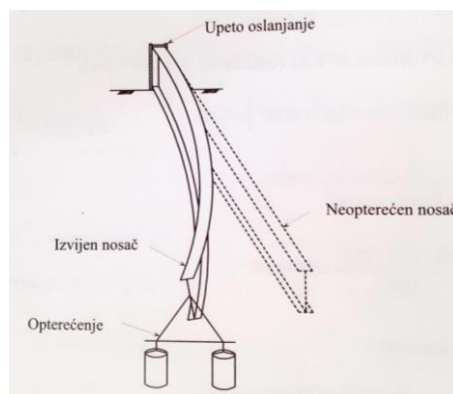
U sljedećem poglavlju temeljito će se obraditi otpornost elemenata izloženih savijanju (djelovanje savijanja bez uzdužne sile, djelovanje savijanja i uzdužne sile istovremeno, bočno-torzijsko izvijanje elementa...).

## 4. PRORAČUN OTPORNOSTI ELEMENATA IZLOŽENIH SAVIJANJU

### 4.1. Element izložen savijanju (bez uzdužne sile)

#### 4.1.1. Uvod

Kada se nosač savija oko njegove jače osi može doći do otkazivanja naglim izbacivanjem oko njegove slabije osi. Takav način izvijanja naziva se bočno torzijsko izvijanje i prikazano je na slici 4.

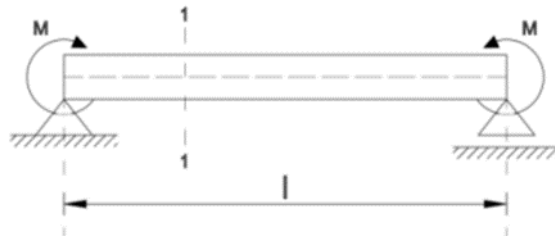


**Slika 4.:** Bočno izvijanje vitkog konzolnog nosača [3]

Ako se promatra konzolni nosač koji je idealno ravan, a poprečni je presjek bez inicijalnog napona te idealno elastičan, vrh konzole će se progibati samo u vertikalnoj ravnini bez progibanja izvan ravnine do onog trenutka kada vrijednost djelujućeg momenta ne dosegne kritičnu vrijednost, a tada dolazi do izvijanja nosača bočno i tordiranjem. Takvo se ponašanje najjednostavnije može prikazati pomoću nosača I, gdje se savijanje preuzima parom sila (tlačnom i vlačnom) koje se formiraju u pojasnicama. Tlačna se pojasnica razmatra kao tlačni štap, a tlačni štapovi imaju tendenciju izvijanja oko slabije osi, ali to se sprječava pomoću hrpta, zbog čega je onda pojasnica prisiljena izviti se bočno, a pri tome se inducira malo tordiranje presjeka jer dolazi do deformacije i hrpta. Obzirom da postupak dimenzioniranja elementa koji otkazuje bočno-torzijskim izvijanjem uzima u obzir višestruke utjecaje (oblik poprečnog presjeka, tip opterećenja, postojanje pridržanja, početne nesavršenosti...), potrebno je najprije promotriti jednostavan model na osnovu kojeg se kasnije razmatraju i drugi slučajevi.

#### 4.1.2. Elastično izvijanje jednostavno oslonjenog nosača

Jednostavno se oslonjen nosač promatra kao idealno elastičan, ravni nosač I poprečnog presjeka koji je na krajevima opterećen jednakim momentom suprotnih smjerova oko jače osi, a nepridržan po cijeloj dužini. Kod takvih slučajeva, ležajevi sprječavaju bočne pomake i tordiranje, ali je omogućeno zaokretanje u ravnini hrpta i van ravnine.



Slika 5.: Jednostavan model opterećenja nosača [2]

Konačan izraz za elastični kritični moment  $M_{Cr}$  glasi:

$$M_{Cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}},$$

gdje je:

$G$  modul posmika,  $E$  modul elastičnosti,  $I_z$  moment tromosti oko slabije osi,  $I_t$  torzijska konstanta,  $I_w$  konstanta krivljenja,  $L$  dužina nosača između točaka bočnog pridržanja.

Gore navedeni izrazi predstavljaju krutosti, a njihova relativna važnost ovisi o tipu poprečnog presjeka koji se promatra (npr. sandučastog i otvorenog presjeka).

#### 4.1.3. Elastično izvijanje ostalih slučajeva

Kada se promatra elastično izvijanje za ostale slučajeve, važno je uzeti u obzir raspored opterećenja pa je jednoliko raspodijeljeni moment savijanja na nepridržanom nosaču najnepovoljniji oblik, a različiti slučajevi opterećenja rezultiraju višim vrijednostima elastičnih kritičnih momenata. Također bitno je spomenuti i položaj opterećenja u odnosu na poprečni presjek, jer opterećenje koje djeluje na gornjoj pojasnici doprinosi destabilizaciji zbog dodatnog momenta torzije, a taj utjecaj postaje sve veći pri porastu visine presjeka ili

smanjenjem nosača. Osim opterećenja, važni su i uvjeti oslanjanja na krajevima. Ako ležajevi sprječavaju rotaciju izvan ravnine savijanja, raste i otpornost na izvijanje. Nosači mogu biti bočno pridržani na određenim razmacima, pri čemu se za proračun uzima najkritičniji odsječak.

#### 4.1.4. Razvoj postupka proračuna

Pri proračunu, naravno treba uzeti u obzir činjenicu da realni nosači nisu izvedeni idealno ravni, a materijali se ne ponašaju idealno elastično. Dokazano je da je ponašanje vitkih nosača dobro predstavljeno elastičnom teorijom izvijanja, ali vrlo zdepasti nosači otkazuju kada dosegnu punu plastičnu otpornost. U slučaju zdepastih nosača ( $\lambda_{LT} \leq 0,4$ ), bočno torzijsko izvijanje ne stvara utjecaj na otpornost nosača. Vitki nosači pak imaju otpornost koja je vrlo slična teoretskom elastičnom kritičnom momentu, no u praksi najrašireniju primjenu imaju nosači srednje vitkosti i oni su znatno izloženi nepovoljnim učincima zbog neelastičnosti i geometrijskih imperfekcija.

#### 4.2. Otpornost na bočno-torzijsko izvijanje prema Eurocode 3

Oni nosači koji su bočno nepridržani, a istovremeno izloženi savijanju oko njihove jače osi provjeravaju se na bočno torzijsko izvijanje, iako postoje mnogi slučajevi kada se isto ne mora provoditi, odnosno provodi se samo provjera poprečnog presjeka, a to su primjerice; kada je tlačna pojasnica nosača pridržana bočnim pridržanjem, savijanje nosača oko slabije osi, zatim kada nosači imaju veliku bočnu krutost na savijanje, kao i značajnu torzijsku krutost (kvadratni šuplji presjeci) te općenito kada je  $\lambda_{LT} \leq 0,4$ .

U postupku provjere savijenog nosača mora biti zadovoljen uvjet:

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd},$$

gdje je:

$M_{Ed}$  računski moment savijanja,  $M_{b,Rd}$  računska otpornost na bočno torzijsko izvijanje nepridržanog nosača.

$$M_{b,Rd} = X_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

gdje je:

$X_{LT}$  faktor redukcije,  $W_y$  moment otpora presjeka odgovarajuće klase ( $W_{pl,y}$ ,  $W_{yel,y}$ ,  $W_{eff,y}$ ).

#### 4.2.1. Krivulje izvijanja

Prema HRN EN 1993-1-1: 2008. razlikuju se četiri krivulje bočno torzijskog izvijanja koje ovise o omjeru visine i širine poprečnog presjeka, tipu poprečnog presjeka te radi li se o valjanom ili zavarenom presjeku. Krivulje su definirane za dva slučaja:

- **opći slučaj,**
- **modificirani slučaj** (valjani ili ekvivalentni zavareni presjeci).

**Opći slučaj** - moguća primjena na sve uobičajene tipove presjeka kao i valjane presjeke, koji spadaju izvan standardnog područja.

Krivulje za opći slučaj dane su sljedećim izrazom:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$X_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}}$$

gdje je:  $\alpha_{LT}$  faktor imperfekcije,  $M_{cr}$  elastični kritični moment za bočno torzijsko izvijanje.

Faktori imperfekcije i krivulje odabiru se prema odgovarajućim tablicama u odnosu na presjek:

**Tablica 1.:** Vrijednost krivulja izvijanja [4]

Krivulja izvijanja	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Faktor nesavršenosti	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

**Tablica 2.:** Odabir krivulja izvijanja prema presjeku za opći slučaj [4]

Poprečni presjek	Ograničenja	Krivulja izvijanja
valjani profil oblika I	$h/b \leq 2$	<b>a</b>
	$h/b \geq 2$	<b>b</b>
zavareni profil oblika I	$h/b \leq 2$	<b>c</b>
	$h/b \geq 2$	<b>d</b>
ostali poprečni presjeci	-	<b>d</b>

**Modificirani slučaj** – Definiira se za valjane ili ekvivalentne zavarene poprečne presjeke. Krivulje bočno torzijskog izvijanja navedene su u sljedećim izrazima, dok se faktori imperfekcije mogu koristiti kao i iz tablice za opći slučaj.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LT}^2}}$$

Uz uvjet da vrijednost  $\bar{\lambda}_{LT,0}$  ne smije biti veća od 0,4, a vrijednost koeficijenta  $\beta$  ne smije biti manja od 0,75 (to su preporučene vrijednosti prema normi).

**Tablica 3.:** Vrijednosti i odabir krivulja izvijanja prema presjeku za modificirani slučaj [4]


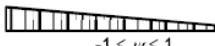






Poprečni presjek	Ograničenja	Krivulja izvijanja
valjani profili oblika I	$h/b \leq 2$	<b>b</b>
	$h/b \geq 2$	<b>c</b>
zavareni profili oblika I	$h/b \leq 2$	<b>c</b>
	$h/b \geq 2$	<b>d</b>

Unutar ove metode pojavljuje se dodatni faktor  $f$  koji se rabi za modifikaciju  $X_{LT}$  prema sljedećem izrazu:

$$X_{LT,mod} = \frac{X_{LT}}{f}, \text{ ali } X_{LT,mod} \leq 1.$$

Pomoću ove modifikacije općeg slučaja omogućeno je povećanje otpornosti na bočno torzijsko izvijanje. Faktor  $f$  je izveden temeljem numeričkih istraživanja, a vrijednost mu ovisi o obliku dijagrama savijanja između bočnih pridržanja, odnosno o koeficijentu  $k_c$ . (tablica 4)

**Tablica 4.:** Vrijednosti faktora  $f$  u ovisnosti o koeficijentu  $k_c$ . [3]

Raspodjela momenta	$k_c$
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

Kada se odredi vrijednost koeficijenta  $k_c$ , faktor  $f$  se računa prema sljedećem izrazu:

$$f = 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot [1 - 2,0 \cdot (\bar{\lambda}_{LT,0} - 0,8)^2]$$

#### 4.2.2. Elastični kritični moment za bočno-torzijsko izvijanje

Elastični kritični moment dvoosno simetričnih presjeka s točno određenim uvjetima pridržanja (spriječen bočni pomak i spriječena rotacija oko uzdužne osi) računa se prema sljedećem izrazu:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \left[ C_2 \cdot z_g + \sqrt{\left( \frac{k}{k_w} \right) \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} \right]$$

Faktori  $C_1$  i  $C_2$  ovise o nekoliko parametara:

- svojstvima presjeka
- uvjetima oslanjanja

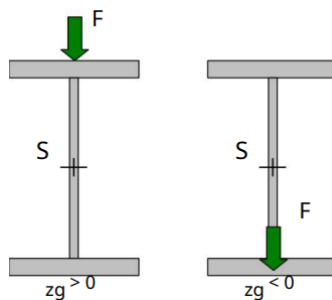
- momentnom dijagramu

Faktor  $C_1$  najčešće se procjenjuje prema vrijednostima iz tablice za nosač izložen momentima savijanja na njegovim krajevima ( $k=0$ ).

**Tablica 5.:** Vrijednost parametra  $C_1$  za nosač izložen momentima savijanja na njegovim krajevima [6]

$\psi$	$C_1$
+1,00	1,00
+0,75	1,14
+0,50	1,31
+0,25	1,52
0,00	1,77
-0,25	2,05
-0,50	2,33
-0,75	2,57
-1,00	2,55

U općem slučaju koeficijent  $z_g$  je pozitivan za opterećenja koja djeluju prema središtu smicanja.



**Slika 6.:** Točka unosa poprečnog opterećenja [6]

#### 4.2.3. Konstrukcijske mjere za sprječavanje bočno torzijskog izvijanja

Koristeći određene preventivne radove na elementima ugrožene stabilnosti uslijed bočnog izvijanja može se spriječiti otkazivanje ili povećati otpornost, ali takvi zahvati koji se poduzimaju moraju biti i dokazani.

Oni se razvrstavaju u navedena poglavlja:

- Izbor prikladnog poprečnog presjeka (povećanjem tlačnog pojasa, ili korištenjem zatvorenog krutog presjeka)
- Pridržanje tlačnog pojasa (korištenjem pokrova jer imaju dobru fleksijsku i posmičnu krutost)

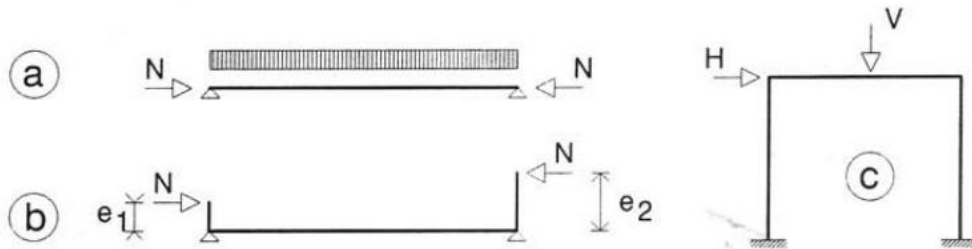


c) Zahvati na ležaju (postavljanjem zavarenih ukrućenja, zavarene ploče...)

### 4.3. Elementi izloženi savijanju i uzdužnoj sili

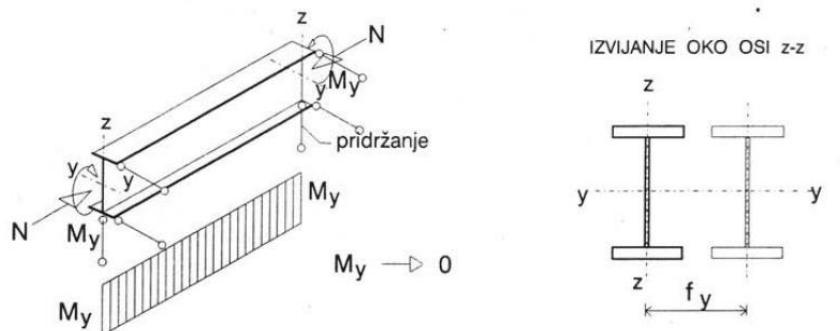
#### 4.3.1. Uvod

Unutar ovog dijela, u središtu je razmatranja element izložen istodobnom djelovanju uzdužne tlačne sile i momenta savijanja, kao što je prikazano na slici 7. Moment savijanja se javlja zbog poprečnog opterećenja između krajeva nosača, zatim ekscentričnog djelovanja uzdužne sile na rubovima štapa i/ili poradi elemenata s kojima je navedeni element povezan u okvirnom sustavu.

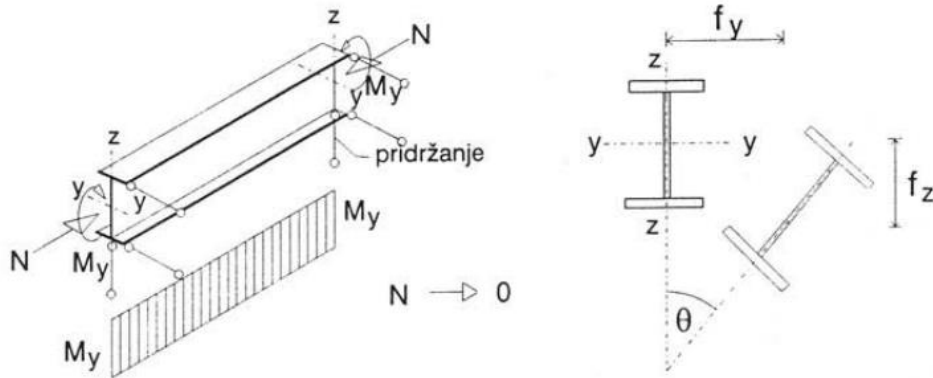


**Slika 7.:** Prikaz elemenata izloženih istodobnom djelovanju uzdužne sile i momenta savijanja [1]

Ako se vrijednost momenta savijanja kreće prema nuli, element je centrički opterećen štapa, a ako vrijednost uzdužne sile teži u nulu, to je onda nosač, koji kada nema bočna pridržanja, ima problem bočnog izvijanja. Ti su slučajevi slikovito prikazani na slikama 12 i 13.



**Slika 8.:** Izvijanje savijanjem [2]

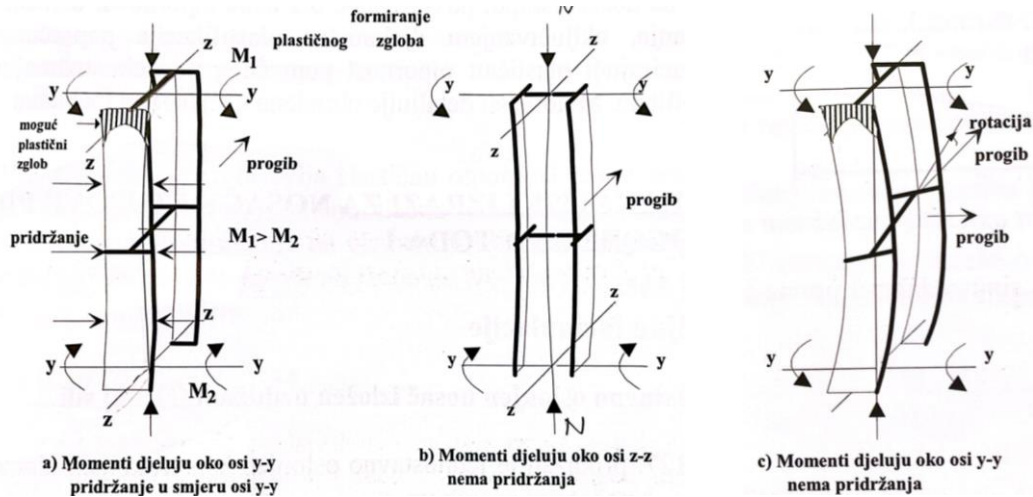


Slika 9.: Bočno-torzijsko izvijanje [2]

Gubitak stabilnosti elementa na kojeg istodobno djeluju tlačna sila i moment savijanja mogu se iskazati na različite načine. Kod kratkih elemenata ne uzimaju se u obzir problemi stabilnosti, a on otkazuje kada nastupi potpuno iscrpljenje otpornosti poprečnog presjeka.

Moguća otkazivanja vrlo su važni problemi za pouzdanost elemenata pa su rješenja pronalaze ovisno o tome o kojim je slučajevima riječ. Neki od slučajeva objašnjeni su u nastavku i prikazani na slici 14.;

- Slučaj a)  
Ovaj slučaj vrijedi kada je element izložen djelovanju uzdužne sile  $N$  i momenta savijanja oko jače osi poprečnog presjeka  $y-y$ . Oko slabije osi, tj. osi  $z-z$  element je pridrжан pa se savijanje zbiva samo oko osi  $y-y$ , a shodno tome i otkazivanje nastupa oko iste osi. Ako je sila  $N$  mala ili vitkost elementa nije značajna, moguće je plastično formiranje zglobova na rubovima.
- Slučaj b)  
Slučaj b) odnosi se na elemente na koje djeluje uzdužna sila  $N$  i moment savijanja oko osi  $z-z$ . Otkazivanje je vezano za izvijanje savijanjem oko osi  $z-z$ , stoga u tom slučaju i nema bočno-torzijskog otkazivanja
- Slučaj c)  
Element je opterećen kao u slučaju a), ali nema pridrzanje oko osi  $z-z$  pa kao posljedica toga dolazi do izvijanja izraženim savijanjem i torzijom.



Slika 10.: Elementi izloženi djelovanju uzdužne sile i momenta savijanja [1]

### 4.3.2. Interakcijski izrazi za nosače-stupove prema Eurocode 3

#### 4.3.2.1. Metoda 1

Temelji se na elastičnoj teoriji drugog reda, zadovoljava točnost procjene pouzdanosti i posjeduje kontinuitet između klasi presjeka, kao i od plastičnosti do elastičnosti kada se događa porast vitkosti i uzdužne sile.

Izraz kojim je opisano ponašanje nosača-stupova uzima u obzir i moment savijanja prvog reda, a glasi:

$$\frac{N}{N_{pl,Rd}} + \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \cdot \frac{N_{Ed} \cdot e_0}{M_{el,Rd}} + \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} \cdot \frac{C_m \cdot M_{Ed}}{M_{el,Rd}} \leq 1$$

Prema ovom izrazu u obzir se uzimaju i utjecaji dva nova pojma:

- Faktor ekvivalentnog momenta  $C_m$
- Faktor povećanja  $1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}$

Faktor povećanja

Na raspodjelu momenta savijanja prvog reda duž nosača ima utjecaj i uzdužna tlačna sila, pa se momenti koji nastaju djelovanjem navedne sile zapravo dobivaju množenjem momenata savijanja prvog reda i odgovarajućeg faktora povećanja.

Faktor ekvivalentnog momenta  $C_m$

On nam služi da bi trenutnu raspodjelu momenata savijanja prvog reda uzduž elemenata „poboljšali“ s odgovarajućom sinusoidalnom raspodjelom. Prema takvoj formulaciji, najveća vrijednost momenta prvog reda iznosi:  $M_{Ed} * C_m$ , gdje je  $M_{Ed}$  iznos nevedenog momenta u trenutnoj raspodjeli momenata savijanja.

Kasnijim istraživanjima ponuđen je pojednostavljeni izraz za  $C_m$  koji je integriran u

Eurocode 3 (teoretski) :

$$C_m = 0,79 + 0,21 \cdot \psi + 0,36 \cdot (\psi - 0,33) \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}$$

Prema Austin-u:

$$C_m = 0,6 + 0,4 \cdot \psi \geq 0,4$$

Prema Massonnet-u:

$$C_m = \sqrt{0,3 \cdot (1 + \psi^2) + 0,4\psi}$$

#### 4.3.2.2. Metoda 2

Metoda se 2 bazira na općem formatu i prikazuje jasno fizikalno ponašanje nosača-stupova te je pogodna u slučaju ručnih proračuna. Služi kao pripomoć u izvođenju interakcijskih izraza konstrukcijskih elemenata koji su izloženi djelovanju uzdužne sile i savijanja. Ova metoda uzima u obzir oblike poprečnih presjeka (jer zbog oblika, neki presjeci su osjetljivi ili ne na torzijske deformacije pa se tako razlikuju izrazi za torzijski krute ili mekane profile), način izvijanja (izvijaju li se oko y- osi ili z-osi) te bočna pridržanja (lako su formule izvedene za nosač stup s viličastim pridržanjem, ali imaju mogućnost prilagodbe i za ostale oblike).

##### 4.3.2.2.1. Koncept interakcijskih izraza za N+My

Dani su izrazi koji opisuju torzijski krute, tj. torzijski meke poprečne presjeke. Za prvi slučaj u središtu je izvijanje savijanjem, a u drugom bočno-torzijsko izvijanje. Kako je i prethodno objašnjeno, navedeni izrazi pokrivaju ponašanje i jednostavno oslonjenih nosača, ali i onih pridržanih bočnim pridržanjem. Očekuje se da su bočna pridržanja sposobna potpuno osigurati konstrukcijski element, odnosno da su u slučaju izvijanja savijanjem dovoljna bočna pridržanja (tlačna pojasnica), dok je pri bočno-torzijskom izvijanju potrebno i torzijsko pridržanje (obje pojasnice).

U izrazima su prisutni sljedeći faktori:

- Faktori  $k_y, k_z, k_{LT}$ ,
- Faktori ekvivalentnih jednolikih momenata  $C_{my}, C_{mz}, C_{mLT}$

A pored njih potrebno je odrediti iznose i faktora redukcije koji su nam potrebni za slučajeve izvijanja uzrokovane samo tlačnom silom ili bočno-torzijsko izvijanje uslijed savijanja.

Valja istaknuti da se faktori  $C_m$  temelje na Austinovom konceptu koji uzima konstantni moment kao referentni pa je  $C_m = 1$  za jednoliko raspodijeljene momente, a za ostale momente se uzima vrijednost manja od jedan.

- TORZIJSKI KRUTI PROFILI

$$y-y \quad \frac{N_{Ed}}{X_y \cdot N_{pl,Rd}} + \frac{k_y \cdot M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$$

$$z-z \quad \frac{N_{Ed}}{X_z \cdot N_{pl,Rd}} + 0,6 \cdot \frac{k_y \cdot M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \leq 1$$

$$\text{pojednostavljeno: } \frac{N_{Ed}}{X_z \cdot N_{pl,Rd}} \leq 1$$

- TORZIJSKI MEKANI PROFILI

$$y-y \quad \frac{N_{Ed}}{X_y \cdot N_{pl,Rd}} + \frac{k_y \cdot C_{my} M_{y,Ed}}{X_{LT} M_{pl,y,Rd}} \leq 1$$

$$z-z \quad \frac{N_{Ed}}{X_z \cdot N_{pl,Rd}} + 0,6 \cdot \frac{k_{LT} \cdot M_{y,Ed}}{X_{LT} M_{pl,y,Rd}} \leq 1$$

## 5. PARAMETARSKA ANALIZA OTPORNOSTI ELEMENTA NA SAVIJANJE PREMA HRN EN 1993-1-1:2008

Na sljedećim primjerima HEA profila predočit će se pomoću parametarskih analiza ovisnost bezdimenzijske vitkosti i faktora redukcije prema izrazima općeg i modificiranog postupka bočno-torzijskog izvijanja koji je obrađen u točki 2.2., ali prije toga provest će se klasifikacija profila HEA 280 i HEA 700 koji će se dalje koristiti u proračunu. Klasifikacija će se odrediti prema normi HRN EN 1993-1-1:2008.

### 5.1. Klasifikacija profila

Klasifikacija pojasnice provest će se prema tlaku, a klasifikacija hrpta prema savijanju (polovica presjeka hrpta u vlaku, polovica u tlaku). Karakteristične vrijednosti profila koje se koriste kroz proračun uzete su iz tablica profila, a kako je već ranije spomenuto, cjelokupni poprečni presjek svrstava se u onaj nepovoljniji razred, iz čega slijedi:

#### KLASIFIKACIJA PROFILA HEA 280:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

#### POJASNICA

$$c = \frac{b-t_w-2r}{2} = \frac{280-8-2 \cdot 24}{2} = 112$$

$$t = t_f = 13$$

$$\frac{c}{t} = 8.61$$

$8.61 \leq 9\varepsilon$  - Pojasnica spada u 1. klasu

**HRBAT** (Klasifikaciju hrpta radimo prema savijanju)

$$c = h - 2t_f - 2r = 270 - 2 \cdot 13 - 2 \cdot 24 = 196$$

$$t = t_w = 8$$

$$\frac{c}{t} = 24.5$$

$24.5 \leq 72\varepsilon$  - Hrbat spada u 1. klasu

Dakle, može se zaključiti da poprečni presjek profila HEA 280 pripada 1. klasi.

#### KLASIFIKACIJA PROFILA HEA 700:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

#### POJASNICA

$$c = \frac{b-t_w-2r}{2} = \frac{300-14.5-2*27}{2} = 115.75$$

$$t = t_f = 27$$

$$\frac{c}{t} = 4.29$$

$4.29 \leq 9\varepsilon$  - Pojasnica spada u 1. klasu

**HRBAT** (Klasifikaciju hrpta radimo prema savijanju)

$$c = h - 2t_f - 2r = 690 - 2 \cdot 27 - 227 = 582$$

$$t = t_w = 14.5$$

$$\frac{c}{t} = 40.14$$

$40.14 \leq 72\varepsilon$  - Hrbat spada u 1. klasu

Dakle, poprečni presjek profila HEA 700 također pripada 1. klasi.

## 5.2. Otpornost elementa na savijanje

### - OPĆI POSTUPAK

Kada je u pitanju opći postupak, prvo se odredi krivulja izvijanja ( $\alpha_{LT}$ ) prema već spomenutim tablicama (tablica 1. i tablica 2.) na osnovu poprečnog presjeka, odnosno odnosa  $h/b$ .

U ovom slučaju, uzeta su dva različita HEA profila jer imaju različite krivulje izvijanja. Tako je za odnos  $h/b \leq 2$ , uzet profil **HEA 280** (270/280) čiji poprečni presjek pripada klasi 1, a krivulja izvijanja je  $a$  (0,21), a za odnos  $h/b \geq 2$ , odabran je profil **HEA 700** (690/300), poprečnog presjeka klase 1, a krivulja izvijanja je  $b$  (0,34). Zatim se pomoću zadanih formula za opći slučaj spomenutih u točki 2.2. odredi vrijednost bezdimenzijske vitkosti ( $\lambda_{LT}$ ) i faktora imperfekcije ( $X_{LT}$ ), (s tim da je za ovu analizu, bezdimenzijska vitkost uzeta kao varijabla s rasponom vrijednosti  $0 \leq \lambda_{LT} \leq 2,5$  pa su se pomoću nje dobile i sve ostale vrijednosti).

Vrijednosti koje smo dobili za faktor imperfekcije koristeći opći postupak u tablicama su označene s  $X_{LT}$ .

### - MODIFICIRANI POSTUPAK

Kada se proračun radi prema modificiranom postupku, vrijednost krivulje izvijanja ( $\alpha_{LT}$ ) se uzima iz tablica (tablica 1. i tablica 3.) koje, kako je i prikazano također ovise o odnosu  $h/b$ .

Za gore navedeni profil **HEA 280** (270/280), sada je prema tablici uzeta krivulja izvijanja  $b$  (0,34), dok je za profil **HEA 700** (690/300), krivulja izvijanja  $c$  (0,49). Bezdimenzijska vitkost ( $\lambda_{LT}$ ) zadana je u istom intervalu, tj.  $0 \leq \lambda_{LT} \leq 2,5$ , a ostale vrijednosti dobivene su iz zadanih formula za modificirani postupak navedenih u točki 2.2. Unutar ove analize promatrala se modifikacija faktora redukcije ( $X_{LT}$ ) u ovisnosti o pet različitih vrijednosti koeficijenta  $k_c$ , koji ovisi o izgledu momentnog dijagrama. (slike 11., 12., 13., 14., 15.).



$$k_{c1} := 1,$$



Slika 11.: Izgled momentnog dijagrama za vrijednost  $k_{c1} = 1$  [3]

$$k_{c2} := 0,94,$$



Slika 12.: Izgled momentnog dijagrama za vrijednost  $k_{c2} = 0,94$  [3]

$$k_{c3} := 0,86,$$



Slika 13.: Izgled momentnog dijagrama za vrijednost  $k_{c3} = 0,86$  [3]

$$k_{c4} := 0,75 \text{ (kada je } \psi = 0 \text{)}$$



Slika 14.: Izgled momentnog dijagrama za vrijednost  $k_{c4} = 0,75$  [3]

$$k_{c5} := 0,60 \text{ (kada je } \psi = -1 \text{)}$$



Slika 15.: Izgled momentnog dijagrama za vrijednost  $k_{c5} = 0,60$  [3]

Modifikacija faktora redukcije prema zadanim koeficijentima  $k_c$  u tablici je označena kao:  
 $X_{k1}, X_{k0,94}, X_{k0,86}, X_{k0,75}, X_{k0,60}$

### 5.3. Primjer proračuna otpornosti elementa na savijanje

Pomoću gore navedenih postupaka, u sljedećim su tablicama dobivene vrijednosti koje su onda prikazane u obliku krivulje ovisnosti faktora redukcije i bezdimenzijske vitkosti, a prikazat će se postupak za jedan primjer općeg i jedan primjer modificiranog proračuna:

- Opći postupak:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 1$$

$$\alpha_{LT} = a = 0,21 \text{ (za } h/b \leq 2)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 [1 + 0,21(1 - 0,2) + 1^2] = 1,08$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{1,08 + \sqrt{1,08^2 - 1^2}} = 0,67$$

- Modificirani postupak:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 1$$

$$k_c = 1$$

$$\alpha_{LT} = b = 0,34 \text{ (za } h/b \leq 2)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta * \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 [1 + 0,34(1 - 0,4) + 0,75 * 1^2] = 0,98$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \beta * \lambda^2}} = \frac{1}{0,98 + \sqrt{0,98^2 - 0,75 * 1^2}} = 0,70$$

$$f = 1 - 0,5 * (1 - k_c) * [1 - 2,0 * (\bar{\lambda}_{LT,0} - 0,8)^2] =$$

$$f = 1 - 0,5 * (1 - 1) * [1 - 2,0 * (0,4 - 0,8)^2] = 1$$

$$X_{LT,mod,kc} = \frac{X_{LT}}{f} = \frac{0,70}{1} = 0,70$$

#### 5.4. Parametri bočno-torzijskog izvijanja za slučaj $h/b \leq 2$ (HEA 280)

Tablica 6.: Tablica vrijednosti parametara za profil HEA 280 prema normi HRN EN 1993-1-1: 2008.

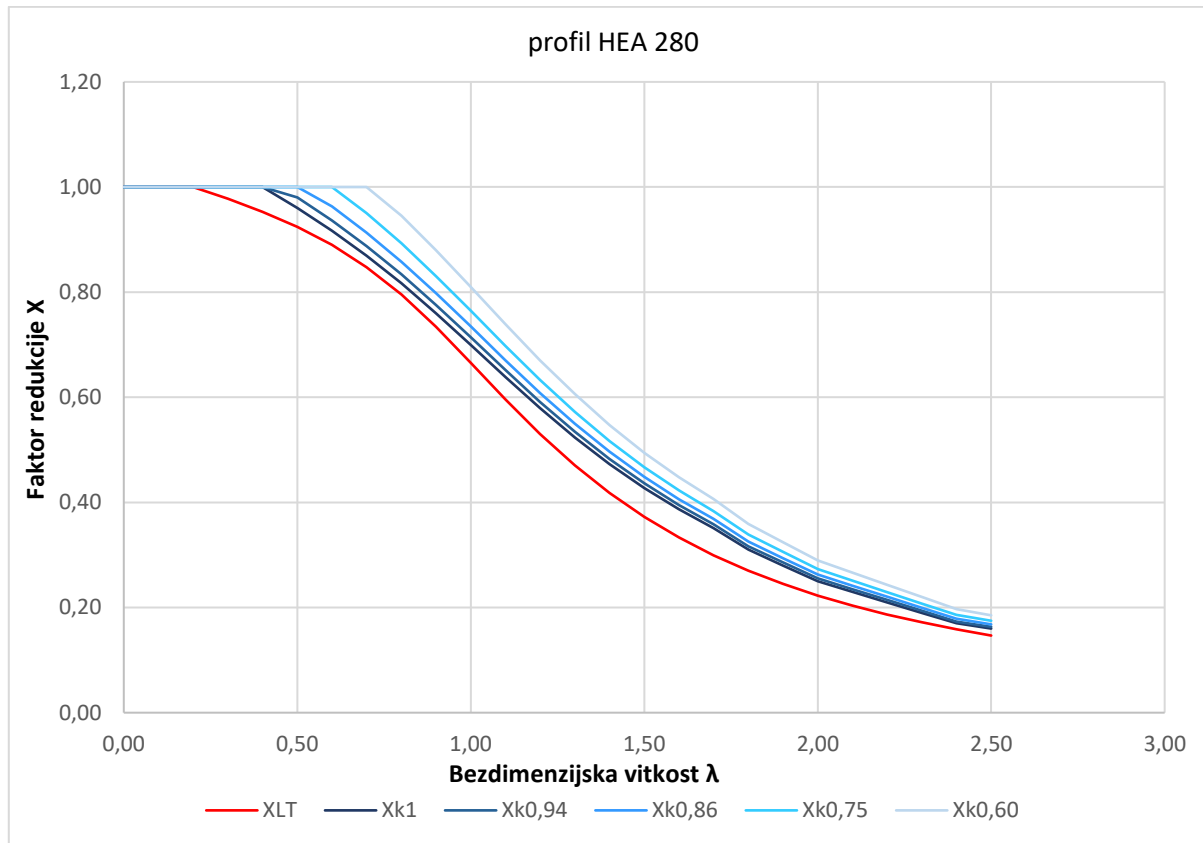
2,50	3,87	0,15	3,20	0,16	1,00	0,16	3,20	0,16	0,98	0,16	3,20	0,16	0,95	0,17	3,20	0,16	0,92	0,17	3,20	0,16	0,86	0,19
2,40	3,61	0,16	3,00	0,17	1,00	0,17	3,00	0,17	0,98	0,17	3,00	0,17	0,95	0,18	3,00	0,17	0,92	0,19	3,00	0,17	0,86	0,20
2,30	3,37	0,17	2,81	0,19	1,00	0,19	2,81	0,19	0,98	0,19	2,81	0,19	0,95	0,20	2,81	0,19	0,92	0,21	2,81	0,19	0,86	0,22
2,20	3,13	0,19	2,62	0,21	1,00	0,21	2,62	0,21	0,98	0,21	2,62	0,21	0,95	0,22	2,62	0,21	0,92	0,23	2,62	0,21	0,86	0,24
2,10	2,90	0,20	2,44	0,23	1,00	0,23	2,44	0,23	0,98	0,23	2,44	0,23	0,95	0,24	2,44	0,23	0,92	0,25	2,44	0,23	0,86	0,27
2,00	2,69	0,22	2,27	0,25	1,00	0,25	2,27	0,25	0,98	0,25	2,27	0,25	0,95	0,26	2,27	0,25	0,92	0,27	2,27	0,25	0,86	0,29
1,90	2,48	0,24	2,11	0,28	1,00	0,28	2,11	0,28	0,98	0,28	2,11	0,28	0,95	0,29	2,11	0,28	0,92	0,31	2,11	0,28	0,86	0,32
1,80	2,29	0,27	1,95	0,31	1,00	0,31	1,95	0,31	0,98	0,31	1,95	0,31	0,95	0,33	1,95	0,31	0,92	0,34	1,95	0,31	0,86	0,36
1,70	2,10	0,30	1,80	0,35	1,00	0,35	1,80	0,35	0,98	0,35	1,80	0,35	0,95	0,37	1,80	0,35	0,92	0,38	1,80	0,35	0,86	0,41
1,60	1,93	0,33	1,66	0,39	1,00	0,39	1,66	0,39	0,98	0,39	1,66	0,39	0,95	0,41	1,66	0,39	0,92	0,42	1,66	0,39	0,86	0,45
1,50	1,76	0,37	1,53	0,43	1,00	0,43	1,53	0,43	0,98	0,43	1,53	0,43	0,95	0,45	1,53	0,43	0,92	0,47	1,53	0,43	0,86	0,49
1,40	1,61	0,42	1,41	0,47	1,00	0,47	1,41	0,47	0,98	0,47	1,41	0,47	0,95	0,50	1,41	0,47	0,92	0,52	1,41	0,47	0,86	0,55
1,30	1,46	0,47	1,29	0,52	1,00	0,52	1,29	0,52	0,98	0,52	1,29	0,52	0,95	0,55	1,29	0,52	0,92	0,57	1,29	0,52	0,86	0,61
1,20	1,33	0,53	1,18	0,58	1,00	0,58	1,18	0,58	0,98	0,58	1,18	0,58	0,95	0,61	1,18	0,58	0,92	0,63	1,18	0,58	0,86	0,67
1,10	1,20	0,60	1,07	0,64	1,00	0,64	1,07	0,64	0,98	0,64	1,07	0,64	0,95	0,67	1,07	0,64	0,92	0,70	1,07	0,64	0,86	0,74
1,00	1,08	0,67	0,98	0,70	1,00	0,70	0,98	0,70	0,98	0,70	0,98	0,70	0,95	0,73	0,98	0,70	0,92	0,76	0,98	0,70	0,86	0,81
0,90	0,98	0,73	0,89	0,76	1,00	0,76	0,89	0,76	0,98	0,76	0,89	0,76	0,95	0,80	0,89	0,76	0,92	0,83	0,89	0,76	0,86	0,88
0,80	0,88	0,80	0,81	0,82	1,00	0,82	0,81	0,82	0,98	0,82	0,81	0,82	0,95	0,86	0,81	0,82	0,92	0,89	0,81	0,82	0,86	0,95
0,70	0,80	0,85	0,73	0,87	1,00	0,87	0,73	0,87	0,98	0,87	0,73	0,87	0,95	0,91	0,73	0,87	0,92	0,95	0,73	0,87	0,86	1,00
0,60	0,72	0,89	0,67	0,92	1,00	0,92	0,67	0,92	0,98	0,92	0,67	0,92	0,95	0,96	0,67	0,92	0,92	1,00	0,67	0,92	0,86	1,00
0,50	0,66	0,92	0,61	0,96	1,00	0,96	0,61	0,96	0,98	0,96	0,61	0,96	0,95	1,00	0,61	0,96	0,92	1,00	0,61	0,96	0,86	1,00
0,40	0,60	0,95	0,56	1,00	1,00	1,00	0,56	1,00	0,98	1,00	0,56	1,00	0,95	1,00	0,56	1,00	0,92	1,00	0,56	1,00	0,86	1,00
0,30	0,56	0,98	0,52	1,04	1,00	1,00	0,52	1,04	0,98	1,00	0,52	1,04	0,95	1,00	0,52	1,04	0,92	1,00	0,52	1,04	0,86	1,00
0,20	0,52	1,00	0,48	1,08	1,00	1,00	0,48	1,08	0,98	1,00	0,48	1,08	0,95	1,00	0,48	1,08	0,92	1,00	0,48	1,08	0,86	1,00
0,10	0,49	1,00	0,45	1,11	1,00	1,00	0,45	1,11	0,98	1,00	0,45	1,11	0,95	1,00	0,45	1,11	0,92	1,00	0,45	1,11	0,86	1,00
0,00	0,48	1,00	0,43	1,16	1,00	1,00	0,43	1,16	0,98	1,00	0,43	1,16	0,95	1,00	0,43	1,16	0,92	1,00	0,43	1,16	0,86	1,00
$\lambda_{lt}$	$\phi_{LT}$	$\chi_{LT}$	$\phi_1$	$\chi_{lt1}$	$f_{k=1}$	$\chi_{k1}$	$\phi_2$	$\chi_{lt2}$	$f_{k=0,94}$	$\chi_{k0,94}$	$\phi_3$	$\chi_{k3}$	$f_{k=0,86}$	$\chi_{k0,86}$	$\phi_4$	$\chi_{lt4}$	$f_{k=0,75}$	$\chi_{k0,75}$	$\phi_5$	$\chi_{lt5}$	$f_{k=0,60}$	$\chi_{k0,60}$

**5.5. Parametri bočno-torzijskog izvijanja za slučaj  $h/b \geq 2$  (HEA 700)**
**Tablica 7.: Tablica vrijednosti parametara za profil HEA 700 prema normi HRN EN 1993-1-1: 2008.**

2,50	4,02	0,14	3,36	0,16	1,00	0,16	3,36	0,16	0,98	0,16	3,36	0,16	0,98	0,16	3,36	0,16	0,95	0,17	3,36	0,16	0,92	0,17	3,36	0,16	0,86	0,19
2,40	3,75	0,15	3,15	0,17	1,00	0,17	3,15	0,17	0,98	0,17	3,15	0,17	0,98	0,17	3,15	0,17	0,95	0,18	3,15	0,17	0,92	0,19	3,15	0,17	0,86	0,20
2,30	3,50	0,16	2,95	0,19	1,00	0,19	2,95	0,19	0,98	0,19	2,95	0,19	0,98	0,19	2,95	0,19	0,95	0,20	2,95	0,19	0,92	0,21	2,95	0,19	0,86	0,22
2,20	3,26	0,18	2,76	0,21	1,00	0,21	2,76	0,21	0,98	0,21	2,76	0,21	0,98	0,21	2,76	0,21	0,95	0,22	2,76	0,21	0,92	0,23	2,76	0,21	0,86	0,24
2,10	3,03	0,19	2,57	0,23	1,00	0,23	2,57	0,23	0,98	0,23	2,57	0,23	0,98	0,23	2,57	0,23	0,95	0,24	2,57	0,23	0,92	0,25	2,57	0,23	0,86	0,26
2,00	2,81	0,21	2,39	0,25	1,00	0,25	2,39	0,25	0,98	0,25	2,39	0,25	0,98	0,25	2,39	0,25	0,95	0,26	2,39	0,25	0,92	0,27	2,39	0,25	0,86	0,29
1,90	2,59	0,23	2,22	0,27	1,00	0,27	2,22	0,27	0,98	0,27	2,22	0,27	0,98	0,27	2,22	0,27	0,95	0,28	2,22	0,27	0,92	0,29	2,22	0,27	0,86	0,31
1,80	2,39	0,25	2,06	0,29	1,00	0,29	2,06	0,29	0,98	0,29	2,06	0,29	0,98	0,29	2,06	0,29	0,95	0,31	2,06	0,29	0,92	0,32	2,06	0,29	0,86	0,34
1,70	2,20	0,28	1,90	0,32	1,00	0,32	1,90	0,32	0,98	0,32	1,90	0,32	0,98	0,32	1,90	0,32	0,95	0,34	1,90	0,32	0,92	0,35	1,90	0,32	0,86	0,37
1,60	2,02	0,31	1,75	0,35	1,00	0,35	1,75	0,35	0,98	0,35	1,75	0,35	0,98	0,35	1,75	0,35	0,95	0,37	1,75	0,35	0,92	0,39	1,75	0,35	0,86	0,41
1,50	1,85	0,34	1,61	0,39	1,00	0,39	1,61	0,39	0,98	0,39	1,61	0,39	0,98	0,39	1,61	0,39	0,95	0,41	1,61	0,39	0,92	0,43	1,61	0,39	0,86	0,45
1,40	1,68	0,38	1,48	0,43	1,00	0,43	1,48	0,43	0,98	0,43	1,48	0,43	0,98	0,43	1,48	0,43	0,95	0,45	1,48	0,43	0,92	0,47	1,48	0,43	0,86	0,50
1,30	1,53	0,43	1,35	0,47	1,00	0,47	1,35	0,47	0,98	0,47	1,35	0,47	0,98	0,47	1,35	0,47	0,95	0,50	1,35	0,47	0,92	0,52	1,35	0,47	0,86	0,55
1,20	1,39	0,48	1,24	0,52	1,00	0,52	1,24	0,52	0,98	0,52	1,24	0,52	0,98	0,52	1,24	0,52	0,95	0,55	1,24	0,52	0,92	0,57	1,24	0,52	0,86	0,61
1,10	1,26	0,54	1,13	0,58	1,00	0,58	1,13	0,58	0,98	0,58	1,13	0,58	0,98	0,58	1,13	0,58	0,95	0,61	1,13	0,58	0,92	0,63	1,13	0,58	0,86	0,67
1,00	1,14	0,60	1,02	0,64	1,00	0,64	1,02	0,64	0,98	0,64	1,02	0,64	0,98	0,64	1,02	0,64	0,95	0,67	1,02	0,64	0,92	0,70	1,02	0,64	0,86	0,74
0,90	1,02	0,66	0,93	0,70	1,00	0,70	0,93	0,70	0,98	0,70	0,93	0,70	0,98	0,70	0,93	0,70	0,95	0,74	0,93	0,70	0,92	0,77	0,93	0,70	0,86	0,81
0,80	0,92	0,72	0,84	0,76	1,00	0,76	0,84	0,76	0,98	0,76	0,84	0,76	0,98	0,76	0,84	0,76	0,95	0,80	0,84	0,76	0,92	0,83	0,84	0,76	0,86	0,88
0,70	0,83	0,78	0,76	0,83	1,00	0,83	0,76	0,83	0,98	0,83	0,76	0,83	0,98	0,83	0,76	0,83	0,95	0,87	0,76	0,83	0,92	0,90	0,76	0,83	0,86	0,96
0,60	0,75	0,84	0,68	0,89	1,00	0,89	0,68	0,89	0,98	0,89	0,68	0,89	0,98	0,89	0,68	0,89	0,95	0,93	0,68	0,89	0,92	0,97	0,68	0,89	0,86	1,00
0,50	0,68	0,88	0,62	0,94	1,00	0,94	0,62	0,94	0,98	0,94	0,62	0,94	0,98	0,94	0,62	0,94	0,95	0,99	0,62	0,94	0,92	1,00	0,62	0,94	0,86	1,00
0,40	0,61	0,93	0,56	1,00	1,00	1,00	0,56	1,00	0,98	1,00	0,56	1,00	0,98	1,00	0,56	1,00	0,95	1,00	0,56	1,00	0,92	1,00	0,56	1,00	0,86	1,00
0,30	0,56	0,96	0,51	1,06	1,00	1,00	0,51	1,06	0,98	1,00	0,51	1,06	0,98	1,00	0,51	1,06	0,95	1,00	0,51	1,06	0,92	1,00	0,51	1,06	0,86	1,00
0,20	0,52	1,00	0,47	1,11	1,00	1,00	0,47	1,11	0,98	1,00	0,47	1,11	0,98	1,00	0,47	1,11	0,95	1,00	0,47	1,11	0,92	1,00	0,47	1,11	0,86	1,00
0,10	0,49	1,00	0,43	1,17	1,00	1,00	0,43	1,17	0,98	1,00	0,43	1,17	0,98	1,00	0,43	1,17	0,95	1,00	0,43	1,17	0,92	1,00	0,43	1,17	0,86	1,00
0,00	0,47	1,00	0,40	1,24	1,00	1,00	0,40	1,24	0,98	1,00	0,40	1,24	0,98	1,00	0,40	1,24	0,95	1,00	0,40	1,24	0,92	1,00	0,40	1,24	0,86	1,00
h/t	$\phi_{LT}$	$\chi_{LT}$	$\phi_1$	$\chi_{H1}$	$f_{k=1}$	$\chi_{k1}$	$\phi_2$	$\chi_{H2}$	$f_{k=0,94}$	$\chi_{k0,94}$	$\phi_3$	$\chi_{H3}$	$f_{k=0,86}$	$\chi_{k0,86}$	$\phi_4$	$\chi_{H4}$	$f_{k=0,75}$	$\chi_{k0,75}$	$\phi_5$	$\chi_{H5}$	$f_{k=0,60}$	$\chi_{k0,60}$				

## 5.6. Usporedba rezultata za opći i modificirani postupak proračuna

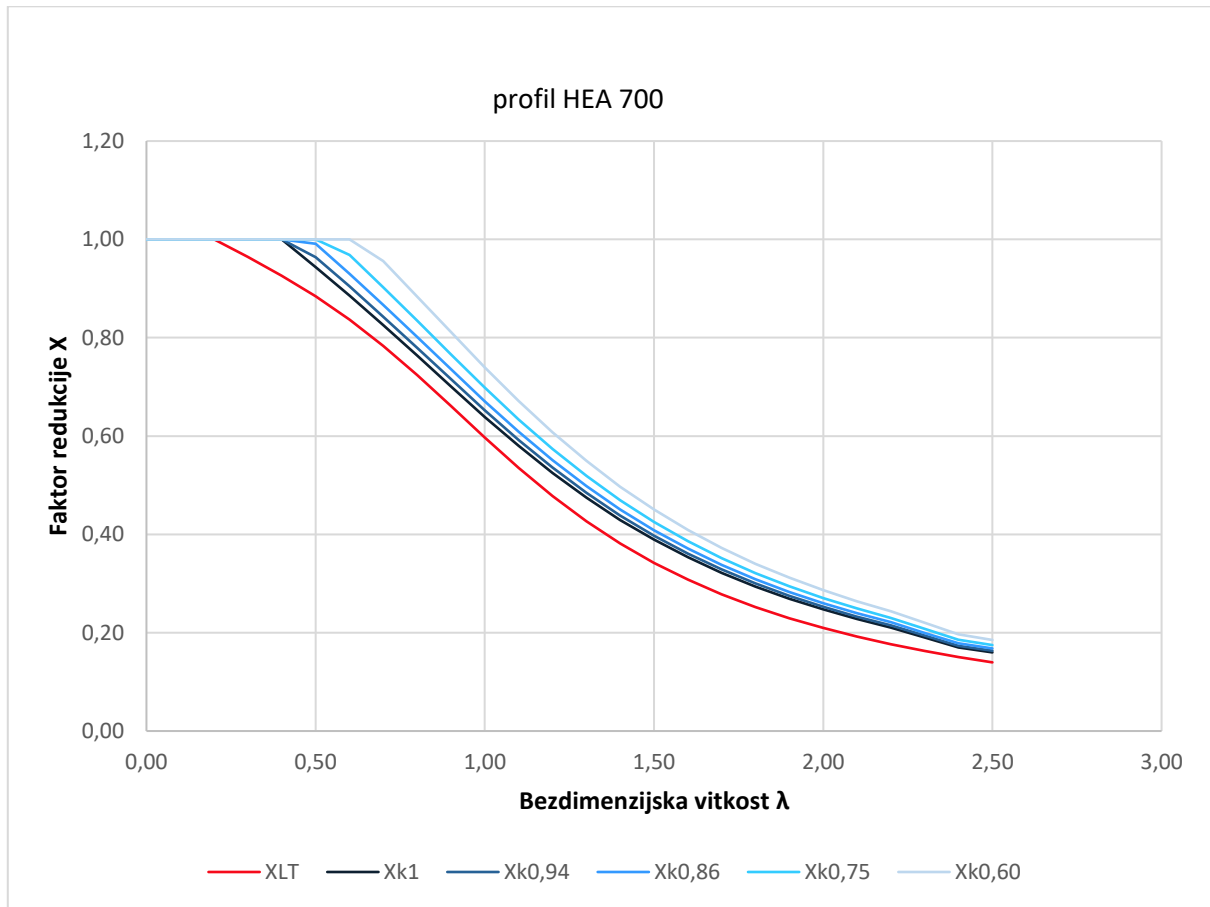
Na slici 16 prikazan je dijagram općeg i modifikacijskog načina za profil HEA 280 (270/280) dobiven pomoću rezultata iz tablice 6.



**Slika 16.:** Dijagram za profil HEA 280 prema normi HRN EN 1993-1-1: 2008.

Pomoću dijagrama na slici 16, kao i prema vrijednostima faktora redukcije u ovisnosti o bezdimenzijskoj vitkosti prikazanih u tablici 6, vidljivo je da je opći slučaj nepovoljniji u odnosu na modificirani, jer se događaju veće redukcije nego kod modificiranog načina. Dakle za istu vrijednost bezdimenzijske vitkosti, faktor redukcije ima manju vrijednost kod općeg slučaja.

Na slici 17 prikazan je dijagram općeg i modifikacijskog načina za profil HEA 700 (690/300) dobiven pomoću rezultata iz tablice 7.



**Slika 17.:** Dijagram za profil HEA 700 prema normi HRN EN 1993-1-1: 2008.

Kao što je već navedeno za dijagram profila HEA 280, isto vrijedi i ovdje. Tablica 7 i dijagram na slici 17 prikazuju kako su rezultati za opći način proračuna nepovoljniji u odnosu na modificirani način.

## 6. OTPORNOST POPREČNIH PRESJEKA ČELIČNIH ELEMENATA PREMA NORMI HRN EN 1993-1-1:2022.

### 6.1. Klasifikacija poprečnog presjeka

Iako je pri klasifikaciji pojasnice poprečnog presjeka sve ostalo isto, važno je kazati da su se pri klasifikaciji hrpta dogodile neke promjene prema normi HRN EN 1993-1-1:2022. u odnosu na starije izdanje, tj. normu HRN EN 1993-1-1:2008. Navedene promjene prikazane su u tablicama u nastavku i bit će označene drugim bojama (tablica 8 i tablica 9).

**Tablica 8.:** Klasifikacija hrpta prema normi HRN EN 1993-1-1:2008. [4]

KLASIFIKACIJA HRPTA HRN EN 1993-1-1: 2008.			
RAZRED	DIO IZLOŽEN SAVIJANJU	DIO IZLOŽEN TLAKU	DIO IZLOŽEN SAVIJANJU I TLAKU
1.	$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$	Kada je $a > 0,5$ : $\frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13a-1}$ Kada je $a \leq 0,5$ : $\frac{c}{t} \leq \frac{36\varepsilon}{a}$
2.	$\frac{c}{t} \leq 83\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 38\varepsilon$	Kada je $a > 0,5$ : $\frac{c}{t} \leq \frac{456\varepsilon}{13a-1}$ Kada je $a \leq 0,5$ : $\frac{c}{t} \leq \frac{41,5\varepsilon}{a}$
3.	$\frac{c}{t} \leq 124\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 42\varepsilon$	Kada je $\psi > -1$ : $\frac{c}{t} \leq \frac{42\varepsilon}{0,67+0,33\psi}$ Kada je $\psi \leq -1$ : $\frac{c}{t} \leq 62\varepsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$

**Tablica 9.:** Klasifikacija hrpta prema normi HRN EN 1993-1-1:2022. [7]

KLASIFIKACIJA HRPTA EN 1993-1-1: 2022.			
RAZRED	DIO IZLOŽEN SAVIJANJU	DIO IZLOŽEN TLAKU	DIO IZLOŽEN SAVIJANJU I TLAKU
1.	$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 28\varepsilon$	Kada je $a > 0,5$ : $\frac{c}{t} \leq \frac{126\varepsilon}{5,5a-1}$ Kada je $a \leq 0,5$ : $\frac{c}{t} \leq \frac{36\varepsilon}{a}$
2.	$\frac{c}{t} \leq 83\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 34\varepsilon$	Kada je $a > 0,5$ : $\frac{c}{t} \leq \frac{188\varepsilon}{6,53a-1}$ Kada je $a \leq 0,5$ : $\frac{c}{t} \leq \frac{41,5\varepsilon}{a}$
3.	$\frac{c}{t} \leq 121\varepsilon$	$\frac{c}{t} \leq 38\varepsilon$	Kada je $\psi > -1$ : $\frac{c}{t} \leq \frac{38\varepsilon}{0,608+0,343\psi+0,049\psi^2}$ Kada je $\psi \leq -1$ : $\frac{c}{t} \leq 60,5\varepsilon(1 - \psi)$

Obzirom na vidljive promjene u tablicama za klasifikaciju hrpta (prema savijanju u trećem razredu, prema tlaku te istodobno savijanju i tlaku u svim razredima), **za gore korištene primjere HEA profila (HEA 280 i HEA 700, S235) jasno je da će klasifikacija prema normi HRN EN 1993-1-1:2022. ostati ista kao i prema normi HRN EN 1993-1-1:2008. jer poprečni presjeci tih profila pripadaju prvom razredu, a provodila se klasifikacija hrpta na savijanje gdje je do promjene došlo samo u trećem razredu.** Da se kojim slučajem radila klasifikacija hrpta prema tlaku, zasigurno bi došlo do promjene klasifikacije cjelokupnog presjeka.

Dakle, i prema normi HRN EN 1993-1-1: 2022. slijedi da:

Poprečni presjek profila **HEA 280** pripada 1. klasi

Poprečni presjek profila **HEA 700** također pripada 1. klasi



## 6.2. Otpornost elementa na savijanje

### - OPĆI POSTUPAK

Kada je u pitanju opći postupak prema navedenoj normi, prvo se odredi krivulja izvijanja ( $\alpha_{LT}$ ) prema tablicama 1. i 2. na osnovu poprečnog presjeka, odnosno odnosa  $h/b$ .

U ovom slučaju za odnos  $h/b \leq 2$  (**HEA 280** (270/280)), krivulja izvijanja je a (0,21), a za odnos  $h/b \geq 2$  (**HEA 700** (690/300)), krivulja izvijanja je b (0,34). Zatim se pomoću zadanih formula koje su već navedene u poglavlju 2.2. odredi vrijednost bezdimenzijske vitkosti ( $\lambda_{LT}$ ) i faktora imperfekcije ( $\chi$ ), (s tim da je za ovu analizu, bezdimenzijska vitkost uzeta kao varijabla s rasponom vrijednosti  $0 \leq \lambda_{LT} \leq 2,5$  pa su se pomoću nje dobile i sve ostale vrijednosti). **Dakle, jasan je zaključak da je opći postupak isti kod normi HRN EN 1993-1-1:2008. i HRN EN 1993-1-1:2022 pa i rezultati koji su već dobiveni u prethodnoj normi vrijede i sad.**

Vrijednosti koje smo dobili za faktor redukcije koristeći opći postupak u tablicama su označene s  $X_{LT}$ .

### - MODIFICIRANI POSTUPAK

**Kod modificiranog postupka ipak ima razlike.** Tu se vrijednost krivulje izvijanja ( $\alpha_{LT}$ ) također uzima iz određenih tablica koje ovise o odnosu  $h/b$  te o veličini  $t_f$ . **Za iste primjere HEA profila, krivulje izvijanja u modificiranom postupku biraju se na sljedeći način:**

- Ako je  $h/b \leq 1,2$  i  $t_f \leq 40\text{mm}$  kao u slučaju **HEA 280**, krivulja izvijanja  $\alpha_{LT}$  određuje se prema formuli  $0,12 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ , ali  $\alpha_{LT} \leq 0,34$
- Ako je  $h/b \geq 1,2$  kao u slučaju **HEA 700**, krivulja izvijanja  $\alpha_{LT}$  određuje se prema formuli  $0,16 \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{el,z}}}$ , ali  $\alpha_{LT} \leq 0,49$

Za profil **HEA 280** (270/280) sada je prema prethodno navedenim formulama izračunato da je  $\alpha_{LT} = 0,21$  i vrijedi uvjet  $\alpha_{LT} \leq 0,34$ , dok je za profil **HEA 700** (690/300) izračunata vrijednost  $\alpha_{LT} = 0,44$  i vrijedi uvjet  $\alpha_{LT} \leq 0,49$ . Bezdimenzijska vitkost ( $\lambda_{LT}$ ) zadana je u istom intervalu, tj.  $0 \leq \lambda_{LT} \leq 2,5$ , a ostale vrijednosti dobivene su iz zadanih formula za modificirani postupak.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + f_m \left( \frac{\bar{\lambda}_{LT}}{\bar{\lambda}_z} \right) \cdot \left( \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \right]$$

$$X = \frac{f_m}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - f_m \cdot \lambda^2}}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{Cr,z}}} - \text{Bezdimenzijska vitkost oko slabije osi z}$$

Za ovu je analizu uzeto da je vrijednost  $\bar{\lambda}_z = 0,4$

**Unutar ove metode pojavljuje se dodatni faktor  $f_m$  koji se rabi za modifikaciju  $X_{LT}$  s ciljem da se dobije povećana otpornost element, ali se računa na drugačiji način nego u starijem izdanju norme, što je i prikazano u nastavku.**

Faktor  $f_m$  izveden je na temelju numeričkih istraživanja i ovisan je o obliku dijagrama savijanja između bočnih pridržanja, tj ovisan je o koeficijentu  $k_c$ . U normi EN 1993-1-1: 2022. sadržana je tablica prema kojoj se u ovisnosti o obliku dijagrama, odnosno o koeficijentu  $k_c$  neposredno odredi faktor  $k_c$ . Unutar ove analize promatrala se modifikacija faktora redukcije ( $X_{LT}$ ) u ovisnosti o pet različitih vrijednosti koeficijenta  $k_c$  i pripadajućih koeficijenata  $f_m$ . **Izgled momentnih dijagrama za ove vrijednosti koeficijenata  $k_c$  isti je kao i za prethodnu normu. (slike 11., 12., 13., 14., 15.)**

$$k_{c1} = 1, f_{m1} = 1$$

$$k_{c2} = 0,94, f_{m1} = 1,05$$

$$k_{c3} = 0,86, f_{m1} = 1,10$$

$$k_{c4} = 0,75 \text{ (kada je } \psi = 0), f_{m4} = 1,25$$

$$k_{c5} = 0,60 \text{ (kada je } \psi = 1), f_{m5} = 1,20$$

Važno je naglasiti da su vrijednosti za  $k_{c1}, k_{c2}, k_{c3}$  propisane unaprijed, a vrijednosti kada je

$\psi = 0$  ili  $\psi = 1$  dobiju se uvrštavanjem u sljedeću formulu;

$$f_m = 1,25 \cdot 0,1 \psi - 0,15 \psi^2, \text{ za } -1 \leq \psi \leq 1.$$

Modifikacija faktora redukcije prema zadanim koeficijentima  $k_c$ , u tablici je označena kao:  $X_{k1}, X_{k0,94}, X_{k0,86}, X_{k0,75}, X_{k0,60}$ .

## 7. PARAMETARSKA ANALIZA OTPORNOSTI ELEMENTA NA SAVIJANJE PREMA NORMI HRN EN 1993-1-1:2022.

Na navedenim primjerima HEA profila predočit će se pomoću parametarskih analiza ovisnost bezdimenzijske vitkosti i faktora redukcije prema općem i modificiranom postupku bočno-torzijskog izvijanja prema normi HRN EN 1993-1-1:2022.

### 7.1. Primjer proračuna otpornosti elementa na savijanje

Prema navedenom postupku u prethodnom poglavlju (6.2.), u sljedećim tablicama dobivene su vrijednosti koje su onda prikazane u obliku krivulje ovisnosti faktora redukcije i bezdimenzijske vitkosti, a prikazat će se postupak za jedan primjer općeg i jedan primjer modificiranog proračuna:

- Opći postupak:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 1$$

$$\alpha_{LT} = a = 0,21 \text{ ( za } h/b \leq 2 \text{)}$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 [1 + 0,21(1 - 0,2) + 1^2] = 1,08$$

$$X_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{1,08 + \sqrt{1,08^2 - 1^2}} = 0,67$$

- Modificirani postupak:

$$\bar{\lambda}_{LT} = 1$$

$$k_c = 1 \quad f_m = 1$$

$$\alpha_{LT} = 0,21 \text{ ( za } h/b \leq 2 \text{)}$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[ 1 + f_m \left( \frac{\bar{\lambda}_{LT}}{\bar{\lambda}_z} \right) \cdot (\alpha_{LT} (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2) \right] = 1,13$$

$$X_{LT} = \frac{f_m}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - f_m \cdot \lambda^2}}, \quad X_{LT} = \frac{1}{1,13 + \sqrt{1,13^2 - 1 \cdot 1^2}} = 0,6$$

## 7.2. Parametri bočno-torzijskog izvijanja za slučaj $h/b \leq 1,2$ ( HEA 280)

Tablica 10.: Tablica vrijednosti parametara za profil HEA 280 prema normi HRN EN 1993-1-1:2022.

2,50	3,87	0,15	4,45	0,12	1,00	0,12	4,45	0,13	1,05	0,13	4,45	0,14	1,10	0,14	1,25	0,16	4,45	0,15	1,20	0,15		
2,40	3,61	0,16	4,14	0,13	1,00	0,13	4,14	0,14	1,05	0,14	4,14	0,15	1,10	0,15	1,25	0,17	4,14	0,16	1,20	0,16		
2,30	3,37	0,17	3,84	0,14	1,00	0,14	3,84	0,15	1,05	0,15	3,84	0,16	1,10	0,16	1,25	0,19	3,84	0,18	1,20	0,18		
2,20	3,13	0,19	3,56	0,16	1,00	0,16	3,56	0,17	1,05	0,17	3,56	0,18	1,10	0,18	1,25	0,20	3,56	0,19	1,20	0,19		
2,10	2,90	0,20	3,28	0,17	1,00	0,17	3,28	0,18	1,05	0,18	3,28	0,19	1,10	0,19	1,25	0,22	3,28	0,21	1,20	0,21		
2,00	2,69	0,22	3,03	0,19	1,00	0,19	3,03	0,20	1,05	0,20	3,03	0,21	1,10	0,21	1,25	0,25	3,03	0,23	1,20	0,23		
1,90	2,48	0,24	2,78	0,21	1,00	0,21	2,78	0,22	1,05	0,22	2,78	0,23	1,10	0,23	1,25	0,27	2,78	0,26	1,20	0,26		
1,80	2,29	0,27	2,55	0,23	1,00	0,23	2,55	0,24	1,05	0,24	2,55	0,26	1,10	0,26	1,25	0,30	2,55	0,29	1,20	0,29		
1,70	2,10	0,30	2,32	0,26	1,00	0,26	2,32	0,27	1,05	0,27	2,32	0,29	1,10	0,29	1,25	0,34	2,32	0,32	1,20	0,32		
1,60	1,93	0,33	2,12	0,29	1,00	0,29	2,12	0,30	1,05	0,30	2,12	0,32	1,10	0,32	1,25	0,39	2,12	0,36	1,20	0,36		
1,50	1,76	0,37	1,92	0,32	1,00	0,32	1,92	0,34	1,05	0,34	1,92	0,36	1,10	0,36	1,25	0,44	1,92	0,41	1,20	0,41		
1,40	1,61	0,42	1,74	0,36	1,00	0,36	1,74	0,39	1,05	0,39	1,74	0,41	1,10	0,41	1,25	0,50	1,74	0,47	1,20	0,47		
1,30	1,46	0,47	1,57	0,41	1,00	0,41	1,57	0,44	1,05	0,44	1,57	0,47	1,10	0,47	1,25	0,58	1,57	0,54	1,20	0,54		
1,20	1,33	0,53	1,41	0,47	1,00	0,47	1,41	0,50	1,05	0,50	1,41	0,54	1,10	0,54	1,25	0,68	1,41	0,63	1,20	0,63		
1,10	1,20	0,60	1,26	0,53	1,00	0,53	1,26	0,57	1,05	0,57	1,26	0,62	1,10	0,62	1,25	0,80	1,26	0,73	1,20	0,73		
1,00	1,08	0,67	1,13	0,60	1,00	0,60	1,13	0,65	1,05	0,65	1,13	0,71	1,10	0,71	1,25	0,96	1,13	0,85	1,20	0,85		
0,90	0,98	0,73	1,01	0,68	1,00	0,68	1,01	0,74	1,05	0,74	1,01	0,80	1,10	0,80	1,25	1,00	1,01	0,97	1,20	0,97		
0,80	0,88	0,80	0,90	0,75	1,00	0,75	0,90	0,82	1,05	0,82	0,90	0,89	1,10	0,89	1,25	1,00	0,90	1,00	1,20	1,00		
0,70	0,80	0,85	0,81	0,82	1,00	0,82	0,81	0,89	1,05	0,89	0,81	0,96	1,10	0,96	1,25	1,00	0,81	1,00	1,20	1,00		
0,60	0,72	0,89	0,73	0,88	1,00	0,88	0,73	0,94	1,05	0,94	0,73	1,00	1,10	1,00	1,25	1,00	0,73	1,00	1,20	1,00		
0,50	0,66	0,92	0,66	0,92	1,00	0,92	0,66	0,98	1,05	0,98	0,66	1,00	1,10	1,00	1,25	1,00	0,66	1,00	1,20	1,00		
0,40	0,60	0,95	0,60	0,95	1,00	0,95	0,60	0,95	1,05	1,00	0,60	1,00	1,10	1,00	1,25	1,00	0,60	1,00	1,20	1,00		
0,30	0,56	0,98	0,56	0,97	1,00	0,97	0,56	1,00	1,05	1,00	0,56	1,00	1,10	1,00	1,25	1,00	0,56	1,00	1,20	1,00		
0,20	0,52	1,00	0,53	0,99	1,00	0,99	0,53	1,00	1,05	1,00	0,53	1,00	1,10	1,00	1,25	1,00	0,53	1,00	1,20	1,00		
0,10	0,49	1,00	0,51	1,00	1,00	1,00	0,51	1,00	1,05	1,00	0,51	1,00	1,10	1,00	1,25	1,00	0,51	1,00	1,20	1,00		
0,00	0,48	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	0,50	1,00	1,05	1,00	0,50	1,00	1,10	1,00	1,25	1,00	0,50	1,00	1,20	1,00		
Alt	$\phi_{LT}$	X <sub>LT</sub>	$\phi_1$	X <sub>1</sub>	$f_{m=1, k=1}$	X <sub>k1</sub>	$\phi_2$	X <sub>12</sub>	$f_{m=1,05 k=0,94}$	X <sub>k0,94</sub>	$\phi_3$	X <sub>k3</sub>	$f_{m=1,10 k=0,86}$	X <sub>k0,86</sub>	$\phi_4$	X <sub>14</sub>	$f_{m=1,25 k=0,75}$	X <sub>k0,75</sub>	$\phi_5$	X <sub>15</sub>	$f_{m=1,20 k=0,60}$	X <sub>k0,60</sub>

### 7.3. Parametri bočno-torzijskog izvijanja za slučaj $h/b \geq 1,2$ (HEA 700)

Tablica 11.: Tablica vrijednosti parametara za profil HEA 700 prema normi HRN EN 1993-1-1:2022.

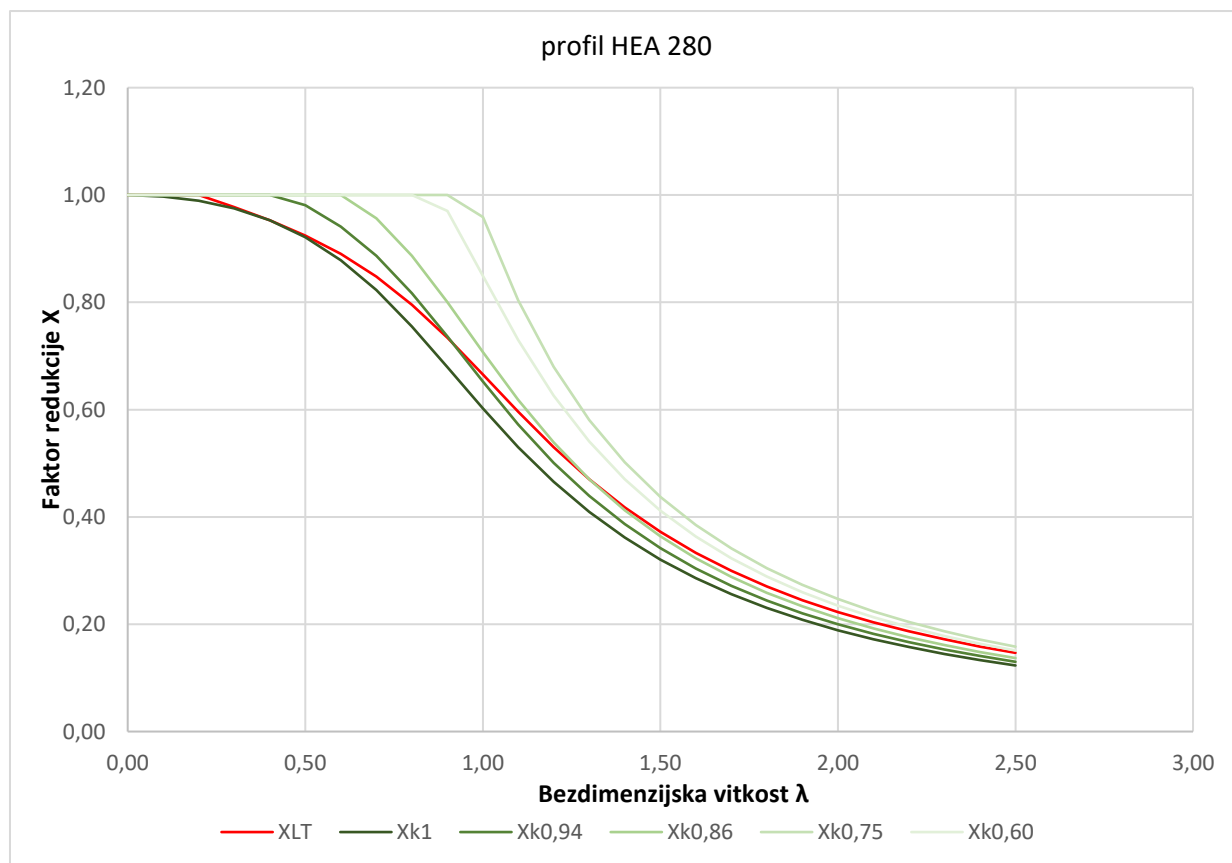
2,50	4,02	0,14	5,34	0,10	1,00	0,10	5,34	0,10	1,05	0,10	5,34	0,11	1,10	0,11	5,34	0,13	1,25	0,13	5,34	0,12	1,20	0,12
2,40	3,75	0,15	4,96	0,11	1,00	0,11	4,96	0,11	1,05	0,11	4,96	0,12	1,10	0,12	4,96	0,14	1,25	0,14	4,96	0,13	1,20	0,13
2,30	3,50	0,16	4,60	0,12	1,00	0,12	4,60	0,12	1,05	0,12	4,60	0,13	1,10	0,13	4,60	0,15	1,25	0,15	4,60	0,14	1,20	0,14
2,20	3,26	0,18	4,25	0,13	1,00	0,13	4,25	0,13	1,05	0,13	4,25	0,14	1,10	0,14	4,25	0,16	1,25	0,16	4,25	0,15	1,20	0,15
2,10	3,03	0,19	3,92	0,14	1,00	0,14	3,92	0,14	1,05	0,14	3,92	0,15	1,10	0,15	3,92	0,18	1,25	0,18	3,92	0,17	1,20	0,17
2,00	2,81	0,21	3,60	0,15	1,00	0,15	3,60	0,15	1,05	0,15	3,60	0,16	1,10	0,16	3,60	0,17	1,25	0,19	3,60	0,19	1,20	0,19
1,90	2,59	0,23	3,30	0,17	1,00	0,17	3,30	0,18	1,05	0,18	3,30	0,19	1,10	0,19	3,30	0,21	1,25	0,21	3,30	0,20	1,20	0,20
1,80	2,39	0,25	3,01	0,18	1,00	0,18	3,01	0,19	1,05	0,19	3,01	0,21	1,10	0,21	3,01	0,24	1,25	0,24	3,01	0,23	1,20	0,23
1,70	2,20	0,28	2,74	0,20	1,00	0,20	2,74	0,22	1,05	0,22	2,74	0,23	1,10	0,23	2,74	0,27	1,25	0,27	2,74	0,25	1,20	0,25
1,60	2,02	0,31	2,48	0,23	1,00	0,23	2,48	0,24	1,05	0,24	2,48	0,25	1,10	0,25	2,48	0,30	1,25	0,30	2,48	0,28	1,20	0,28
1,50	1,85	0,34	2,24	0,26	1,00	0,26	2,24	0,27	1,05	0,27	2,24	0,29	1,10	0,29	2,24	0,33	1,25	0,33	2,24	0,32	1,20	0,32
1,40	1,68	0,38	2,02	0,29	1,00	0,29	2,02	0,31	1,05	0,31	2,02	0,32	1,10	0,32	2,02	0,38	1,25	0,38	2,02	0,36	1,20	0,36
1,30	1,53	0,43	1,81	0,33	1,00	0,33	1,81	0,35	1,05	0,35	1,81	0,37	1,10	0,37	1,81	0,43	1,25	0,43	1,81	0,41	1,20	0,41
1,20	1,39	0,48	1,62	0,37	1,00	0,37	1,62	0,39	1,05	0,39	1,62	0,42	1,10	0,42	1,62	0,50	1,25	0,50	1,62	0,47	1,20	0,47
1,10	1,26	0,54	1,44	0,42	1,00	0,42	1,44	0,45	1,05	0,45	1,44	0,48	1,10	0,48	1,44	0,57	1,25	0,57	1,44	0,54	1,20	0,54
1,00	1,14	0,60	1,28	0,48	1,00	0,48	1,28	0,52	1,05	0,52	1,28	0,55	1,10	0,55	1,28	0,66	1,25	0,66	1,28	0,62	1,20	0,62
0,90	1,02	0,66	1,13	0,55	1,00	0,55	1,13	0,59	1,05	0,59	1,13	0,63	1,10	0,63	1,13	0,76	1,25	0,76	1,13	0,72	1,20	0,72
0,80	0,92	0,72	1,00	0,63	1,00	0,63	1,00	0,67	1,05	0,67	1,00	0,72	1,10	0,72	1,00	0,87	1,25	0,87	1,00	0,82	1,20	0,82
0,70	0,83	0,78	0,88	0,71	1,00	0,71	0,88	0,76	1,05	0,76	0,88	0,81	1,10	0,81	0,88	0,98	1,25	0,98	0,88	0,92	1,20	0,92
0,60	0,75	0,84	0,78	0,78	1,00	0,78	0,78	0,84	1,05	0,84	0,78	0,89	1,10	0,89	0,78	1,00	1,25	1,00	0,78	1,00	1,20	1,00
0,50	0,68	0,88	0,69	0,85	1,00	0,85	0,69	0,90	1,05	0,90	0,69	0,96	1,10	0,96	0,69	1,00	1,25	1,00	0,69	1,00	1,20	1,00
0,40	0,61	0,93	0,62	0,91	1,00	0,91	0,62	0,96	1,05	0,96	0,62	1,00	1,10	1,00	0,62	1,00	1,25	1,00	0,62	1,00	1,20	1,00
0,30	0,56	0,96	0,57	0,95	1,00	0,95	0,57	1,00	1,05	1,00	0,57	1,00	1,10	1,00	0,57	1,00	1,25	1,00	0,57	1,00	1,20	1,00
0,20	0,52	1,00	0,53	0,98	1,00	0,98	0,53	1,00	1,05	1,00	0,53	1,00	1,10	1,00	0,53	1,00	1,25	1,00	0,53	1,00	1,20	1,00
0,10	0,49	1,00	0,51	0,99	1,00	0,99	0,51	1,00	1,05	1,00	0,51	1,00	1,10	1,00	0,51	1,00	1,25	1,00	0,51	1,00	1,20	1,00
0,00	0,47	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	0,50	1,00	1,05	1,00	0,50	1,00	1,10	1,00	0,50	1,00	1,25	1,00	0,50	1,00	1,20	1,00
h/t	$\phi_{LT}$	$\chi_{LT}$	$\phi_1$	$\chi_{t1}$	$f_{m=1, k=1}$	$\chi_{k1}$	$\phi_2$	$\chi_{t2}$	$f_{m=1,05, k=0,94}$	$\chi_{k0,94}$	$\phi_3$	$\chi_{t3}$	$f_{m=1,10, k=0,86}$	$\chi_{k0,86}$	$\phi_4$	$\chi_{t4}$	$f_{m=1,25, k=0,75}$	$\chi_{k0,75}$	$\phi_5$	$\chi_{t5}$	$f_{m=1,20, k=0,60}$	$\chi_{k0,60}$

#### 7.4. Usporedba rezultata za opći i modificirani postupak proračuna

Prema vrijednostima faktora redukcije u ovisnosti o bezdimenzijskom koeficijentu izračunatih u tablicama 10 i 11, kao i slikovitom prikazu istih na dijagramima za profile HEA 280 i HEA 700, moguće je iščitati da u ovom slučaju opći način proračuna za određene vitkosti  $\lambda_{LT}$  ipak daje povoljnije rezultate od modificiranog načina proračuna.

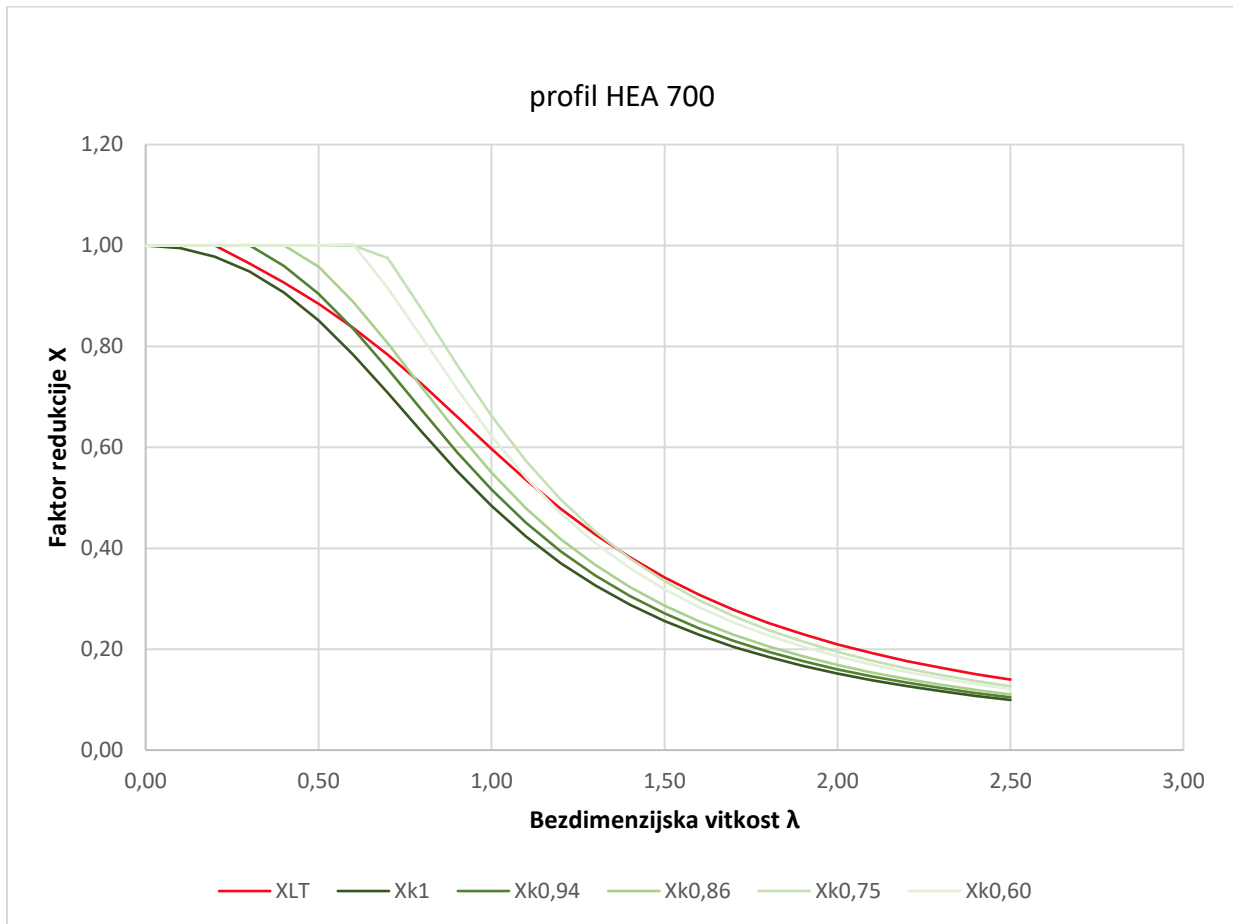
Za usporedbu se mogu uzeti vrijednosti kada je uzeto da je vrijednost faktora  $f_{m1} = 1,20$ , tj.  $k_{c1} = 0,60$ , gdje je vidljivo da su sve vrijednosti faktora redukcije prema modificiranom proračunu veće od pripadajućih vrijednosti faktora redukcije u općem proračunu, dok je primjerice faktor redukcije  $X_{k0,86}$  koji je dobiven modificiranim proračunom manji od redukcijuskog faktora  $X_{LT}$  dobivenog općim proračunom za istu vrijednost bezdimenzijske vitkosti  $\lambda_{LT} = 1,40$ .

Na slici 18 prikazan je dijagram općeg i modifikacijskog načina za profil HEA 280 (270/280) dobiven pomoću rezultata iz tablice 10.



Slika 18.: Dijagram za profil HEA 280 prema normi EN 1993-1-1:2022.

Na slici 19 prikazan je dijagram općeg i modifikacijskog načina za profil **HEA 700(690/300)** dobiven pomoću rezultata iz tablice 11.



**Slika 19.:** Dijagram za profil HEA 700 prema normi EN 1993-1-1: 2022.

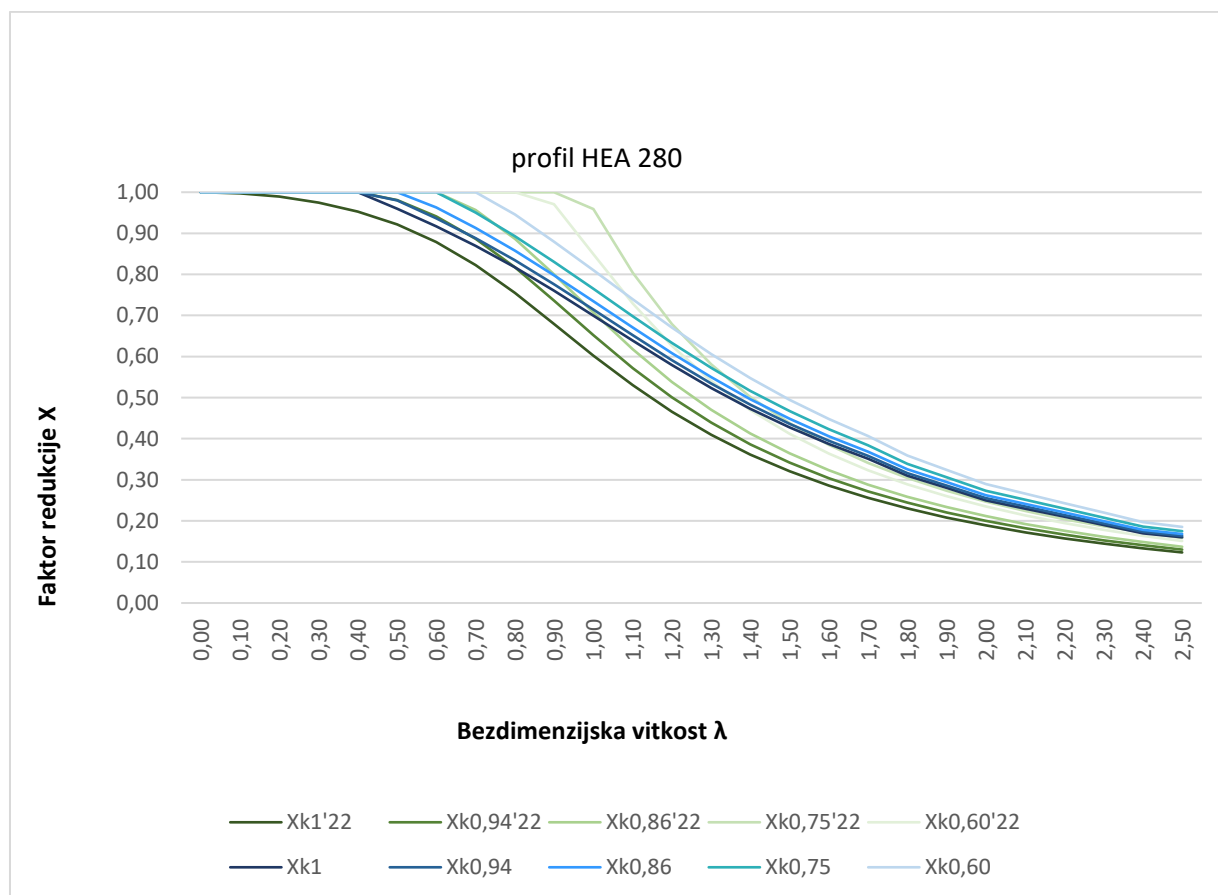
Za rezultate prikazane na dijagramu sa slike 19, odnosno za vrijednosti koje su dobivene za profil HEA 700, vrijedi ono što je kazano i za dijagram profila HEA 280; Za određene vrijednosti bezdimenzijske vitkosti opći način daje bolje rezultate od modificiranog načina.

## 8. USPOREDBA REZULTATA PRORAČUNA OTPORNOSTI ELEMENTA PREMA NORMI HRN EN 1993-1-1:2008. I NORMI HRN EN 1993-1-1: 2022.

Za opći postupak nije potrebno prikazivati dijagrame jer su vrijednosti iste za obje norme kao što je i vidljivo u gore navedenim rezultatima i vrijednostima u tablici.

### 8.1. Usporedba modificiranog postupka za HEA 280 (270/280)

Krivulje dobivene prema normi HRN EN 1993-1-1: 2008. imenovane su od  $X_{k1}$  -  $X_{k0,60}$  i označene plavom bojom, dok su krivulje dobivene prema normi EN 1993-1-1: 2022. imenovane od  $X_{k1'22}$  -  $X_{k0,60'22}$  i označene zelenom bojom.



Slika 20.:Usporedni dijagram modifikacijskog postupka za HEA 280

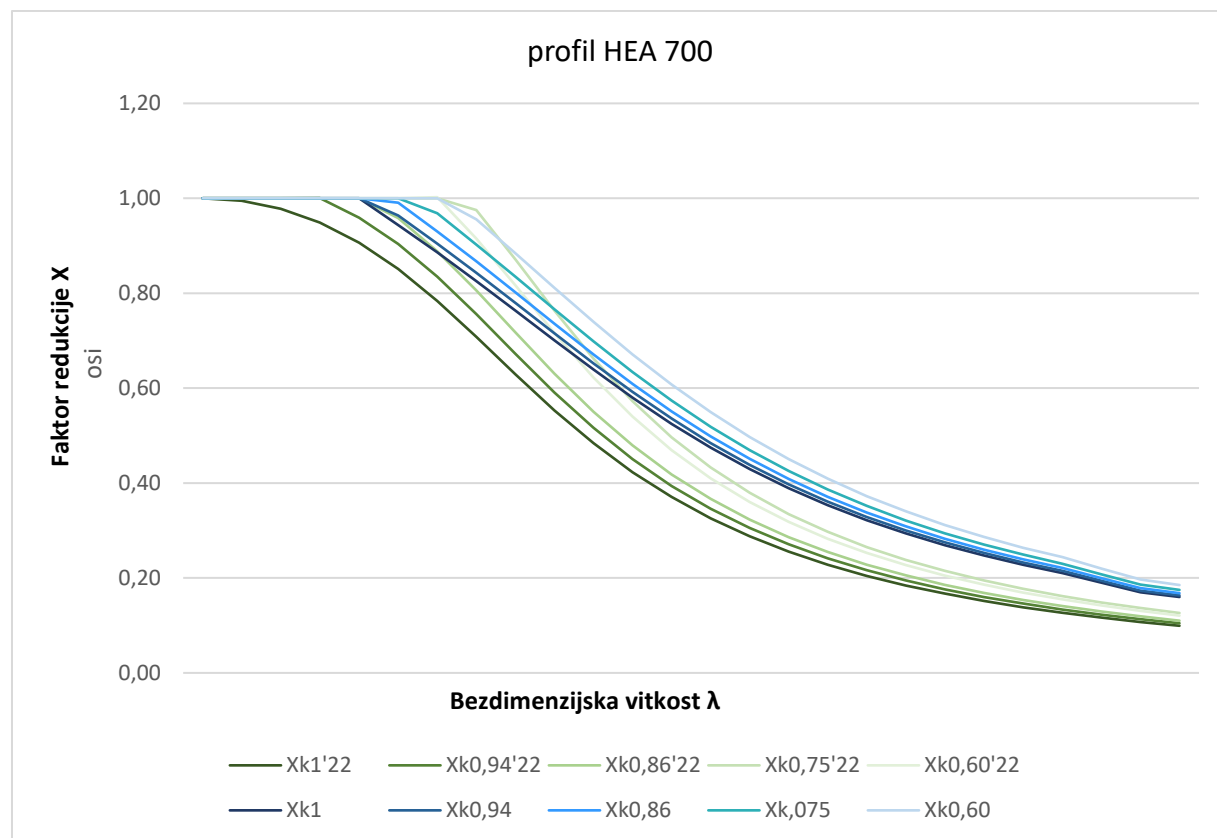
Na usporednom dijagramu modificiranog postupka za profil HEA 280, prikazanom na slici 20, očito je da su vrijednosti faktora redukcije  $X_{k1'22}$  (koje su dobivene, kako je i kazano prema normi HRN EN 1993-1-1: 2022.) manje od odgovarajućih vrijednosti faktora redukcije



$X_{k1}$  (dobivenih prema proračunu norme HRN EN 1993-1-1: 2008.). Nadalje, vrijednosti faktora redukcije  $X_{k0,94'22}$  imaju povoljnije vrijednosti od pripadajućih vrijednosti  $X_{k0,94}$  do otprilike vrijednosti bezdimenzijskog koeficijenta od  $\lambda_{LT} = 0,90$ . Nadalje, vrijednosti faktora  $X_{k0,86'22}$  su povoljnije od odgovarajućih vrijednosti  $X_{k0,86}$  do otprilike vrijednosti  $\lambda_{LT} = 1$ , vrijednosti  $X_{k0,75'22}$  su povoljnije od pripadajućih  $X_{k0,75}$  do otprilike  $\lambda_{LT} = 1,40$  i na kraju, vrijednosti faktora  $X_{k0,60'22}$  su povoljnije od pripadajućih  $X_{k0,60}$  do do otprilike  $\lambda_{LT} = 1,10$  nakon čega se u svim slučajevima događa obrat.

## 8.2. Usporedba modificiranog postupka za HEA 700 (690/300)

Krivulje dobivene prema normi HRN EN 1993-1-1: 2008. imenovane su od  $X_{k1}$  -  $X_{k0,60}$  i označene plavom bojom, dok su krivulje dobivene prema normi EN 1993-1-1: 2022. imenovane od  $X_{k1'22}$  -  $X_{k0,60'22}$  i označene zelenom bojom.



Slika 21.:Usporedni dijagram modifikacijskog postupka za HEA 700

Prema usporednom dijagramu modificiranog postupka za profil HEA 280, prikazanom na slici 20, očito je da su vrijednosti faktora redukcije  $X_{k1'22}$  (koje su dobivene, kako je i kazano prema normi HRN EN 1993-1-1: 2022.) manje od odgovarajućih vrijednosti faktora redukcije  $X_{k1}$  (dobivenih prema proračunu norme HRN EN 1993-1-1: 2008.). Nadalje, vrijednosti faktora

redukcije  $X_{k0,94'22}$  imaju povoljnije vrijednosti od pripadajućih vrijednosti  $X_{k0,94}$  do otprilike vrijednosti bezdimenzijskog koeficijenta od  $\lambda_{LT} = 0,40$ . Nadalje, vrijednosti faktora  $X_{k0,86'22}$  su povoljnije od odgovarajućih vrijednosti  $X_{k0,86}$  do otprilike vrijednosti  $\lambda_{LT} = 0,50$ , vrijednosti  $X_{k0,75'22}$  su povoljnije od pripadajućih  $X_{k0,75}$  do otprilike  $\lambda_{LT} = 0,90$  i na kraju, vrijednosti faktora  $X_{k0,60'22}$  su povoljnije od pripadajućih  $X_{k0,60}$  do do otprilike  $\lambda_{LT} = 0,70$  nakon čega se u svim slučajevima događa obrat.

## 9. ZAKLJUČAK

Dakle, kako bi razumjeli proračun otpornosti uopće, potrebno je primarno znati što je dokaz sigurnosti, tj. da proračunska akcija mora biti manja ili jednaka od proračunske otpornosti kako ne bi došlo do gubitka stabilnosti elementa. Prije nego što se provede proračun otpornosti nekog konstrukcijskog elementa, potrebno je provesti proračun otpornosti poprečnog presjeka, čemu prethodi klasifikacija presjeka. (Prema EC3 razlikuju se 4 klase; plastični, kompaktni, nekompaktni i vitki poprečni presjek).

Općenito jednoosno savijanje je savijanje elementa u samo jednoj glavnoj ravnini. Kod nosača savijanog oko njegove jače osi može se dogoditi otkazivanje naglim izbacivanjem oko slabije osi. Ovakav oblik izvijanja naziva se bočno torzijsko izvijanje. Obzirom da postupak dimenzioniranja elementa koji otkazuje bočno-torzijskim izvijanjem uzima u obzir brojne faktore (oblik poprečnog presjeka, tip opterećenja, postojanje pridržanja, početne nesavršenosti...), potrebno je najprije promotriti jednostavan model na osnovu kojeg se kasnije razvijaju sveopći slučajevi.

Kada se govori o bočno-torzijskom izvijanju, prema HRN EN 1993-1-1, kao i novijem, tj. trećem izdanju istoimene norme EN 1993-1-1:2022., razlikuju se četiri krivulje bočno torzijskog izvijanja odabrane na osnovu omjera visine i širine poprečnog presjeka, tipa poprečnog presjeka, te ovisno radi li se o valjanom ili zavarenom presjeku, a novo izdanje uzima u obzir i (a)simetričnost nosača. Krivulje su definirane za dva slučaja: opći i modificirani. Opći se slučaj može primijeniti na sve uobičajene tipove presjeka uključujući valjane presjeke, kao i za valjane presjeke koji su izvan standardnog područja, dok se modificirani slučaj koristi za valjane i ekvivalentne zavarene presjeke.

Pomoću rezultata koji su dobiveni kroz parametarsku analizu modificiranog i općeg načina, vidljive su razlike za staro i novo izdanje norme. Na temelju vrijednosti koje su dobivene koristeći normu HRN EN 1993-1-1:2008., jasno je da modificirani način uvijek daje povoljnije rezultate od općeg, jer pruža manje redukcije otpornosti, dok kod rezultata izvedenih prema normi HRN EN 1993-1-1:2022., to nije nužno slučaj. Naime, prema novoj verziji norme, pokazano je da je samo za određene vrijednosti bezdimenzijskog koeficijenta povoljniji modificirani način proračuna. Pri tome, načelno vrijedi slučaj da je u području manjih vitkosti povoljniji modificirani postupak proračuna, dok za veće vitkosti opći postupak proračuna daje manje redukcije otpornosti.

Unutar ovog poglavlja razmatraju se i elementi izloženi istodobnom djelovanju uzdužne tlačne sile i momenta savijanja. Moment savijanja može biti posljedica poprečnog opterećenja između krajeva nosača, poznatog ekscentričnog djelovanja uzdužne sile na jednom ili oba kraja štapa i/ili od elementa s kojim je spojen promatrani element unutar okvirnog sustava. Teži li

moment savijanja nuli, element postaje centrički opterećen štap, a teži li uzdužna sila nuli razmatra se nosač, koji u slučajevima kada nije bočno pridržan, ima problem bočnog izvijanja koji je obrađen već na početku.

## POPIS LITERATURE

- [1] Androić, B., Dujmović D., Džeba I.; Čelične konstrukcije 1, I.A. Projektiranje, Zagreb, 2009.
- [2] Androić, B., Dujmović D., Džeba I.; Metalne konstrukcije 1, IGH Zagreb, Zagreb, 1994.
- [3] <https://pdfcoffee.com/download/p5plasticnost-pdf-free.html>
- [4] CEN 2009.; Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija – Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade, 2008. (HRN EN 1993-1-1: 2008.)
- [5] Gardner L., Nethercot D.A., Gulvansessian H.; Designers' Guide to EN 1993-1-1 Eurocode 3: Design of Steel Structures: General Rules and Rules for Buildings, 2005.
- [6] Bureau A.; NCCI: Elastic critical moment for lateral torsional buckling, UK, 2005.
- [7] CEN 2022.; Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija – Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade, 2022. (HRN EN 1993-1-1: 2022.)

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1.:</b> Prikaz presjeka, elementa i sustava [1].....	3
<b>Slika 2.:</b> Konstrukcijska svojstva elementa i klase poprečnih presjeka elemenata čeličnih konstrukcija [2] .....	4
<b>Slika 3.:</b> Proračun reznih sila i klase poprečnog presjeka [2] .....	5
<b>Slika 4.:</b> Bočno izvijanje vitkog konzolnog nosača [3] .....	7
<b>Slika 5.:</b> Jednostavan model opterećenja nosača [2] .....	8
<b>Slika 6.:</b> Točka unosa poprečnog opterećenja [6] .....	13
<b>Slika 7.:</b> Prikaz elemenata izloženih istodobnom djelovanju uzdužne sile i momenta savijanja [1] .....	14
<b>Slika 8.:</b> Izvijanje savijanjem [2].....	14
<b>Slika 9.:</b> Bočno-torzijsko izvijanje [2] .....	15
<b>Slika 10.:</b> Elementi izloženi djelovanju uzdužne sile i momenta savijanja [1] .....	16
<b>Slika 11.:</b> Izgled momentnog dijagrama za vrijednost $kc1 = 1$ [3] .....	22
<b>Slika 12.:</b> Izgled momentnog dijagrama za vrijednost $kc2 = 0,94$ [3] .....	22
<b>Slika 13.:</b> Izgled momentnog dijagrama za vrijednost $kc3 = 0,86$ [3] .....	22
<b>Slika 14.:</b> Izgled momentnog dijagrama za vrijednost $kc4 = 0,75$ [3] .....	22
<b>Slika 15.:</b> Izgled momentnog dijagrama za vrijednost $kc5 = 0,60$ [3] .....	22
<b>Slika 16.:</b> Dijagram za profil HEA 280 prema normi HRN EN 1993-1-1: 2008. ....	26
<b>Slika 17.:</b> Dijagram za profil HEA 700 prema normi HRN EN 1993-1-1: 2008. ....	27
<b>Slika 18.:</b> Dijagram za profil HEA 280 prema normi EN 1993-1-1:2022. ....	35
<b>Slika 19.:</b> Dijagram za profil HEA 700 prema normi EN 1993-1-1: 2022. ....	36
<b>Slika 20.:</b> Usporedni dijagram modifikacijskog postupka za HEA 280.....	37
<b>Slika 21.:</b> Usporedni dijagram modifikacijskog postupka za HEA 700.....	38

**POPIS TABLICA**

<b>Tablica 1.:</b> Vrijednost krivulja izvijanja [4] .....	10
<b>Tablica 2.:</b> Odabir krivulja izvijanja prema presjeku za opći slučaj [4] .....	10
<b>Tablica 3.:</b> Vrijednosti i odabir krivulja izvijanja prema presjeku za modificirani slučaj [4] .....	11
<b>Tablica 4.:</b> Vrijednosti faktora $f$ u ovisnosti o koeficijentu $k_c$ . [3] .....	12
<b>Tablica 5.:</b> Vrijednost parametra $C_1$ za nosač izložen momentima savijanja na njegovim krajevima [6] .....	13
<b>Tablica 6.:</b> Tablica vrijednosti parametara za profil HEA 280 prema normi HRN EN 1993-1-1: 2008. ....	24
<b>Tablica 7.:</b> Tablica vrijednosti parametara za profil HEA 700 prema normi HRN EN 1993-1-1: 2008. ....	25
<b>Tablica 8.:</b> Klasifikacija hrpta prema normi HRN EN 1993-1-1:2008. [4] .....	28
<b>Tablica 9.:</b> Klasifikacija hrpta prema normi EN 1993-1-1:2022. [7] .....	29
<b>Tablica 10.:</b> Tablica vrijednosti parametara za profil HEA 280 prema normi EN 1993-1-1:2022. ....	33
<b>Tablica 11.:</b> Tablica vrijednosti parametara za profil HEA 700 prema normi EN 1993-1-1:2022. ....	34