

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Mislav Pedišić i Anđelo Valčić

**OPTIMIZACIJA SASTAVLJENIH HLADNO
OBLIKOVANIH KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA
IZLOŽENIH SAVIJANJU**

Zagreb, 2019.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Zagrebu, pod vodstvom doc. dr. sc. Ivana Lukačevića, dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./2019.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	i
1 UVOD.....	1
1.1 Općenito	1
1.2 Posebnosti hladno oblikovanih tankostijenih profila	3
1.3 Posebnosti kod dimenzioniranja	5
1.3.1 Koncept sudjelujuće širine	5
1.3.2 Načini otkazivanja.....	6
1.4 Načini spajanja tankostijenih elemenata	7
1.4.1 Mehanička spojna sredstva	8
1.4.2 Zavareni spojevi	9
1.5 Primjena tankostijenih elemenata	10
2 CILJ ISTRAŽIVANJA I HIPOTEZE	12
3 METODE ISTRAŽIVANJA	14
4 UVOD U PRORAČUN OTPORNOSTI NA SAVIJANJE.....	16
4.1 Uvod.....	16
4.2 Razredba poprečnog presjeka	16
4.3 Geometrijske karakteristike IPE profila.....	19
4.4 Geometrijske karakteristike HOP profila.....	22
4.4.1 Bruto presjek	22
4.4.2 Efektivni presjek	24
4.5 Dijagram toka za proračun otpornosti presjeka (IPE profil).....	26
4.6 Dijagram toka za proračun otpornosti presjeka (HOP profil).....	27
4.7 Dijagram toka za proračun otpornosti elementa (IPE I HOP profil)	30

5	PROCES OPTIMIZACIJE HLADNO OBLIKOVANOG TANKOSTIJENOG PROFILA.....	31
5.1	Uvod.....	31
5.2	Plan i dijagram toka optimizacije hladno oblikovanih tankostijenih profila	32
5.3	Geometrijska ograničenja za HOP presjek	34
5.4	Proizvoljna ograničenja za HOP profil (funkcionalna i estetska ograničenja)	36
5.4.1	Nagib vanjskog ukrućenja.....	36
5.4.2	Ukupna širina i visina poprečnog presjeka	39
5.5	Geometrijske karakteristike bruto presjeka.....	41
5.6	Proračun efektivnog presjeka.....	41
5.7	Odabrani optimizirani profili	42
6	OTPORNOST TOPLO VALJANOG PROFILA NA SAVIJANJE	45
6.1	Uvod.....	45
6.2	Proračun osnovnih parametara IPE profila	46
6.2.1	Visina poprečnog presjeka IPE profila	46
6.2.2	Površina poprečnog presjeka IPE profila.....	47
6.2.3	Moment površine 2. stupnja poprečnog presjeka IPE profila	50
6.2.4	Moment otpora poprečnog presjeka IPE profila	51
6.3	Razredba presjeka i otpornost poprečnog presjeka na savijanje.....	54
6.3.1	Razredba IPE presjeka	54
6.3.2	Otpornost presjeka IPE profila na savijanje.....	57
6.4	Otpornost elementa IPE profila na savijanje.....	59
6.4.1	Elastični kritični moment bočnog torzijskog izvijanja.....	59
6.4.2	Proračun faktora redukcije i dobivanje otpornosti elementa na savijanje.....	63
6.5	Kalibracija numeričkog modela	65
6.5.1	Uvod.....	65
6.5.2	Opis kalibracijskog modela.....	66

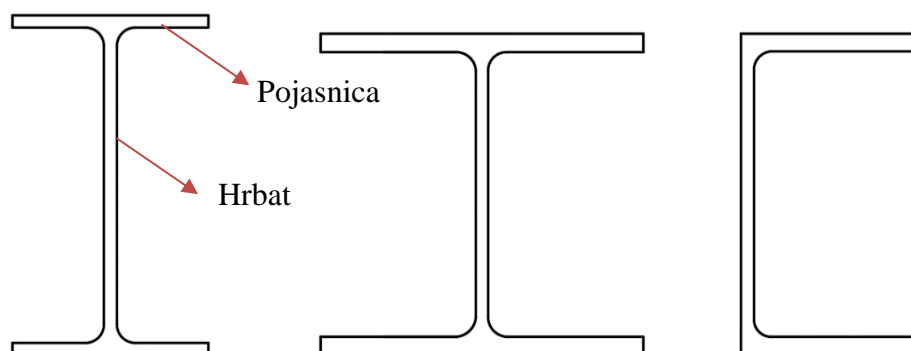
7	OTPORNOST HLADNO OBLIKOVANOG TANKOSTIJENOG PROFILA NA SAVIJANJE.....	72
7.1	Uvod.....	72
7.2	Proračun efektivnog presjeka.....	72
7.2.1	Osnovni podaci o profilu HOP 340.....	72
7.2.2	Provjere geometrijskih karakteristika	73
7.2.3	Korak 1.....	74
7.2.4	Korak 2.....	76
7.2.5	Korak 3.....	79
7.2.6	Efektivne geometrijske karakteristike.....	82
7.3	Otpornost presjeka na savijanje	84
7.4	Otpornost elementa na savijanje	85
7.5	Opis kalibracije numeričkog modela	88
8	SPAJANJE HLADNO OBLIKOVANOG PROFILA TOČKASTIM ZAVARIVANJEM.....	93
8.1	Uvodne napomene.....	93
8.2	Optimizirani raspored zavara – varijanta 1	93
8.3	Optimizirani raspored zavara – varijanta 2	95
8.4	Zaključne napomene	97
9	REZULTATI I RASPRAVA.....	98
9.1	Područje analize	98
9.2	Kalibracija profila IPE i HOP	99
9.3	Otpornost na savijanje HOP profila	100
9.4	Različiti načini povezivanja HOP profila	101
9.5	Otpornost na savijanje IPE i HOP profila.....	103
9.6	Utrošak materijala	105
10	ZAKLJUČAK.....	107
10.1	Neposredni zaključci.....	107

10.2	Preporuke za daljnja istraživanja	108
ZAHVALE	.....	109
POPIS LITERATURE	.....	110
POPIS SLIKA	.....	112
POPIS TABLICA	.....	115
SAŽETAK	.....	117
SUMMARY	.....	118

1 UVOD

1.1 Općenito

U današnje vrijeme, kada govorimo o projektiranju čeličnih konstrukcija, većina projekatana za glavne i sekundarne nosive elemente konstrukcije odabire standardizirane toplo valjane profile. Jedan od razloga jest što za takvu vrstu profila postoje detaljno razrađene tablice sa svim geometrijskim karakteristikama potrebnim za proračun i možemo reći da je korištenje ovih profila već postalo dio svakodnevnice. Obzirom na oblik poprečnog presjeka, obično ih dijelimo na I profile, H profile koji su dvoosno simetrični te jednoosno simetrične U profile, slika 1.1.



Slika 1.1. *Vruće valjani I profil, H profil i U profil*

Za neke zahtjevnije konstrukcije, primjerice mostove ili hale sa nosačima kranske staze, gdje su rasponi dovoljno veliki da toplo valjani standardni profili ne mogu osigurati potrebnu nosivost koriste se zavareni limeni nosači, slika 1.2. Prednost se očituje u tome što na temelju opterećenja koja djeluju na konstrukciju i zahtjeva za iskoristivost elemenata, projektant može sam konstruirati i optimizirati takav profil.

Svakim danom industrija čelika napreduje ovisno o novim znanstvenim spoznajama i izravno utječe na svjetsko gospodarstvo. Sukladno tome, razvili su se čelici vrlo visokih čvrstoća i granice popuštanja što za rezultat daje učinkovitije i ekonomičnije konstrukcije. Takvi visokočvrsti čelici koriste se i za hladno oblikovane tankostijene profile koji su predmet ovog rada i kod kojih granica popuštanja može dosezati vrijednosti od 550 MPa [2].

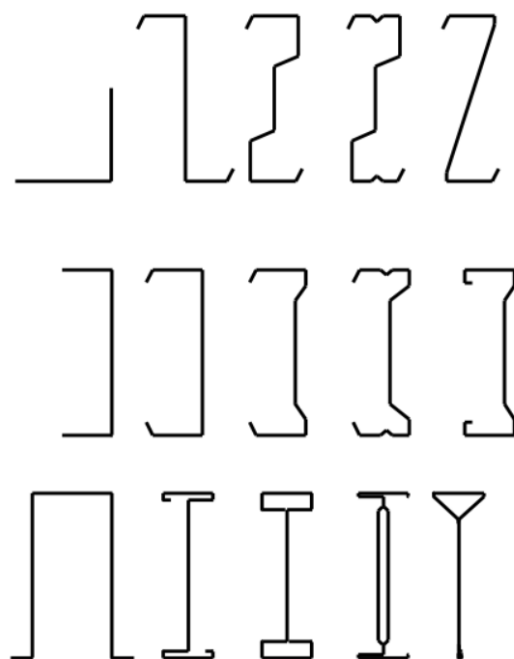


Slika 1.2. *Zavareni limeni nosači* [1]

Gledajući širu sliku projekta neke konstrukcije svakako možemo reći da su osim klasičnog projektiranja vrlo bitni parametri ekonomičnost i zaštita okoliša. S gledišta održive, odnosno "zelene" gradnje, hladno oblikovani profili izrađeni su od recikliranog čelika, što omogućuje ponovnu uporabu. U ekonomskom pogledu, velika je ušteda materijala u odnosu na prethodno spomenute toplo valjane profile i puno jednostavnija ugradnja te transport. Trend projektiranja sekundarnih elemenata izrađenih od hladno oblikovanih tankostijenih profila konstantno raste, a također se sve više primjenjuju na glavne nosive elemente [2].

Uz sve navedeno, možemo se zapitati zašto je i dalje dosta raširenija upotreba toplo valjanih profila u odnosu na hladno oblikovane, izuzevši činjenicu spomenutu prethodno da su za toplo valjane dane razrađene tablice. Naime, europske norme za projektiranje čeličnih konstrukcija [3]–[5] daju preporuke za proračun obje vrste profila. Međutim, proračun hladno oblikovanih tankostijenih elemenata je izrazito složen i potrebno je iznimno dobro poznavanje problematike kako bi se adekvatno izvršio proračun.

Osim uštede materijala te transporta i ugradnje, prednost nad toplo valjanim profilima je i velika mogućnost oblikovanja, kako je prikazano na slici 1.3., čime se arhitektima daje veća sloboda i kreativnost prilikom osmišljavanja idejnog oblika konstrukcije. U nastavku rada prikazat će se načini kako se relativno malom promjenom geometrije postiže veća otpornost na savijanje koja je u većini slučajeva mjerodavna.

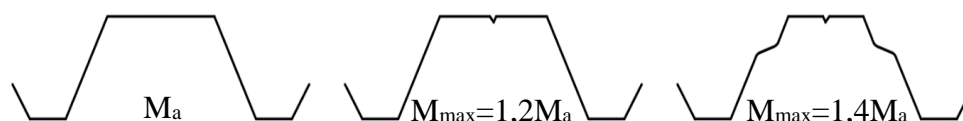


Slika 1.3. Široki spektar oblikovanja tankostijenih elemenata [6]

1.2 Posebnosti hladno oblikovanih tankostijenih profila

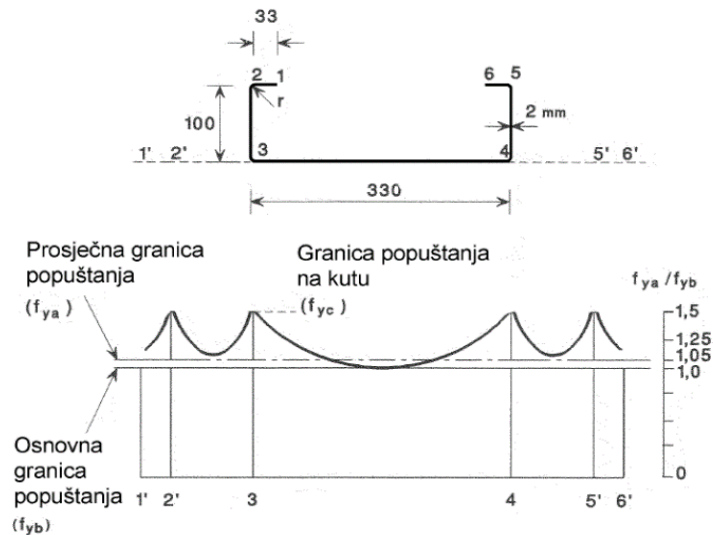
U stranoj stručnoj literaturi hladno oblikovani tankostijeni elementi često se nazivaju laganim trakastim profilima, (eng. *light gauge sections*). Naziv sam po sebi ima smisla jer je uobičajena debljina ovakvih elemenata manja od 3 mm [2]. Nedvojbeno, jedan od praktičnih razloga za upotrebu hladno oblikovanih elemenata je značajna otpornost na koroziju. To je rezultat poboljšanja postupka galvaniziranja te ostalih postupaka premazivanja [7].

Kao što je rečeno u prethodnoj točki, promjenom geometrije može se povećati otpornost presjeka. Na slici 1.4. prikazan je jedan takav primjer gdje se otpornost povećava bez dodatnog utroška materijala mijenjanjem oblika poprečnog presjeka odnosno dodavanjem ukrućenja [6]. Jako je bitno paziti na izvedbu ovakvih ukrućenja obzirom na smjer opterećenja jer isto kao što mogu ukrutiti presjek, tako ga mogu i oslabiti.



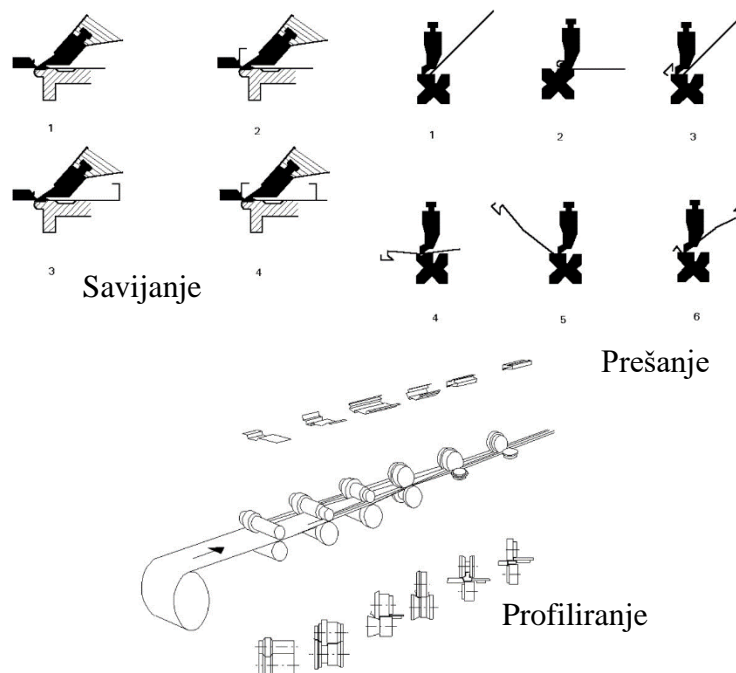
Slika 1.4. Povećanje nosivosti presjeka bez utroška materijala

Popratni učinci koji se javljaju kao posljedica hladnog oblikovanja u obliku strukturalnih nesavršenosti (povećanje granice popuštanja u zonama hladnog oblikovanja) također je jedna od posebnosti. Primjer je prikazan na slici 1.5.



Slika 1.5. *Strukturalne nesavršenosti u materijalu* [8]

Način izrade hladno oblikovanih profila dijelimo na tri postupka. Savijanje, prešanje i profiliranje, slika 1.6.



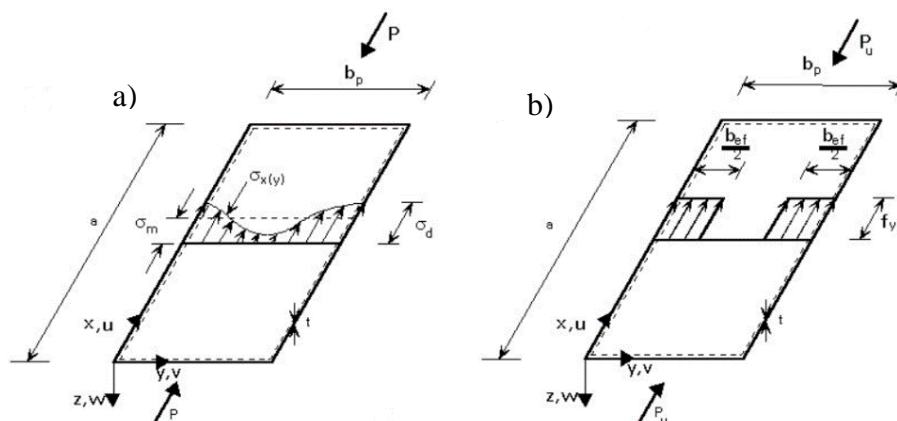
Slika 1.6. *Načini izrade hladno oblikovanih profila* [6]

Za male serije građevinskih elemenata duljine 6 m, (u iznimnim slučajevima 12 m), obično je primjereno koristiti hidraulične strojeve za savijanje ili prešanje. Količina rada potrebna za oblikovanje ovisi o debljini lima, duktilnosti materijala i obliku presjeka koji je ograničen širinom trake lima. Ovi postupci proizvodnje omogućuju oblikovanje profila za optimalnu otpornost, namjenu i daljnju obradu proizvoda [6].

1.3 Posebnosti kod dimenzioniranja

1.3.1 Koncept sudjelujuće širine

Promotrimo sliku 1.7.a). Prikazana je slobodno oslonjena tanka ploča na koju djeluje tlačno opterećenje i raspodjela naprezanja u fazi prekrokritičnog izbočavanja. Specifičnost tankostijenih elemenata jest da se u ovisnosti o rubnim uvjetima kritično naprezanje koje uzrokuje izbočavanje može prekoračiti, a da ploča ostane u ravnoteži. Tu pojavu nazivamo prekrokritična rezerva nosivosti [8].



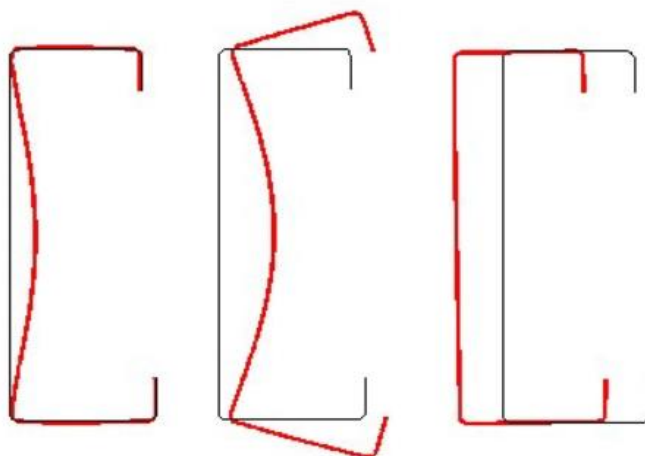
Slika 1.7. Raspodjela naprezanja u ploči [8]

Stoga se krajnje opterećenje može odrediti iz jednolike raspodjele naprezanja unutar efektivne širine presjeka b_{eff} koja ovisi o kritičnom naprezanju izvijanja σ_{cr} i granici popuštanja f_y . Model sudjelujuće širine prikazan je na slici 1.7.b). Izraz za b_{eff} koji je inicijalno dao Karman za ploču bez nesavršenosti naknadno je modificirao Winter te se u literaturi izraz za sudjelujuću širinu može pronaći pod nazivom Winterova formula i glasi [6]:

$$\rho = \frac{b_{eff}}{b_p} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} \cdot \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} \right) \quad (1.1)$$

1.3.2 Načini otkazivanja

Tipični načini otkazivanja hladno oblikovanih tankostijenih elemenata su lokalno, distorzijsko i globalno otkazivanje. Lokalno izvijanje događa se uslijed velike vitkosti bilo hrpta ili pojasnice. Distorzijsko otkazivanje možemo sagledati kao interakciju lokalnog i globalnog otkazivanja. Oba načina otkazivanja mjerodavna su za presjek, dok globalno otkazivanje utječe na cijeli element. Primjeri ovih triju načina otkazivanja dani su na slici 1.8.

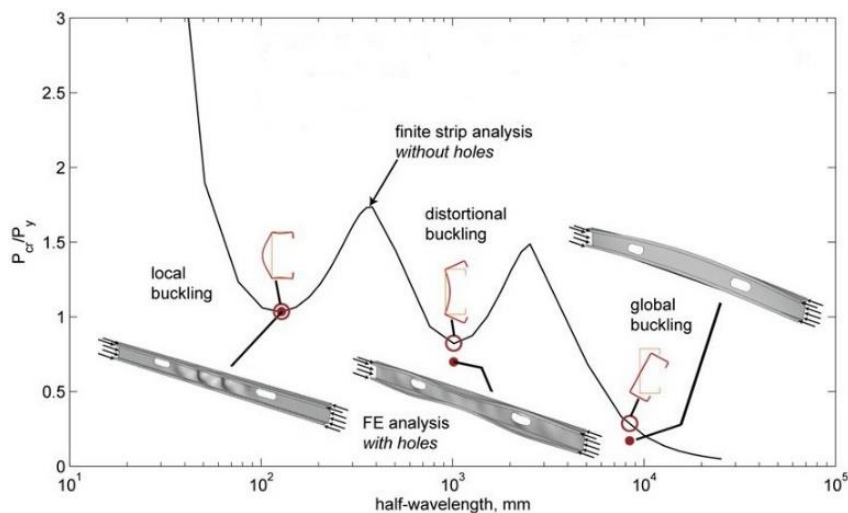


Slika 1.8. Shematski prikaz lokalnog, distorzijskog i globalnog otkazivanja

U europskoj normi [4] postoji samo jedna metoda proračuna ovakvih elemenata koja se temelji na konceptu sudjelujuće širine. Međutim, zanimljiva metoda koja nije sadržana u europskim normama, a koristi se u američkim normama je "Direct Strength Method" (DSM). Metoda je osmišljena od strane prof. Schafera sa Sveučilišta Johns Hopkins u SAD – u. DSM se zasniva na metodi konačnih traka te eksplicitno definira vezu između elastičnog izvijanja i odgovora elementa (opterećenje – pomak) sa empirijskim jednadžbama u svrhu definiranja konačne otpornosti [9]. Kao prednosti ove metode možemo navesti sljedeće:

- nema proračuna efektivnog poprečnog presjeka,
- nisu potrebni iterativni postupci unutar proračuna,
- koristi se bruto poprečni presjek [9].

Na temelju DSM – a, prof. Schafer je sa suradnicima razvio računalni program pod nazivom CUFSM u kojem se aproksimira otpornost na temelju sinusoidalnog poluvala i omjera kritičnog naprezanja sa idealnim. Program je jako koristan jer se može prilično točno prikazati na kojim duljinama elementa nastupa lokalno, distorzijsko odnosno globalno otkazivanje, slika 1.9.



Slika 1.9. Prikaz poluvalova na kojima se događaju različiti oblici otkazivanja [10]

1.4 Načini spajanja tankostijenih elemenata

Proračun spojeva ima važnu ulogu u sklopu projektiranja konstrukcija te značajno utječe na ekonomičnost cijele konstrukcije i samu izvedbu. Iznimno je važno pravilno odabrati tip spoja, naročito ako se radi o tankostijenim profilima ili limovima.

Trenutno postoji širok spektar metoda spajanja hladno oblikovanih profila. Većina ih je specifična za tanke limove, međutim i spajala koja se koriste za toplo valjane profile, tj. za deblje ploče, mogu se koristiti pod uvjetom da se uzmu u obzir razlike u ponašanju [6].

Važni aspekti koje treba uzeti u obzir kod spojeva tankostijenih profila su:

- smanjenje nosivosti u osnovnom materijalu,
- izbjegavanje lokalnog izbočavanja,
- često se izvode samo s jedne strane (npr. kod pokrova).

Općenito možemo spojna sredstva za tankostijene profile podijeliti u dvije kategorije:

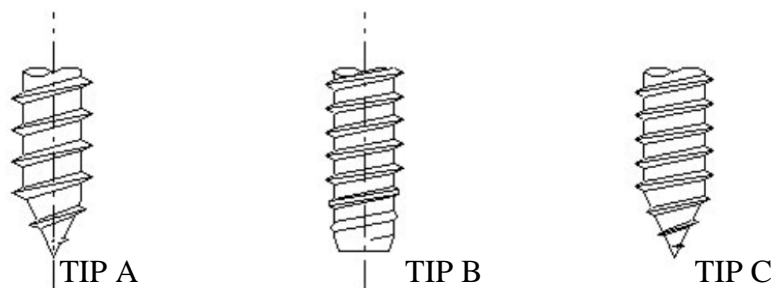
- mehanička spojna sredstva,
- zavarivanje.

1.4.1 Mehanička spojna sredstva

Razlikujemo dvije glavne skupine vijaka:

- **samorezni vijci:** vijci koji u prethodno izbušenoj rupi formiraju navoj i vijci koji u prethodno izbušenoj rupi narezuju navoj,
- **samobušajući vijci.**

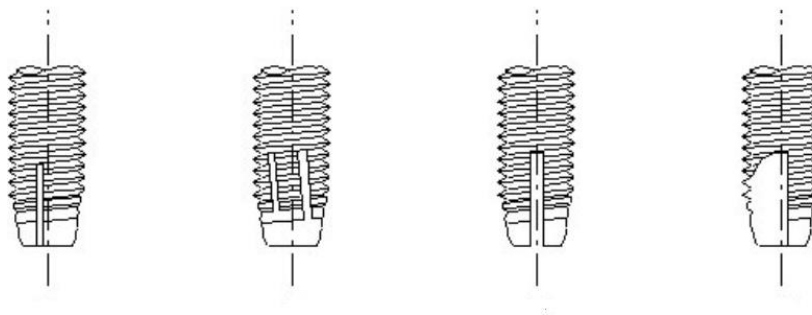
Na slici 1.10. redom su prikazani vijci: TIP A služi za pričvršćivanje dvaju tankih limova, TIP B služi za pričvršćivanje limova debljine veće od 2 mm i TIP C za pričvršćivanje limova debljine do 4 mm. Sva tri tipa spadaju u grupu samoreznih vijaka koji u prethodno izbušenoj rupi formiraju navoj [6].



Slika 1.10. *Primjeri vijaka koji formiraju navoj u prethodno izbušenoj rupi [6]*

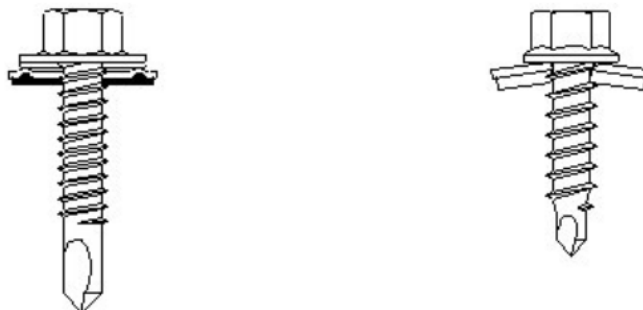
Vijci koji narezuju navoj obično su proizvedeni od ugljičnog čelika ili od nehrđajućeg čelika.

Na slici 1.11. prikazani su primjeri.



Slika 1.11. *Primjeri vijaka koji narezuju navoj u prethodno izbušenoj rupi [6]*

Samobušeci vijci sami buše vlastitu rupu i oblikuju svoj navoj, slika 1.12. Ovakvi vijci se obično izrađuju od ugljičnog čelika toplinski obrađenog (obložen cinkom) ili od nehrđajućeg čelika [6].



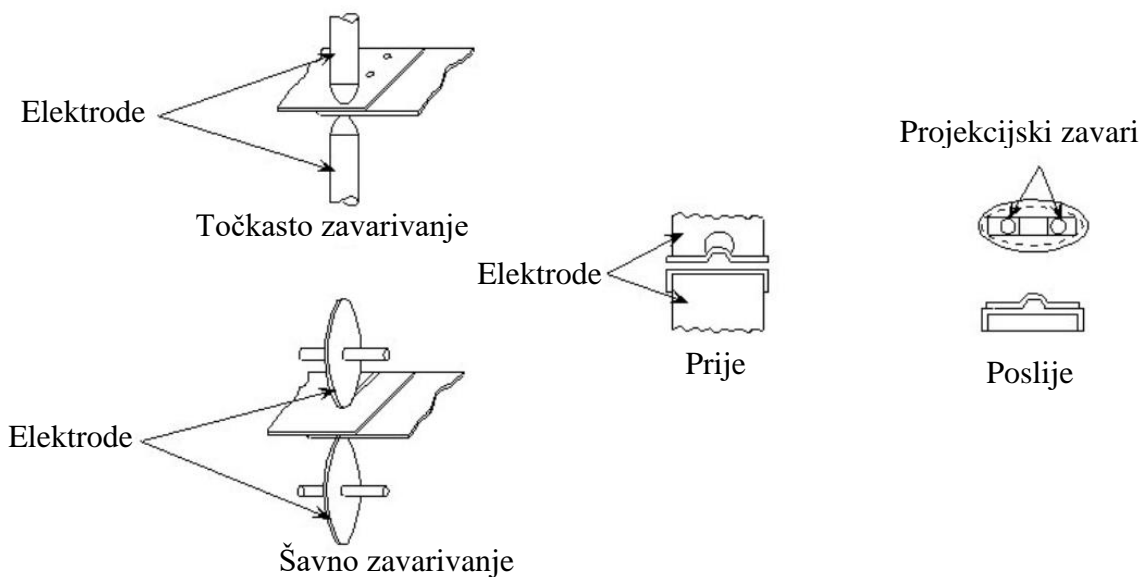
Slika 1.12. *Primjeri samobušecih vijaka [6]*

U mehanička spojna sredstva spadaju još zakovice i "čavli" za tankostijene profile.

1.4.2 Zavareni spojevi

Kod laganih konstrukcija, osim klasičnih tehnika zavarivanja (TIG, MIG, MAG), često se koristi elektrootporno zavarivanje. Vrlo je praktično jer se može relativno jednostavno automatizirati što utječe na smanjenje troškova. Vrste elektrootpornog zavarivanja, slika 1.13., koje se koriste za spajanje tankostijenih limova možemo podijeliti na:

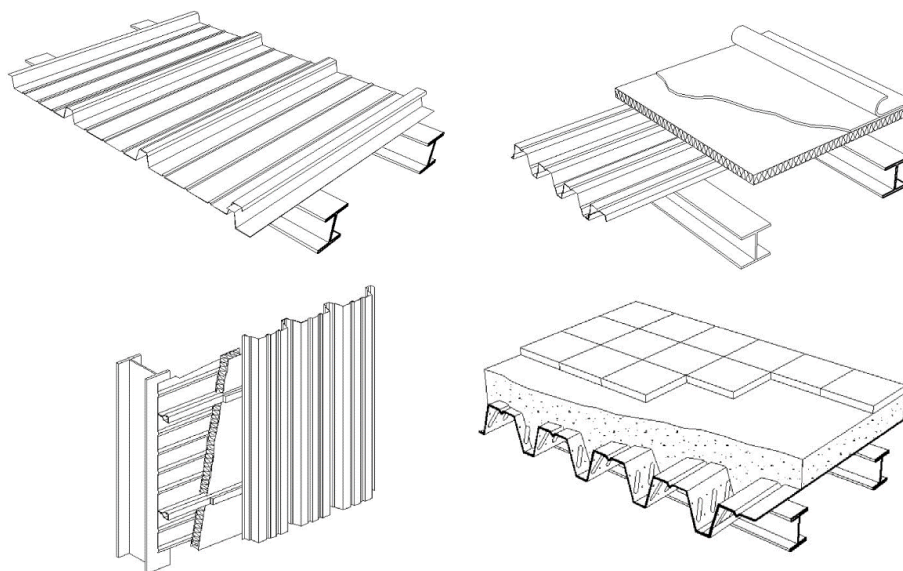
- točkasto zavarivanje,
- šavno zavarivanje,
- projekcijsko zavarivanje.



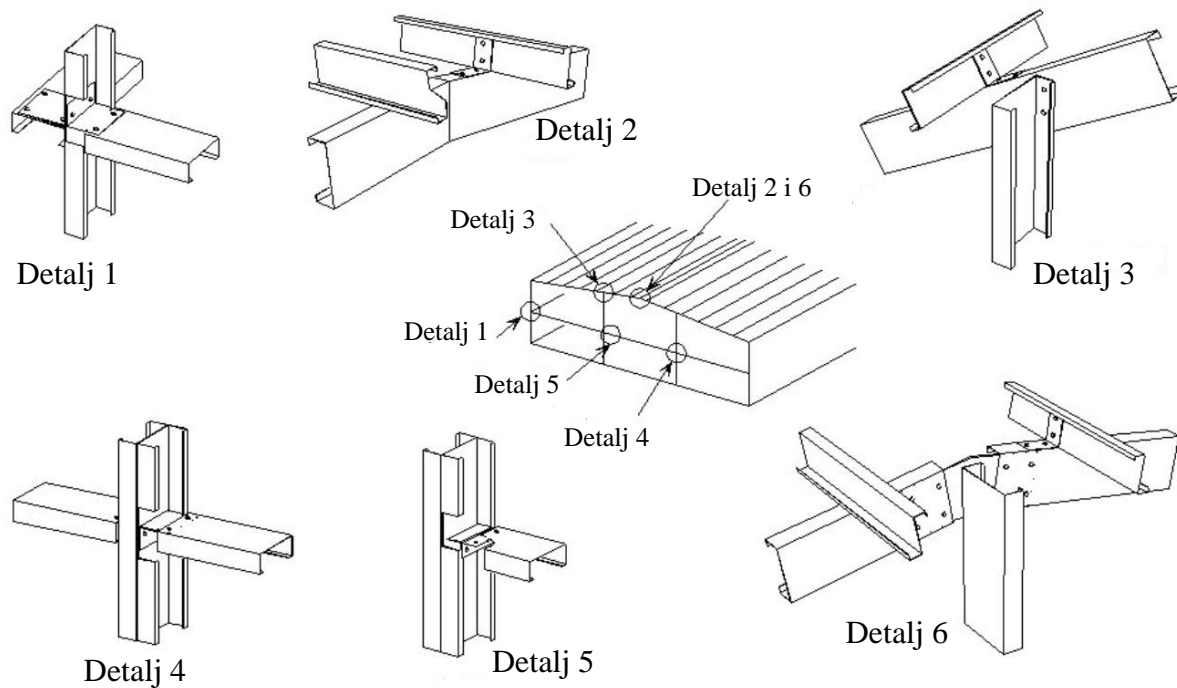
Slika 1.13. Tehnike elektrootpornog zavarivanja [6]

1.5 Primjena tankostijenih elemenata

Općenito, tankostijeni elementi se dijele na limove i tankostijene profile. Limovi se većinom koriste kao ravni pokrovi, fasadni elementi ili u sustavu međukatne konstrukcije, slika 1.14. Tankostijeni profili većinom su u primjeni kao podrožnice, dok se za stupove i glavne nosače mogu koristiti sastavljeni tankostijeni profili, slika 1.15.



Slika 1.14. Primjena tankostijenih limova [6]



Slika 1.15. *Primjena tankostijenih profila [6]*

2 CILJ ISTRAŽIVANJA I HIPOTEZE

Cilj ovog istraživanja je razviti seriju hladno oblikovanih tankostijeni profila koji će u nekom od nosivih sustava, kao što je podrožnica u krovnoj konstrukciji čelične hale ili sekundarni nosač u međukatnoj konstrukciji visoke zgrade, biti ekvivalentni toplo valjanim profilima.

Težnja je da tankostijeni profil ima približno jednaku ili veću otpornost na savijanje, koje je dominantno opterećenje kod spomenutih nosivih sustava uz manji utrošak materijala. Time bi se znatno povećala ekonomičnost same konstrukcije. Neki autori [11]–[13] su došli već do optimalnih oblika C profila koji pokazuju jako dobro ponašanje na jednoosno savijanje u odnosu na druge srodne tankostijene profile. Međutim, u literaturi se nigdje ne može naći usporedba takvih profila sa toplo valjanima koji se puno više koriste u praksi. Također, ustanovljeno je da način spajanja sastavljenih profila nije dovoljno istražen.

Toplo valjani profili prema kojima su kalibrirani novi hladno oblikovani tankostijeni profili su iz serije IPE standardiziranih profila koji se najčešće koriste kao podrožnice ili sekundarni nosivi elementi u međukatnim konstrukcijama. U radu je prikazan proračun oba tipa profila analitički i numerički te usporedba istih.

Analizirani profil je dobiven sastavljanjem dva C profila i bilo je potrebno spojiti C profile primjerenim spojnim sredstvima. U uvodnom dijelu prikazani su načini spajanja vijčano i zavarivanjem. Temeljem toga, u radu su razmatrani kontinuirano spojeni i diskretno točkasto zavareni C profila. Budući da kontinuirano spajanje nije moguće izvesti, analiziran je utjecaj diskretnog točkastog spajanja na ukupnu otpornost elementa. Problem određivanja optimalnog rasporeda točkastih zavara praktički je nemoguće riješiti analitičkim postupkom, stoga se u ovom dijelu koristi isključivo metoda konačnih elemenata (MKE).

Na temelju navedenog, postavljene su dvije hipoteze koje će se u ovom radu istražiti:

- 1. Razvijeni hladno oblikovani sastavljeni profil imat će približno jednaku ili veću otpornost na savijanje u usporedbi sa toplo valjanim IPE profilom uz manji utrošak materijala.*

- 2. Diskretno spajanje sastavljenog C profila točkastim zavarivanjem neće značajno utjecati na otpornost elementa.*

Konačno, uzevši u obzir da u Hrvatskoj ne postoji proizvodnja toplo valjanih profila, tankostijeni profili mogu pružiti vrlo konkurentnu alternativu, osobito ako bi se ovakvi tipovi profila proizvodili serijski.

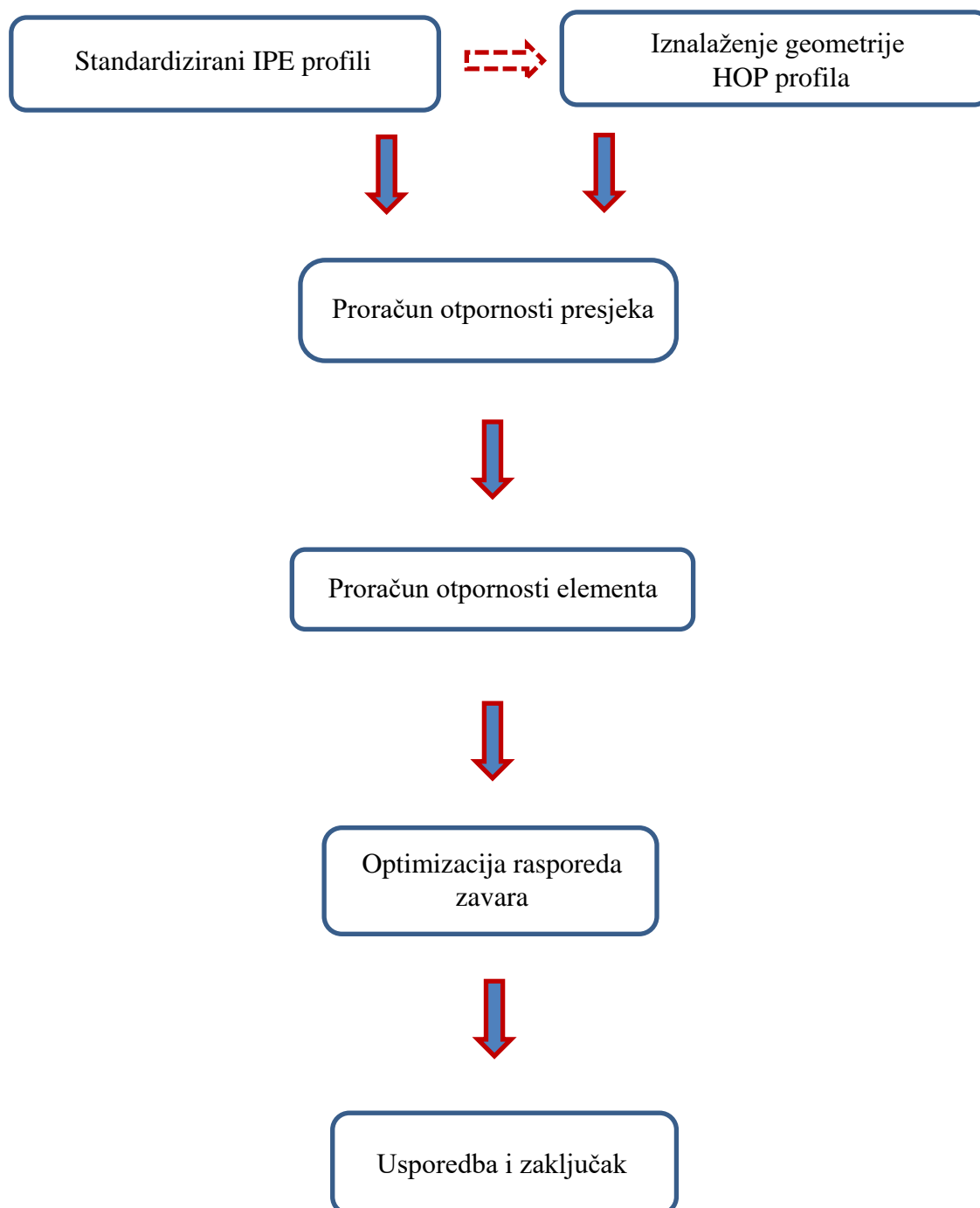
3 METODE ISTRAŽIVANJA

U radu su provedene parametarske analize kako bi se hladno oblikovani tankostijeni profil što bolje optimizirao. To uključuje linearne analize za dobivanje elastičnog kritičnog momenta i nelinearne analize za dobivanje otpornosti elemenata te rješenje rasporeda diskretnih točkastih zavara po elementu. Za sam proces optimizacije profila, radi lakšeg rukovanja velikom količinom podataka i za potrebe dobivanja grafova koji su prikazani kasnije u radu te za analitički proračun IPE i HOP profila, napravljen je program u programskom jeziku Visual Basic for Applications (VBA) [14], koji daje precizne rezultate u kratkom vremenskom periodu.

Na slici 3.1. prikazana je struktura istraživanja.

Plan istraživanja prema kojem će se dobiveni rezultati moći usporediti sa već poznatim i optimiziranim profilima iz [11], [13] te donijeti zaključak o mogućoj serijskoj proizvodnji i daljnjem istraživanju podijeljen je u nekoliko koraka:

1. Istraživanje područja gdje je primjena hladno oblikovanih tankostijenih profila u odnosu na toplo valjane profile moguća i s većim prednostima.
2. Optimiziranje hladno oblikovanih tankostijenih profila na temelju karakteristika toplo valjanih profila.
3. Proračuni otpornosti presjeka i elementa na savijanje toplo valjanih i hladno oblikovanih tankostijenih profila analitički i numerički.
4. Diskusija i zaključak.



Slika 3.1. *Struktura istraživanja*

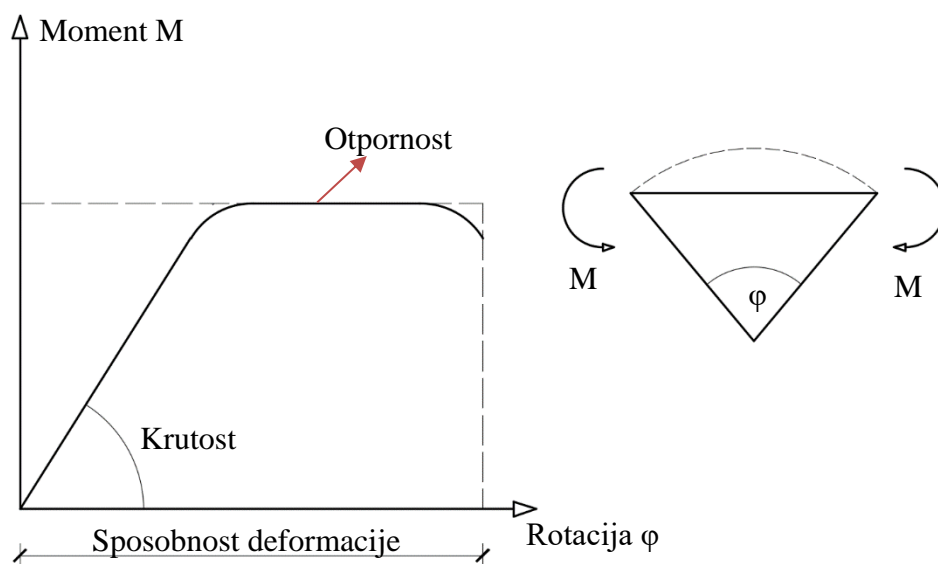
4 UVOD U PRORAČUN OTPORNOSTI NA SAVIJANJE

4.1 Uvod

U ovom poglavlju razmatrat će se posebnosti i razlike u proračunima otpornosti dvaju razmatranih profila, IPE i HOP. S obzirom na to da razmatrani HOP profil, kao i srodni tankostijeni profili, zbog utjecaja lokalnog izbočavanja imaju niže vrijednosti otpornosti na savijanje u usporedbi s IPE profilima, potrebno je uzeti u obzir takvo ponašanje prilikom proračuna kako bi se kod oblikovanja izbjegli nepovoljni učinci tankostijenog HOP profila.

4.2 Razredba poprečnog presjeka

U ovom istraživanju promatrani elementi su izloženi isključivo savijanju te se stoga tri bitna svojstva elementa (otpornost, krutost, sposobnost deformacije) mogu prikazati na dijagramu ovisnosti momenta savijanja M i rotacije φ , prikazanih na slici 4.1. [15].



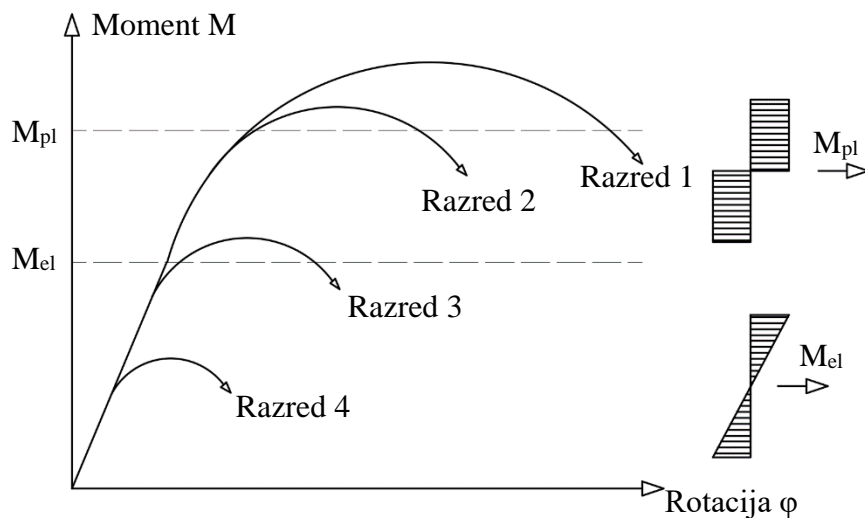
Slika 4.1. Prikaz konstrukcijskih svojstava elemenata u ovisnosti $M - \varphi$

Rotacijska sposobnost pojedinog elementa opisana je kao sposobnost prihvaćanja deformacije odabranog oblika poprečnog presjeka u odnosu na plastičnu otpornost na savijanje M_{pl} bez pojave prijevremenog otkazivanja samog elementa [15].

Rotacijska sposobnost ovisi o:

- odnosu širine i debljine pojasnica i hrptova poprečnog presjeka,
- položaju uzdužne tlačne sile u odnosu na presjek,
- udaljenosti nul-točaka momentne linije od kritičnog poprečnog presjeka [15].

Prema [3] uzimajući u obzir različita ponašanja vezano za odnos momenta savijanja M i rotacije φ moguće je svrstati svaki poprečni presjek unutar četiri razreda. Razredi poprečnih presjeka, koje ovise o svojstvima $M - \varphi$ prikazane su na slici 4.2.

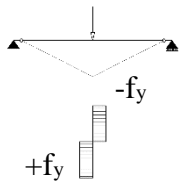
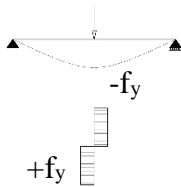
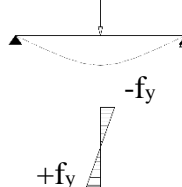
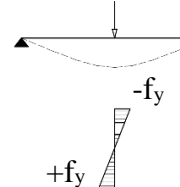


Slika 4.2. Prikaz razreda poprečnih presjeka

Postoje tri postupka koja se koriste za proračun prema graničnom stanju te su njihove posebnosti, kao i posebnosti vezane za svaki razred iznesene u tablici 4.1.

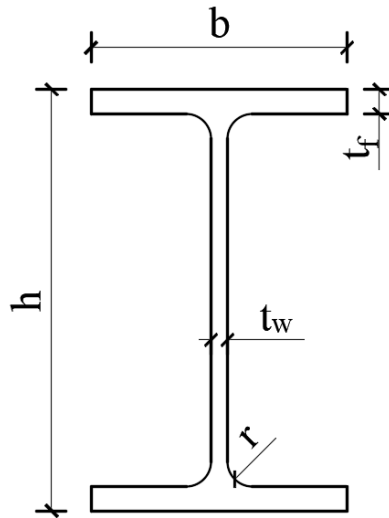
U ovom istraživanju pokazalo se da se odabrani IPE profili mogu svrstati u razred 1 poprečnog presjeka, što znači da IPE profili ostvaruju plastičnu otpornost uz puni rotacijski kapacitet. Detaljniji proračun vezano na razredbu poprečnog presjeka za IPE profil dan je u poglavlju 6. Za razliku od IPE profila, HOP profili i srodni tankostijeni profili ne zadovoljavaju uvjete za razrede 1, 2 i 3 te se stoga svrstavaju u razred 4 poprečnog presjeka. Prilikom računanja otpornosti tankostijenih profila mora se uzeti u obzir lokalno izbočavanje poprečnog presjeka ili nekog njegovog dijela. Detaljniji proračun HOP tankostijenog profila i posebnosti vezane za proračun razreda 4 poprečnog presjeka dani su u poglavlju 7.

Tablica 4.1. Prikaz razreda poprečnog presjeka

Razred poprečnog presjeka	Razred 1	Razred 2	Razred 3	Razred 4
Otpornost poprečnog presjeka	Plastični poprečni presjek	Kompaktni poprečni presjek	Nekompaktni poprečni presjek	Vitki poprečni presjek
	Puni rotacijski kapacitet	Ograničeni rotacijski kapacitet	Rubni napon = f_y	Mjestimično izbočavanje
Raspodjela napona i rotacijski kapacitet				
Postupak određivanja unutarnjih sila i momenata	Plastično	Elastično	Elastično	Elastično
Postupak određivanja otpornosti poprečnog presjeka	Plastično	Plastično	Elastično	Elastično (sudjelujuća širina)

U sljedećim točkama prikazani su složeniji izvedeni izrazi geometrijskih karakteristika vezani za dva odabrana tipa presjeka (IPE i HOP) koji su korišteni u proračunu otpornosti poprečnog presjeka i elementa.

4.3 Geometrijske karakteristike IPE profila



Slika 4.3. Prikaz geometrije IPE profila

Površina poprečnog presjeka:

$$A = 4 \left[\frac{1}{2} \left(b \cdot t_f + \frac{h_w \cdot t_w}{2} \right) + r^2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (4.1)$$

Moment površine 2. stupnja za IPE profile oko jače osi definiran je kao:

$$I_y = 4 \sum_{i=1}^n I_{y,i} \quad (4.2)$$

gdje je:

$$h_w = h - 2t_f \quad (4.3)$$

$$I_{y,1} = \frac{b \cdot t_f^3}{24} + \frac{b \cdot t_f}{2} \cdot \left(\frac{h - t_f}{2} \right)^2 \quad (4.4)$$

$$I_{y,2} = \frac{t_w \cdot h_w^3}{48} \quad (4.5)$$

$$I_{y,3} = \frac{r^4}{12} + r^2 \cdot \left(\frac{h_w - r}{2} \right)^2 \quad (4.6)$$

$$I_{y,4} = -\frac{(9\pi^2 - 64) \cdot r^4}{144\pi} - \frac{r^2 \pi}{4} \cdot \left(\frac{h_w}{2} - r + \frac{4r}{3\pi} \right)^2 \quad (4.7)$$

Moment površine 2. stupnja za IPE profile oko slabije osi definiran je kao:

$$I_z = 4 \sum_{i=1}^n I_{z,i} \quad (4.8)$$

gdje je:

$$h_w = h - 2t_f \quad (4.9)$$

$$I_{z,1} = \frac{t_f \cdot b^3}{24} \quad (4.10)$$

$$I_{z,2} = \frac{h_w \cdot t_w^3}{48} \quad (4.11)$$

$$I_{z,3} = \frac{r^4}{12} + r^2 \cdot \left(\frac{t_w + r}{2} \right)^2 \quad (4.12)$$

$$I_{z,4} = -\frac{(9\pi^2 - 64) \cdot r^4}{144\pi} - \frac{r^2 \pi}{4} \cdot \left(\frac{t_w}{2} + r - \frac{4r}{3\pi} \right)^2 \quad (4.13)$$

Torzijska konstanta za IPE profile prema [16]:

$$I_t = \sum_{i=1}^n I_{t,i} \quad (4.14)$$

$$I_{t,1} = \frac{2}{3} \cdot (b - 0,63 \cdot t_f) \cdot t_f^3 \quad (4.15)$$

$$I_{t,2} = \frac{1}{3} \cdot (h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w^3 \quad (4.16)$$

$$I_{t,3} = 2 \cdot \frac{t_w}{t_f} \cdot \left(0,145 + 0,1 \cdot \frac{r}{t_f} \right) \cdot \left[\frac{\left(r + \frac{t_w}{2} \right)^2 + (r + t_f)^2 - r^2}{2 \cdot r + t_f} \right]^4 \quad (4.17)$$

Konstanta krivljenja za IPE profile prema [16]:

$$I_w = \frac{t_f \cdot b^3}{24} \cdot (h - t_f)^2 \quad (4.18)$$

Elastični moment otpora:

$$W_{el,y} = \frac{2 \cdot I_y}{h} \quad (4.19)$$

Plastični moment otpora:

$$W_{pl,y} = 4 \sum_{i=1}^n W_{pl,y,i} \quad (4.20)$$

gdje je:

$$h_w = h - 2t_f \quad (4.21)$$

$$W_{pl,y,1} = \frac{b}{2} \cdot t_f \cdot \left(\frac{h - t_f}{2} \right) \quad (4.22)$$

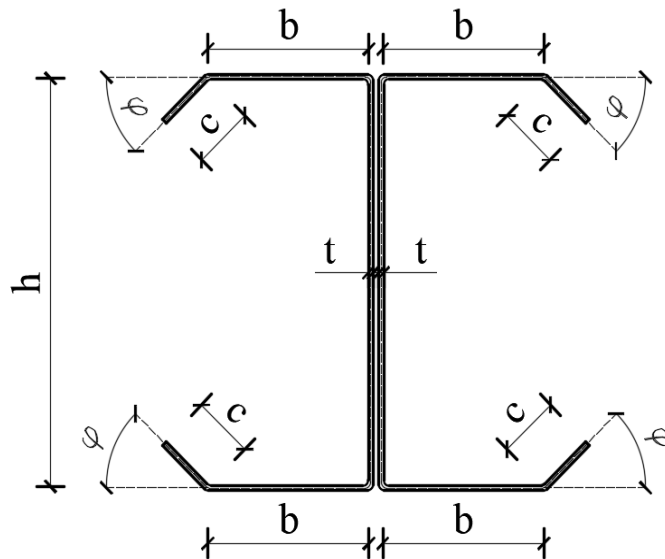
$$W_{pl,y,2} = \frac{1}{16} \cdot (t_w \cdot h_w^2) \quad (4.23)$$

$$W_{pl,y,3} = r^2 \cdot \left(\frac{h_w - r}{2} \right) \quad (4.24)$$

$$W_{pl,y,4} = -\frac{r^2 \pi}{4} \cdot \left(\frac{h_w}{2} - r + \frac{4r}{3\pi} \right) \quad (4.25)$$

4.4 Geometrijske karakteristike HOP profila

4.4.1 Bruto presjek



Slika 4.4. Prikaz geometrije HOP profila – bruto

Vrijednosti ukupne osne visine i ukupne osne širine:

$$h_0 = h \quad (4.26)$$

$$b_0 = 2 \cdot \left(b + \cos \varphi \cdot c + \frac{t}{2} \right) \quad (4.27)$$

Površina bruto presjeka:

$$A = 2 \cdot t \cdot (h + 2 \cdot b + 2 \cdot c) \quad (4.28)$$

Moment površine 2. stupnja bruto presjeka oko jače osi:

$$I_y = 4 \sum_{i=1}^n I_{y,i} \quad (4.29)$$

gdje su:

$$I_{y,1} = \frac{t \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^3}{12} + \frac{h}{2} \cdot t \cdot \left(\frac{h}{4}\right)^2 = \frac{t \cdot h^3}{24} \quad (4.30)$$

$$I_{y,2} = \frac{b \cdot t^3}{12} + \frac{b \cdot t \cdot h^2}{4} = \frac{b \cdot t}{4} \cdot \left(\frac{t^2}{3} + h^2\right) \quad (4.31)$$

$$I_{y,3} = \frac{t}{\sin \varphi} \cdot \frac{(\sin \varphi \cdot c)^3}{12} + c \cdot t \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{\sin \varphi \cdot c}{2}\right)^2 \quad (4.32)$$

Potrebno je napomenuti da su prilikom računanja momenata površine 2. stupnja kosih dijelova presjeka, tj. $I_{y,3}$ i $I_{z,3}$, korišteni izrazi dani u [17].

Moment površine 2. stupnja bruto presjeka oko slabije osi:

$$I_z = 4 \sum_{i=1}^n I_{z,i} \quad (4.33)$$

gdje su:

$$I_{z,1} = \frac{\frac{h}{2} \cdot t^3}{12} + \frac{h}{2} \cdot t \cdot \left(\frac{t}{2}\right)^2 = \frac{h \cdot t^3}{6} \quad (4.34)$$

$$I_{z,2} = \frac{t \cdot b^3}{12} + b \cdot t \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2 = \frac{t \cdot b^3}{3} \quad (4.35)$$

$$I_{z,3} = \frac{t}{\cos \varphi} \cdot \frac{(\cos \varphi \cdot c)^3}{12} + c \cdot t \cdot \left(b + \frac{\cos \varphi \cdot c}{2}\right)^2 \quad (4.36)$$

Moment otpora bruto presjeka:

$$W_y = \frac{2 \cdot I_y}{h_{uk}} \quad (4.37)$$

Po pretpostavci apsolutno krute veze između dva dijela nosača, za proračun torzijske konstante, debljina stijenke uzima se s dvostruko većom vrijednosti na mjestu spoja dva dijela profila. Sukladno tome, koristi se modificirani izraz prema [18].

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot \left[4 \cdot c \cdot t^3 + 4 \cdot b \cdot t^3 + h \cdot (2 \cdot t)^3 \right] \quad (4.38)$$

Konstanta krivljenja, zbog složenosti proračuna, za HOP profile računata je pomoću računalnog programa Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2017 [19].

4.4.2 Efektivni presjek

Prilikom računanja efektivnog momenta površine 2. stupnja presjeka korištena je jedna polovica presjeka, slika 4.5. Za dokaz otpornosti poprečnog presjeka i elementa bilo je potrebno uzeti dvostruku vrijednost efektivnog momenta otpora kao mjerodavnu.

Efektivni moment površine 2. stupnja:

$$I_{eff,y} = \sum_{i=1}^n I_{eff,y,i} \quad (4.39)$$

gdje je:

$$I_{eff,y,1} = \frac{t}{\sin(\varphi)} \cdot \frac{(\sin(\varphi) \cdot c)^3}{12} + c \cdot t \cdot \left(z_t - \frac{\sin(\varphi) \cdot c}{2} \right)^2 \quad (4.40)$$

$$I_{eff,y,2} = \frac{b \cdot t^3}{12} + b \cdot t \cdot z_t^2 \quad (4.41)$$

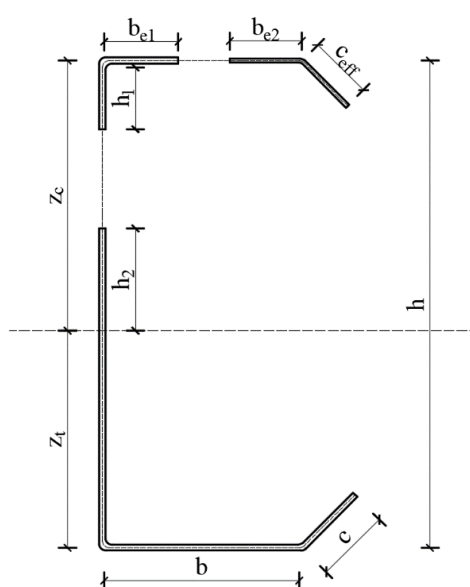
$$I_{eff,y,3} = \frac{t \cdot h_2^3}{12} + h_2 \cdot t \cdot \left(z_t - \frac{h_2}{2} \right)^2 \quad (4.42)$$

$$I_{eff,y,4} = \frac{t \cdot h_1^3}{12} + h_1 \cdot t \cdot \left(z_c - \frac{h_1}{2} \right)^2 \quad (4.43)$$

$$I_{eff,y,5} = \frac{b_{e1} \cdot t^3}{12} + b_{e1} \cdot t \cdot z_c^2 \quad (4.44)$$

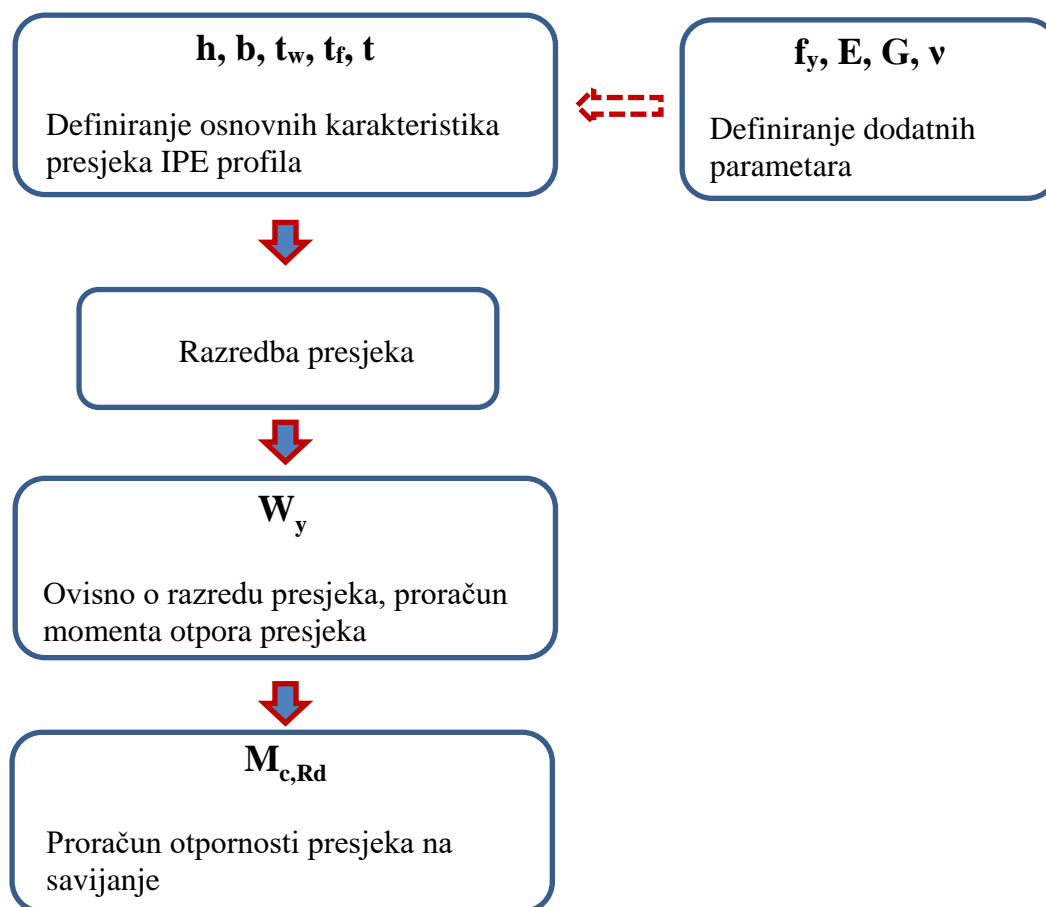
$$I_{eff,y,6} = \frac{b_{e2} \cdot (t \cdot \chi_d)^3}{12} + b_{e2} \cdot (t \cdot \chi_d) \cdot z_c^2 \quad (4.45)$$

$$I_{eff,y,7} = \frac{(t \cdot \chi_d)}{\sin(\varphi)} \cdot \frac{(\sin(\varphi) \cdot c_{eff})^3}{12} + c_{eff} \cdot (t \cdot \chi_d) \cdot \left(z_c - \frac{\sin(\varphi) \cdot c_{eff}}{2} \right)^2 \quad (4.46)$$



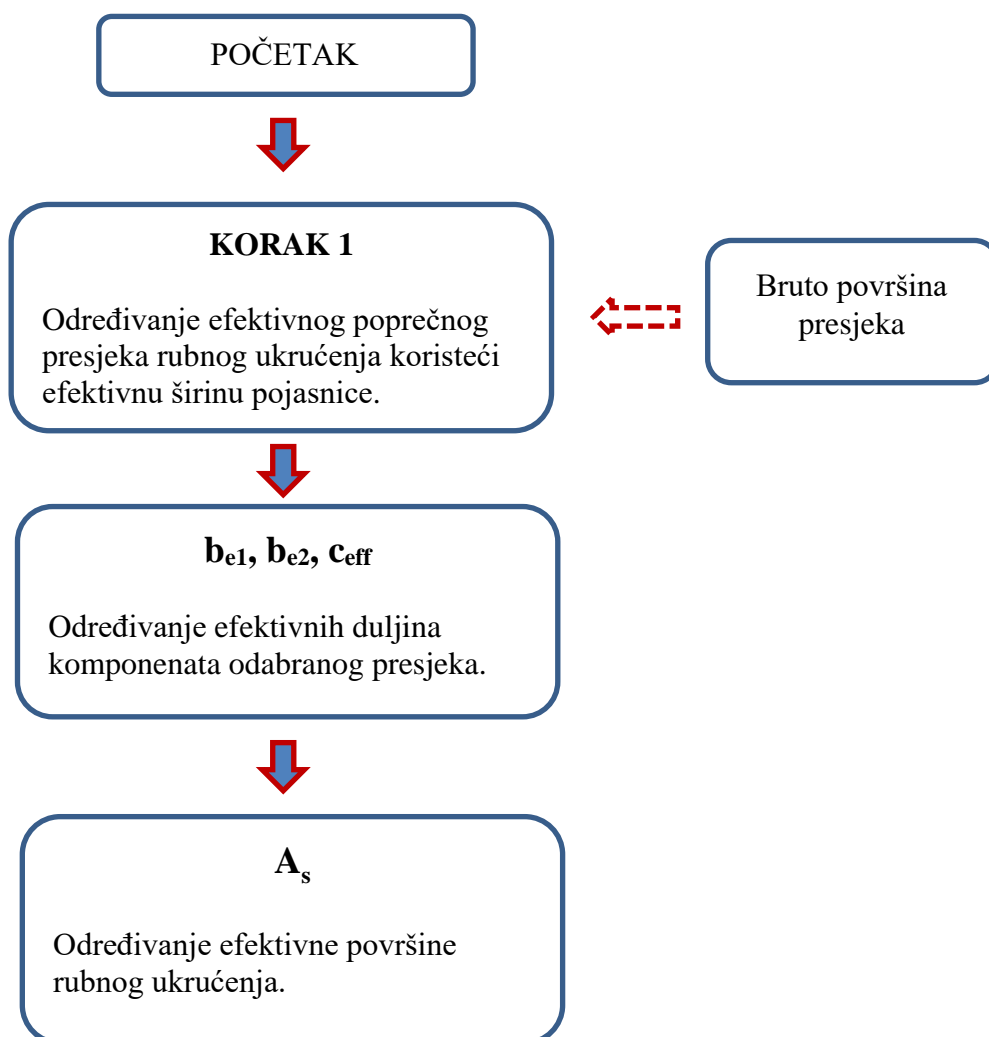
Slika 4.5. Prikaz geometrije HOP profila – efektivni presjek

4.5 Dijagram toka za proračun otpornosti presjeka (IPE profil)

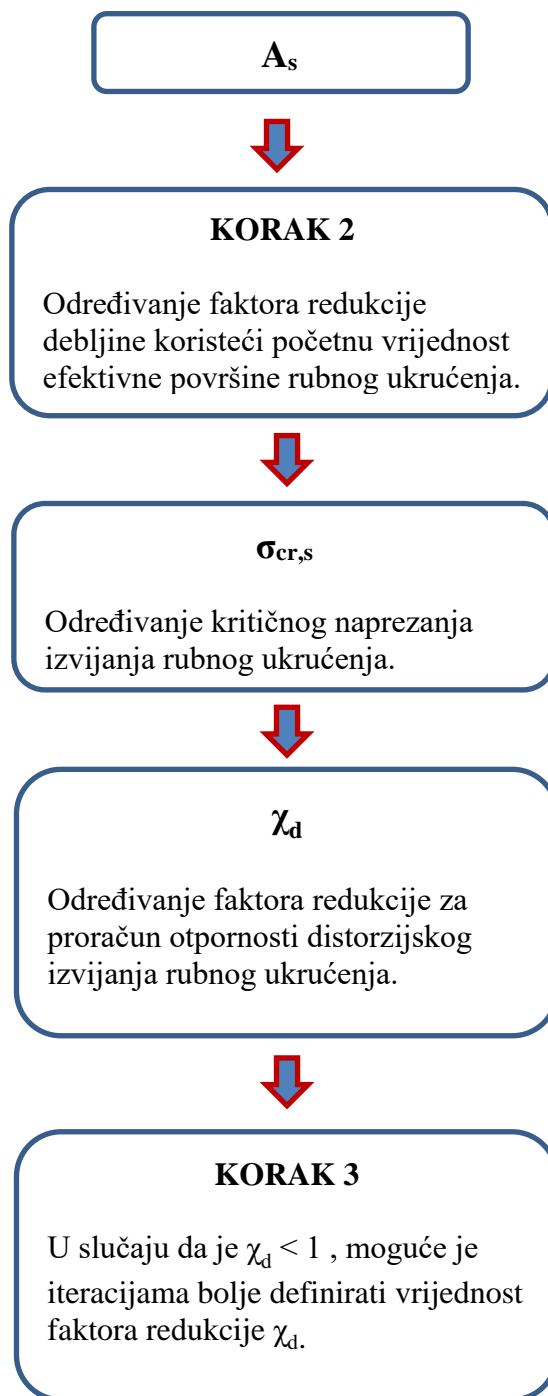


Slika 4.6. Dijagram toka za proračun otpornosti presjeka (IPE profil)

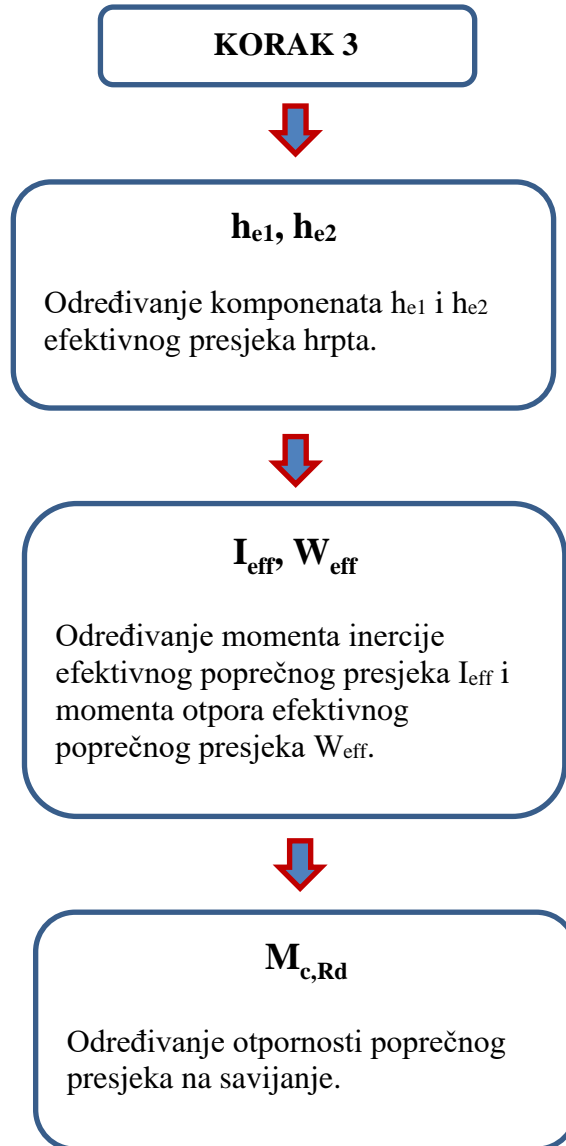
4.6 Dijagram toka za proračun otpornosti presjeka (HOP profil)



Slika 4.7. Dijagram toka za proračun otpornosti presjeka (HOP profil) – dio 1

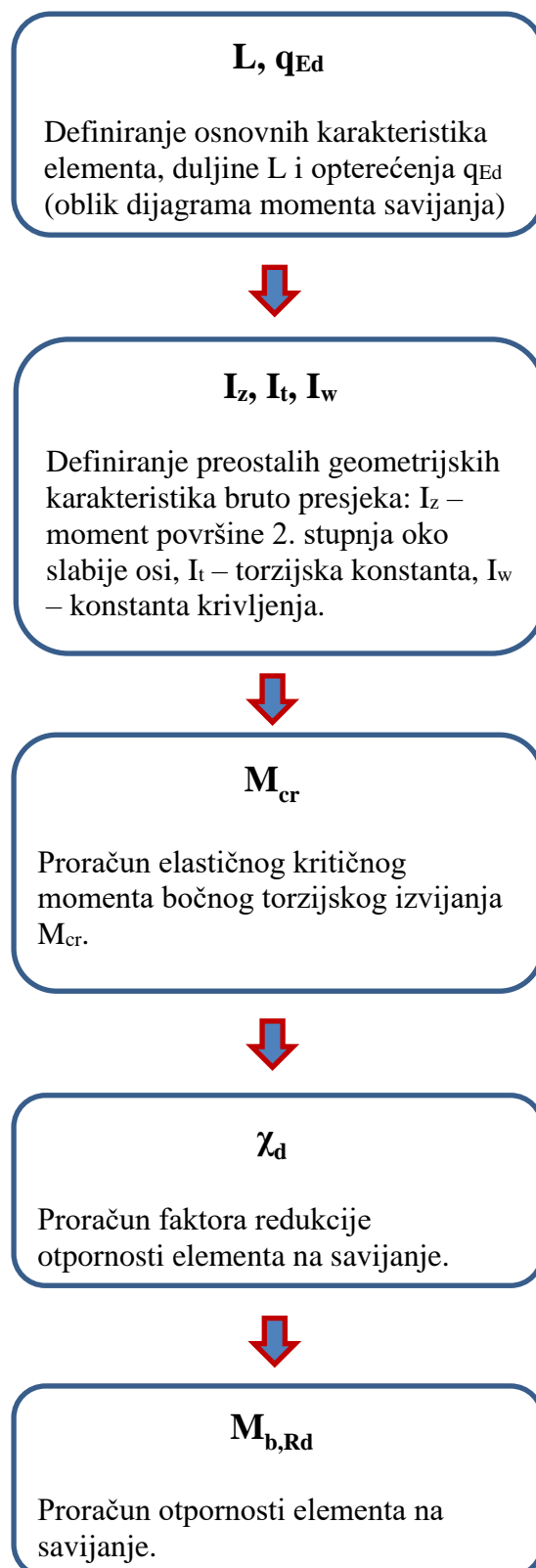


Slika 4.8. Dijagram toka za proračun otpornosti presjeka (HOP profil) – dio 2



Slika 4.9. Dijagram toka za proračun otpornosti presjeka (HOP profil) – dio 3

4.7 Dijagram toka za proračun otpornosti elementa (IPE I HOP profil)

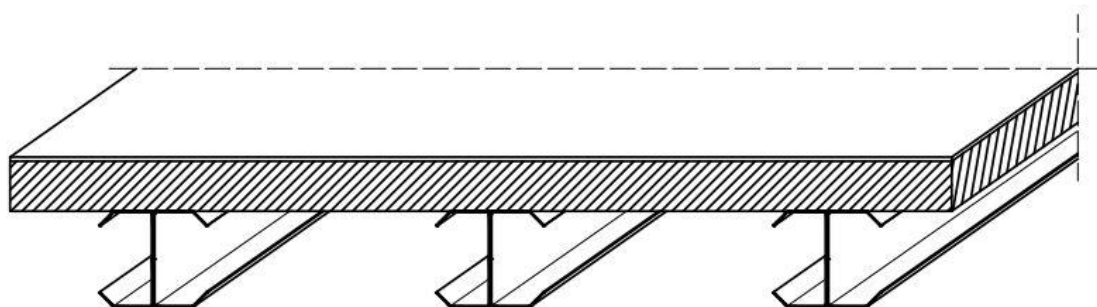


Slika 4.10. Dijagram toka za proračun otpornosti elementa (IPE i HOP profil)

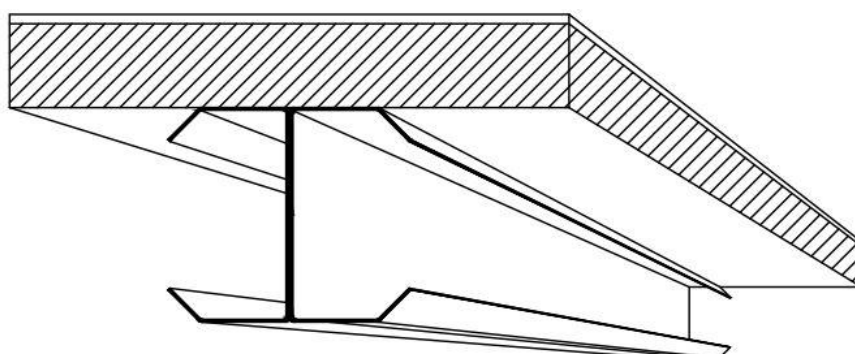
5 PROCES OPTIMIZACIJE HLADNO OBLIKOVANOG TANKOSTIJENOG PROFILA

5.1 Uvod

U ovom poglavlju prikazat će se glavne značajke i posebnosti procesa optimizacije za odabrani oblik geometrije poprečnog presjeka profila. Kao što je već ranije spomenuto, u radu se istražuju mogući novi tipovi čeličnih nosivih elemenata u sustavu podrožnica ili u međukatnim konstrukcijama te će se kao usporedba koristiti IPE profili koji se najčešće koriste kao međukatni nosivi elementi ili podrožnice, slike 5.1. i 5.2. Cilj optimizacije je utvrditi za koje geometrijske parametre se može pronaći tip presjeka koji ima što veću otpornost uz što manji utrošak materijala te uz određena konstrukcijska ograničenja.



Slika 5.1. Shematski prikaz skupine HOP profila u sklopu međukatne konstrukcije



Slika 5.2. Shematski prikaz HOP profila u sklopu međukatne konstrukcije

5.2 Plan i dijagram toka optimizacije hladno oblikovanih tankostijenih profila

Kako bi se proces optimizacije proveo što bolje i detaljnije te samim time rezultirao uspješnijim konačnim odabirom geometrije hladno oblikovanog presjeka, potrebno je odrediti stroga pravila i redoslijed provedbe optimizacije. Ograničenja koja će se primjenjivati prilikom optimizacije svakog od HOP profila mogu biti:

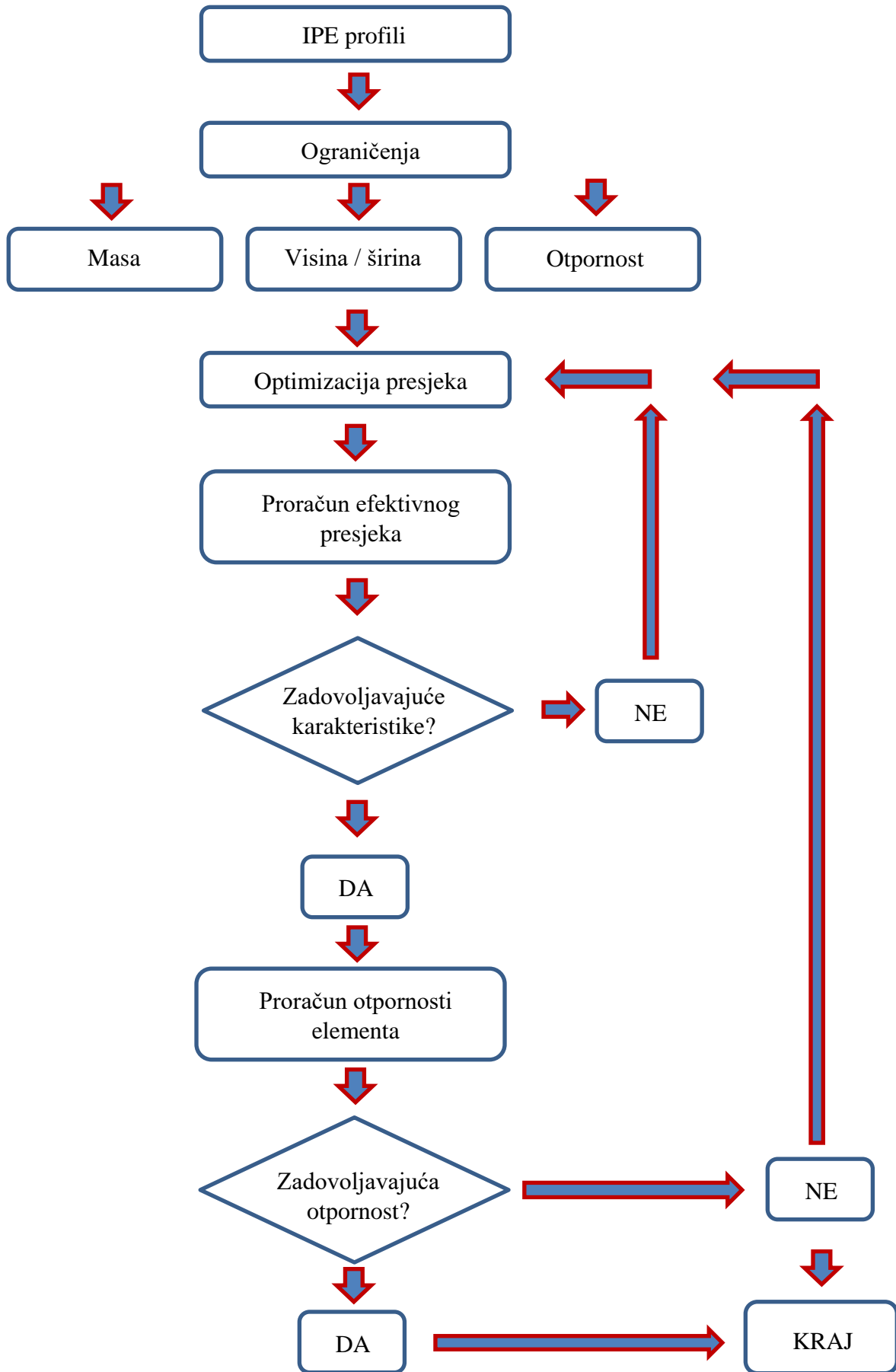
- normirana geometrijska ograničenja prema [4],
- proizvoljna ograničenja (funkcionalna i estetska ograničenja).

Uz ta ograničenja, optimizacija će se provoditi prema dijagramu toka prikazanom na slici 5.3.

Kako je vidljivo u dijagramu toka, glavna ograničenja koja dolaze od standardiziranih IPE profila su:

- **masa** – direktno vezano uz utrošak materijala po jedinici dužine elementa,
- **visina/širina** – parametri vezani za raspoloživost prostora u kojem se nalazi element,
- **otpornost** – parametar koji je rezultat oblikovanja geometrije presjeka.

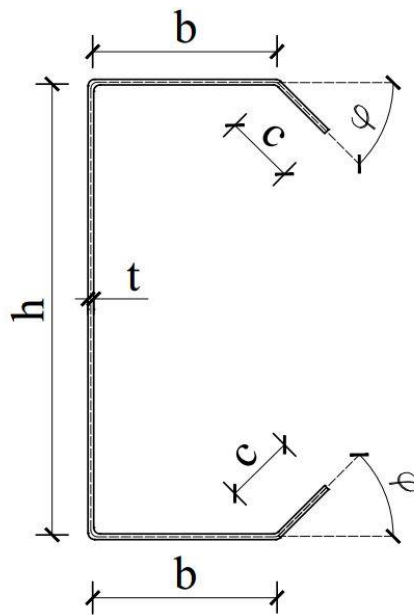
Nakon definiranja glavnih faktora koji se mijenjaju ovisno o karakteristikama svakog zasebnog IPE profila, definiraju se dodatni uvjeti i ograničenja na temelju kojih se vrši optimizacija. Ograničenja koja su prethodno navedena detaljnije su opisana u narednim točkama.



Slika 5.3. Dijagram toka optimizacije profila

5.3 Geometrijska ograničenja za HOP presjek

Geometrijska ograničenja za HOP presjek dana su u normi HRN EN 1993-1-3 [4] i ovise o duljini pojedinih dijelova presjeka elementa (h , b , c) i debljini stijenke presjeka t (vitkosti dijelova presjeka). Vrijednosti ograničenja geometrijskih parametara prema [4] dana su za geometrijske karakteristike polovice cjelokupnog presjeka. Svaki optimizirani presjek definiran je i provjeren koristeći naznačene geometrijske karakteristike prikazane na slici 5.4.



Slika 5.4. Prikaz geometrijskih karakteristika HOP optimiziranog presjeka

Na slici 5.4. oznake su sljedeće:

- h osna visina presjeka,
- c osna duljina vanjskog ukrućenja,
- b osna duljina pojasnice,
- t debljina stijenke profila.

Za slučaj ovakve geometrije presjeka, ograničenja dana prema [4] su:

$$\frac{b}{t} \leq 60 \quad (5.1)$$

$$\frac{c}{t} \leq 50 \quad (5.2)$$

$$\frac{h}{t} \leq 500 \quad (5.3)$$

Kako bi osigurali dovoljnu krutost i izbjegli izvijanje vanjskog ukrućenja c , duljina tog ukrućenja trebala bi biti u sljedećem rasponu:

$$0,2 \leq \frac{c}{b} \leq 0,6 \quad (5.4)$$

Svako od navedenih ograničenja definirat će se ovisno o debljini stijenke koja se kreće u rasponu:

$$t = 2,0 - 3,5 \text{ mm} \quad (5.5)$$

Iz čega slijede najveće duljine pojedinog dijela presjeka ovisno o debljini stijenke (tablica 5.1.):

Tablica 5.1. Ograničenja geometrijskih parametara HOP presjeka ovisno o debljini stijenke

Parametar	t = 2,0 mm	t = 2,5 mm	t = 3,0 mm	t = 3,5 mm
b_{\max} [mm]	120,0	150,0	180,0	210,0
c_{\max} [mm]	100,0	125,0	150,0	175,0
h_{\max} [mm]	1000,0	1250,0	1500,0	1750,0

Konačne granične vrijednosti nakon primjene ograničenja vezano za sprječavanje izvijanja vanjskog ukrućenja c (tablica 5.2.):

Tablica 5.2. Konačna ograničenja geometrije HOP presjeka prema [4]

Parametar	t = 2,0 mm	t = 2,5 mm	t = 3,0 mm	t = 3,5 mm
b_{\max} [mm]	120,0	150,0	180,0	210,0
c_{\min} [mm]	24,0	30,0	36,0	42,0
c_{\max} [mm]	72,0	90,0	108,0	126,0
h_{\max} [mm]	1000,0	1250,0	1500,0	1750,0

Konačna ograničenja dobivena su koristeći maksimalne vrijednosti komponente b za pojedinu debljinu stijenke. U slučaju dobivanja ograničenja koristeći maksimalne vrijednosti komponente c , rezultati bi bili veće vrijednosti komponente b u odnosu na početna ograničenja.

Ograničenja za radijus zaobljenja, koji se tijekom izvedbe profila mora uzeti u obzir, prema [2] su sljedeća:

$$\frac{r}{t} \leq 5 \quad (5.6)$$

$$\frac{r}{b} \leq 0,1 \quad (5.7)$$

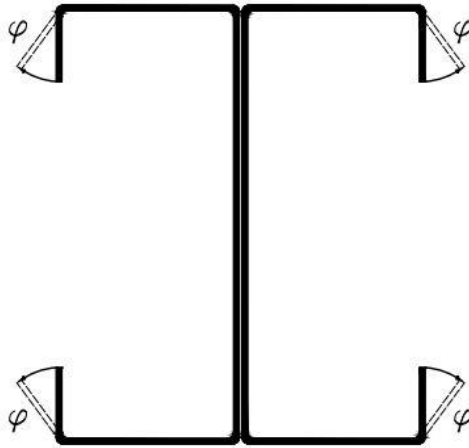
gdje r predstavlja radijus zaobljenja profila.

U slučaju zadovoljavanja navedena dva uvjeta, utjecaj radijusa zaobljenja može se zanemariti te se karakteristike profila u tom slučaju računaju bez komponente r . Prilikom optimizacije obavezno je bilo ispuniti taj uvjet.

5.4 Proizvoljna ograničenja za HOP profil (funkcionalna i estetska ograničenja)

5.4.1 Nagib vanjskog ukrućenja

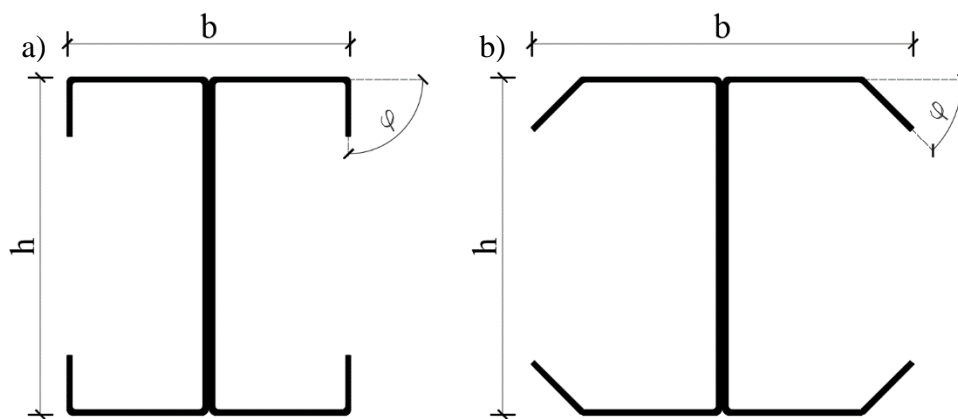
Jedan od bitnijih parametara prilikom odabira konačne geometrije je odabir nagiba vanjskog ukrućenja c (slika 5.5.), s obzirom na to da manji kut (mjereći početak kuta od osi pojasnice b) rezultira većim momentom otpora koji ujedno znači i veću otpornost, ali i značajno pridonosi ukupnoj širini samog poprečnog presjeka što je ujedno i jedan od ograničavajućih faktora prilikom optimizacije poprečnog presjeka.



Slika 5.5. Prikaz sheme promjene nagiba rubnog ukrućenja

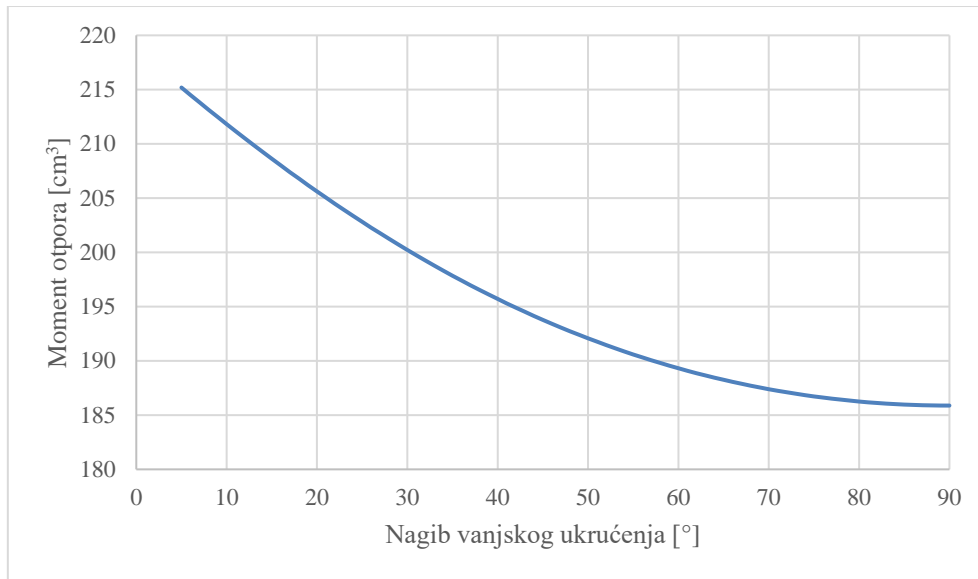
Zbog spomenutih posebnosti, bilo je potrebno na određeni način smanjiti raspon prihvatljivih vrijednosti nagiba vanjskog ukrućenja. Prilikom promjene veličine kuta, bitno je napomenuti kako u svakoj promjeni iznosa nagiba, presjek ostaje dvoosno simetričan, tj. iznos nagiba svakog od rubnih ukrućenja ostaje isti kako bi se pojednostavnio proračun i očuvala zadovoljavajuća estetika presjeka, slika 5.6.

Za okvirni prikaz promjene i međusobne ovisnosti spomenutih karakteristika odabran je proizvoljan profil čije su komponente u rasponima vrijednosti definiranim u tablici 5.2.

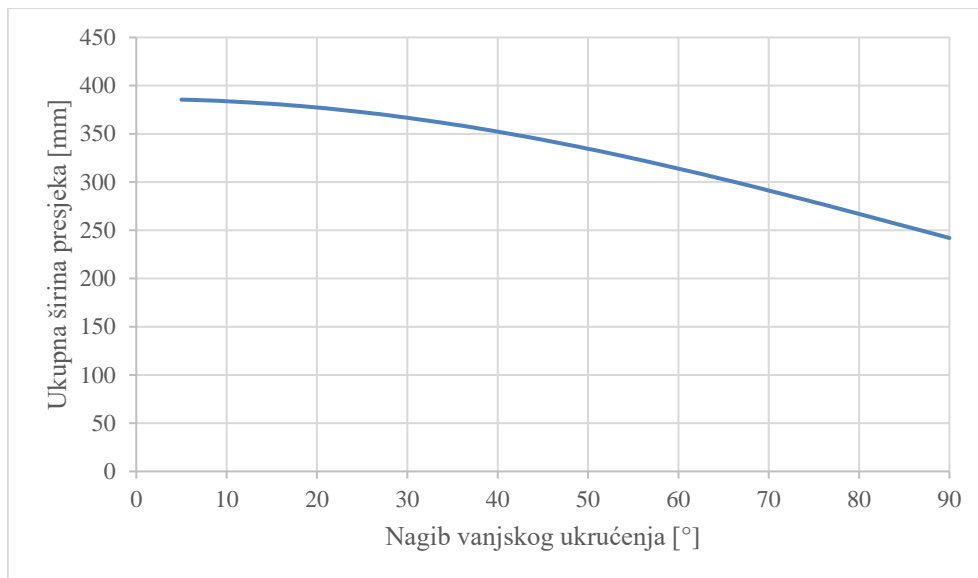


Slika 5.6. a) Prikaz početne geometrije presjeka b) Prikaz konačne geometrije presjeka

Prikaz promjene nagiba i utjecaja na ostale karakteristike prikazan je na slikama 5.7. i 5.8.



Slika 5.7. Prikaz odnosa nagiba vanjskog ukrucenja i momenta otpora



Slika 5.8. Prikaz odnosa nagiba vanjskog ukrucenja i širine poprečnog presjeka

Na temelju dobivenih rezultata i traženja što boljeg odnosa između otpornosti i širine poprečnog presjeka, kao jedno od proizvoljnih ograničenja odabran je sljedeći raspon vrijednosti za nagib vanjskog ukrucenja:

$$30^{\circ} \leq \varphi \leq 60^{\circ} \quad (5.8)$$

5.4.2 Ukupna širina i visina poprečnog presjeka

Širina presjeka i nagib rubnog ukrućenja su usko povezani, ali sama širina presjeka može uvelike pogodno utjecati na druge karakteristike presjeka poput otpornosti elementa na bočno torzijsko izvijanje. Širina samog elementa nije uvelike ograničavajući faktor za razliku od visine poprečnog presjeka, a donosi određene prednosti uz ne tako veliko povećanje utroška samog materijala (zbog male debljine stijenke). Kao početna pretpostavka iznalaženja geometrije presjeka, ograničenje ukupne širine provest će se prema sljedećim izrazima za najmanju i najveću moguću širinu:

$$b_{uk} = 2 \cdot b_{IPE} \quad \text{do} \quad b_{uk} = 2,5 \cdot b_{IPE}$$

Iznosi odabranih graničnih širina presjeka dani su u tablici 5.3.

Tablica 5.3. Granične vrijednosti širina optimiziranih presjeka ovisno o širini IPE profila

Presjek	Širina IPE [mm]	Širina presjeka za $b_{IPE} \times 2$ [mm]	Širina presjeka za $b_{IPE} \times 2,5$ [mm]
IPE 80	46	92	115
IPE 100	55	110	137,5
IPE 120	64	128	160
IPE 140	73	146	182,5
IPE 160	82	164	205
IPE 180	91	182	227,5
IPE 200	100	200	250
IPE 220	110	220	275
IPE 240	120	240	300
IPE 270	135	270	337,5
IPE 300	150	300	375
IPE 330	160	320	400
IPE 360	170	340	425
IPE 400	180	360	450
IPE 450	190	380	475
IPE 500	200	400	500
IPE 550	210	420	525
IPE 600	220	440	550

Kako je već spomenuto, ukupna visina poprečnog presjeka mora imati strože uvjete u odnosu na širinu zbog toga kako se debljina međukatne konstrukcije ili debljina krovne konstrukcije, točnije pokrova u sustavu u kojemu je element podrožnica, ne bi značajno povećala. S većom visinom elementa smanjuje se raspoloživa visina prostora, što dovodi do potrebe za preinakom i u krajnosti većom ukupnom visinom objekta. Uz to, značajnije debljine međukatne ili krovne konstrukcije mogu dovesti do narušavanja estetskog dojma građevine.

Kao početna pretpostavka optimizacije presjeka, ograničenje ukupne visine provest će se prema sljedećim izrazima za najmanju moguću i najveću dozvoljenu visinu:

$$h_{uk} = h_{IPE} \quad \text{do} \quad h_{uk} = h_{IPE} + 100 \text{ [mm]}$$

Iznosi odabranih graničnih visina presjeka dani su u tablici 5.4.

Tablica 5.4. Granične vrijednosti visina optimiziranih presjeka ovisno o visini IPE profila

Presjek	Minimalna visina presjeka [mm]	Maksimalna visina presjeka [mm]
IPE 80	80	180
IPE 100	100	200
IPE 120	120	220
IPE 140	140	240
IPE 160	160	260
IPE 180	180	280
IPE 200	200	300
IPE 220	220	320
IPE 240	240	340
IPE 270	270	370
IPE 300	300	400
IPE 330	330	430
IPE 360	360	460
IPE 400	400	500
IPE 450	450	550
IPE 500	500	600
IPE 550	550	650
IPE 600	600	700

Vrijednosti dane u tablici 5.4. smatraju se mjerodavnima u odnosu na maksimalne vrijednosti visine presjeka dane u tablici 5.3.

5.5 Geometrijske karakteristike bruto presjeka

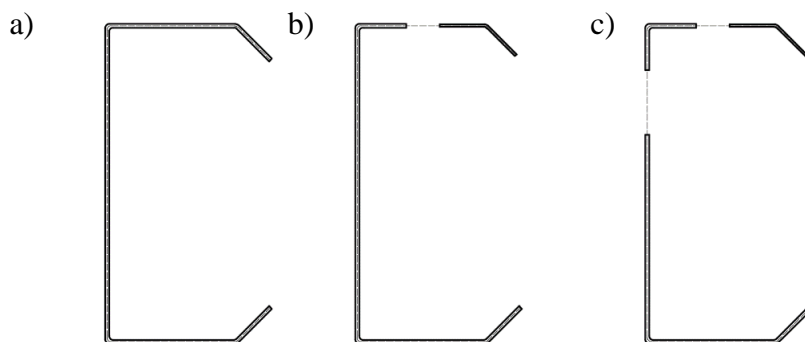
Početne vrijednosti karakteristika poprečnog presjeka dobivene su na temelju bruto poprečnog presjeka, tj. na presjeku bez redukcija. Time se dobivaju veći iznosi otpornosti u odnosu na konačnu dobivenu otpornost presjeka i elementa te se prilikom odabira presjeka treba imati u vidu da će početne vrijednosti otpornosti, u odnosu na konačne, biti manje.

Parametar na temelju kojeg su se odabirale geometrijske karakteristike profila (h , b , c , t) je moment otpora W_y o kojemu najviše ovisi otpornost.

Prilikom iznalaženja geometrije početnog bruto presjeka, korišteni su izrazi iz točke 4.4.1.

5.6 Proračun efektivnog presjeka

Proračun efektivnog presjeka svakog odabranog profila provodi se prema preporukama danima u [4]. Dobivene vrijednosti $W_{y,eff}$ na temelju određenog efektivnog presjeka smatraju se mjerodavnima i konačnim vrijednostima za određivanje otpornosti poprečnog presjeka na savijanje i otpornosti elementa na savijanje. U slučaju da neki od odabranih profila nije davao poželjne rezultate, bilo je potrebno naći presjek s drugim geometrijskim karakteristikama pridržavajući se time svih navedenih ograničenja danima u prethodnim točkama. Proračun efektivnog presjeka detaljnije je obrađen u poglavlju 7, slika 5.9.



Slika 5.9. a) Prikaz bruto HOP presjeka b) Redukcija prilikom proračuna efektivnog presjeka
c) Prikaz efektivnog presjeka

5.7 Odabrani optimizirani profili

Prilikom određivanja mjerodavnog intervala raspona optimiziranih profila bilo je potrebno odrediti za koje geometrijske vrijednosti je moguće iznaći presjeka poželjnih karakteristika. Potrebno je usporediti geometrijske karakteristike IPE profila s vrijednostima geometrijskih karakteristika HOP profila donje granice (vrijednosti definirane s minimalnim dopuštenim vrijednostima ograničenja danima u tablicama 5.2., 5.3, i 5.4.) i s vrijednostima geometrijskih karakteristika HOP profila gornje granice (vrijednosti definirane s maksimalnim dopuštenim vrijednostima ograničenja danima u tablicama 5.2., 5.3, i 5.4.). Rezultati usporedbe prikazani su na slikama 5.10. i 5.11.

Sukladno navedenome, područje razmatranja možemo podijeliti na tri dijela:

1) ŽUTO PODRUČJE – područje u kojem je $W_{y,el} \text{ HOP} > W_{y,pl} \text{ IPE}$

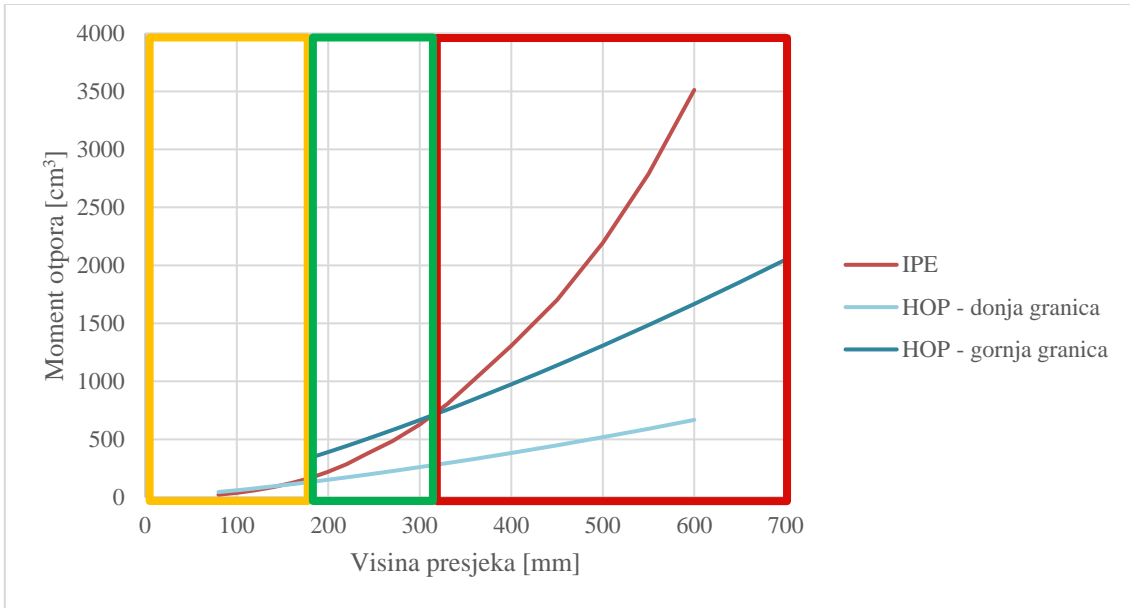
Poprečni presjeci se ne uzimaju u obzir zbog toga jer bi se za isplativi presjek trebala smanjiti visina. S obzirom da se u tom području nalaze profili malih visina (80, 100, 120, 140, 160 mm), neisplativo je razmatrati potencijalne manje visine presjeka za rješenje problema u tom području zbog velike vitkosti tih profila na traženom rasponu.

2) ZELENO PODRUČJE – područje u kojem je $W_{y,el} \text{ HOP} \approx W_{y,pl} \text{ IPE}$

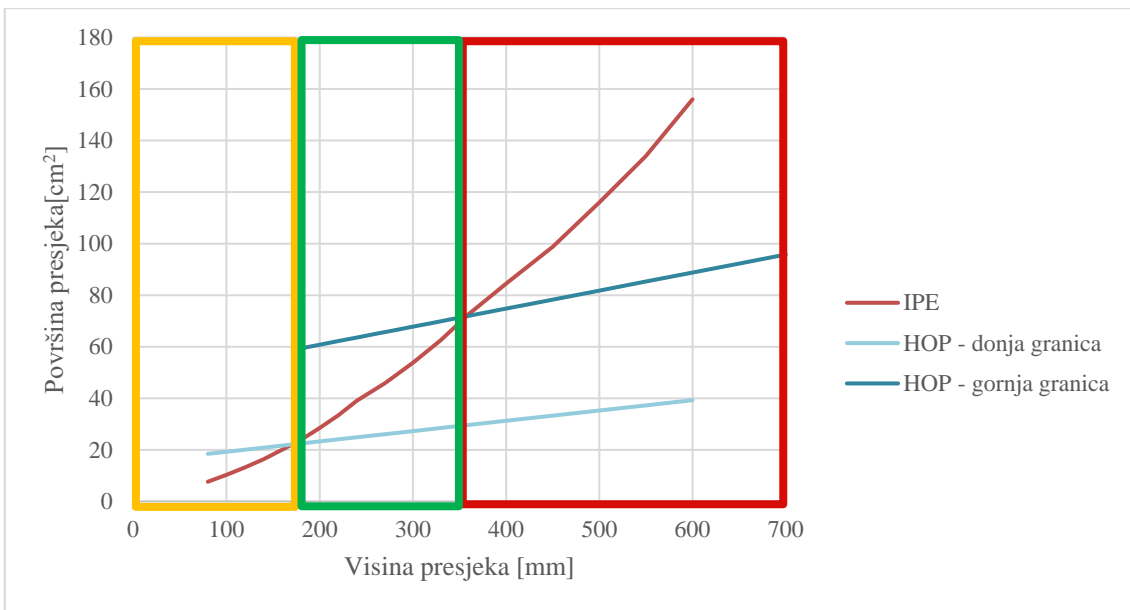
Područje u kojem se traže potencijalni profili za HOP presjek, slika 5.12.

3) CRVENO PODRUČJE – područje u kojem je $W_{y,el} \text{ HOP} < W_{y,pl} \text{ IPE}$

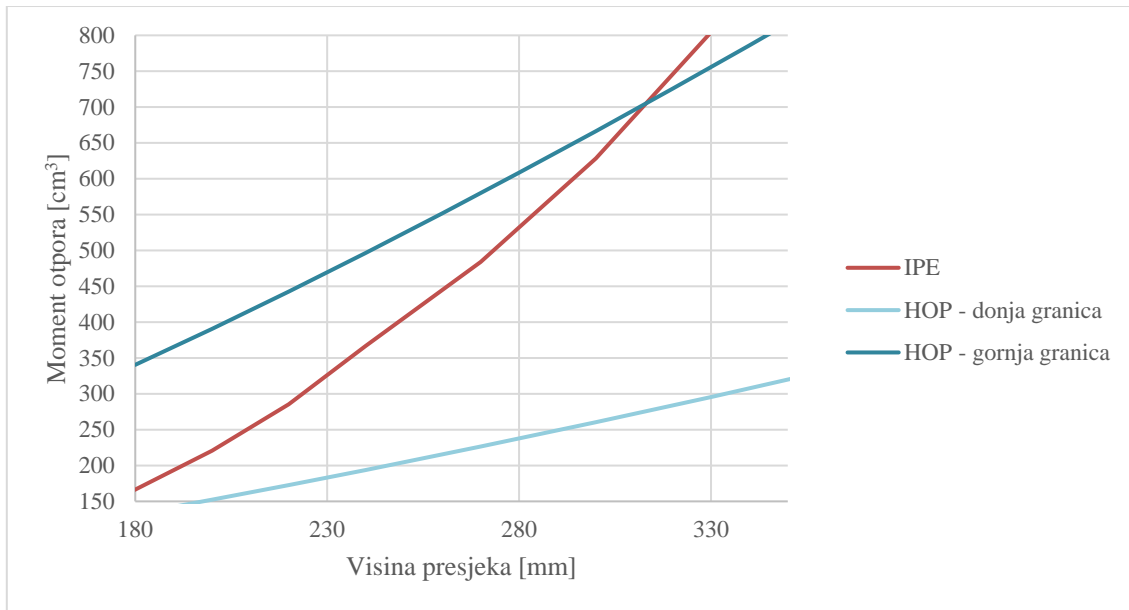
Područje u kojem IPE profili imaju veći moment otpora W_y nego što bi imali potencijalni HOP profili.



Slika 5.10. Prikaz odnosa visine presjeka i momenta otpora



Slika 5.11. Prikaz odnosa visine presjeka i površine presjeka



Slika 5.12. Odnos visine presjeka i momenta otpora - Zeleno područje

S obzirom na definirane parametre, odabrani HOP profili za daljnje razmatranje dani su u tablicama 5.5. i 5.6.

Tablica 5.5. Osnovne geometrijske karakteristike HOP profila

Profil	G [kg/m]	c [mm]	b [mm]	h [mm]	t [mm]	r [mm]	ϕ [°]	A[cm ²]
HOP 280	18,74	30,0	70,0	277,5	2,5	2,1	30	23,88
HOP 300	20,31	30,0	80,0	297,5	2,5	2,1	30	25,88
HOP 320	21,88	30,0	90,0	317,5	2,5	2,1	30	27,88
HOP 340	27,18	30,0	90,0	337,0	3,0	2,5	30	34,62

Tablica 5.6. Bruto geometrijske karakteristike HOP profila

Profil	I_y [cm ⁴]	W_y [cm ³]	i_y [cm]	I_z [cm ⁴]	W_z [cm ³]	i_z [cm]	I_t [cm ⁴]	I_w [cm ⁶]
HOP 280	2755,39	196,81	1,07	335,44	44,55	0,38	1,37	$6,63 \cdot 10^4$
HOP 300	3466,39	231,09	1,16	447,23	53,99	0,42	1,47	$10,13 \cdot 10^4$
HOP 320	4288,63	268,04	1,24	581,27	64,32	0,46	1,57	$14,95 \cdot 10^4$
HOP 340	5913,91	347,88	1,31	702,11	76,96	0,45	2,88	$20,09 \cdot 10^4$

6 OTPORNOST TOPLO VALJANOG PROFILA NA SAVIJANJE

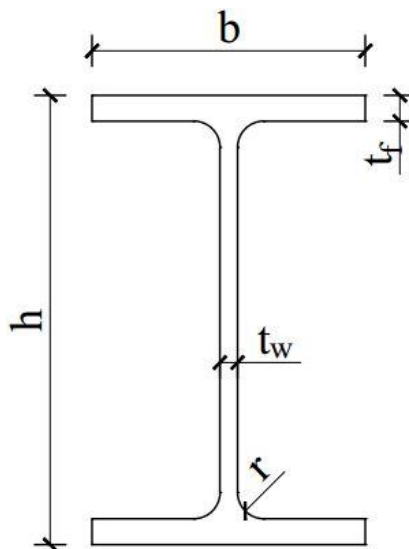
6.1 Uvod

U ovom poglavlju objašnjen je primjer proračuna otpornosti IPE profila na razini poprečnog presjeka i elementa. Proračun je prikazan na primjeru jednog odabranog profila, dok su ostali razmatrani profili proračunati na isti način.

Kao ogledni tip profila u ovom poglavlju odabran je profil IPE 240 (slika 6.1.) s geometrijskim karakteristikama danima u tablici 6.1.

Tablica 6.1. Geometrijske karakteristike profila IPE240

Visina presjeka	$h = 240 \text{ mm}$
Širina pojasnice	$b = 120 \text{ mm}$
Debljina hrpta	$t_w = 6,2 \text{ mm}$
Debljina pojasnice	$t_f = 9,8 \text{ mm}$
Radijus zaobljenja	$r = 15 \text{ mm}$



Slika 6.1. Prikaz geometrije IPE profila

Ostali početni zadani parametri su:

$E = 210\,000\text{ N/mm}^2$ modul elastičnosti čelika

$\nu = 0,3$ Poissonov koeficijent

$G = 80\,770\text{ N/mm}^2$ modul posmika

6.2 Proračun osnovnih parametara IPE profila

Tri glavna parametra za usporedbu profila su:

- **visina poprečnog presjeka** (ograničenje visine elementa),
- **površina poprečnog presjeka** (utrošak čelika po dužini elementa),
- **moment površine 2. stupnja poprečnog presjeka** (otpornost na savijanje).

U sljedećim točkama proračunate su vrijednosti za svaki od navedenih parametara koji su kasnije uspoređeni sa HOP hladno oblikovanim tankostijenim profilom.

6.2.1 Visina poprečnog presjeka IPE profila

S obzirom na to da su IPE profili standardizirani, tako im je definirana i jasna visina presjeka te nema nikakve mogućnosti promjene visine samog presjeka. Visina pojedinog profila je dana u nazivu samog profila, npr. za profil IPE 240 visina presjeka iznosi 240 mm. Vrijednosti visina svih standardiziranih IPE profila su dane u tablici 6.2.

Tablica 6.2. Visine IPE profila

Presjek	Visina presjeka [mm]
IPE 80	80
IPE 100	100
IPE 120	120
IPE 140	140
IPE 160	160
IPE 180	180
IPE 200	200
IPE 220	220
IPE 240	240
IPE 270	270
IPE 300	300
IPE 330	330
IPE 360	360
IPE 400	400
IPE 450	450
IPE 500	500
IPE 550	550
IPE 600	600

6.2.2 Površina poprečnog presjeka IPE profila

Prema slici 6.1., površina IPE, kao i svakog drugog srodnog presjeka, dobiva se prema izrazu (4.1). Uz uvrštene zadane vrijednosti za profil IPE 240:

$$h_w = 240 - 2 \cdot 9,8 = 220,4 \text{ mm}$$

$$A = 4 \left[\frac{1}{2} \left(120,0 \cdot 9,8 + \frac{220,4 \cdot 6,2}{2} \right) + 15,0^2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right]$$

Konačni rezultat:

$$A = 3911,62 \text{ mm}^2 = 39,11 \text{ cm}^2$$

Na isti način dobivene su vrijednosti za ostale presjeka, a rezultati su prikazani u tablici 6.3.

Tablica 6.3. Površine IPE profila

Presjek	Površina presjeka [cm ²]
IPE 80	7,64
IPE 100	10,3
IPE 120	13,2
IPE 140	16,4
IPE 160	20,1
IPE 180	23,9
IPE 200	28,5
IPE 220	33,4
IPE 240	39,1
IPE 270	45,9
IPE 300	53,8
IPE 330	62,6
IPE 360	72,7
IPE 400	84,5
IPE 450	98,8
IPE 500	116
IPE 550	134
IPE 600	156

Za dobivene vrijednosti površine pojedinog IPE profila moguće je i izračunati utrošak materijala po metru dužnom na sljedeći način:

$$G_i = \rho_s \cdot A_i \quad (6.1)$$

gdje su:

$$\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$$

gustoća čelika

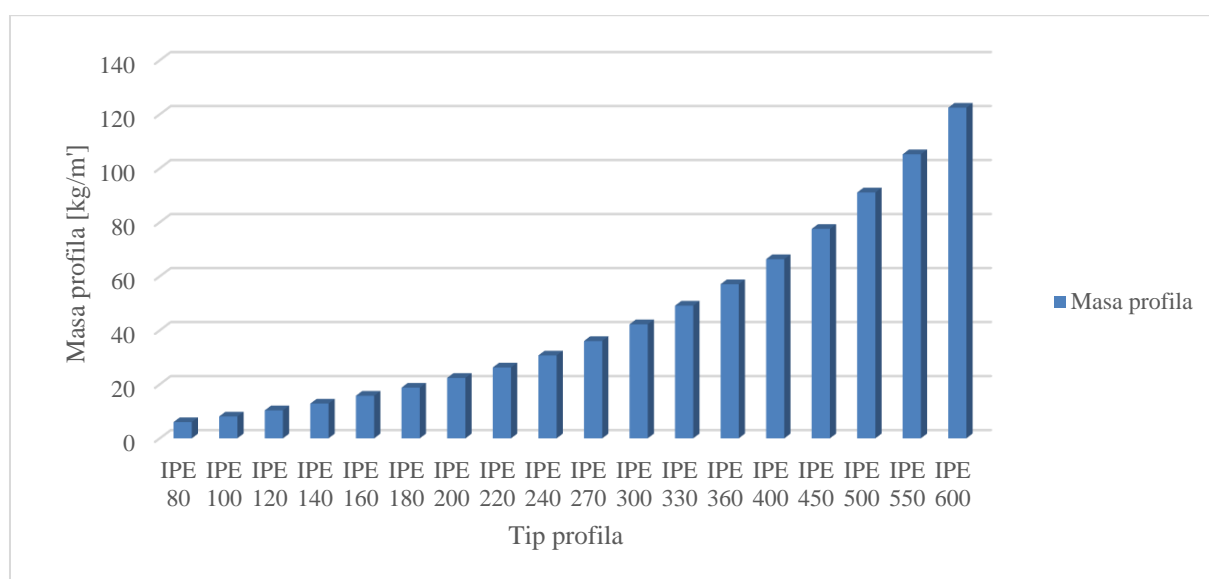
A_i

površina pojedinog profila

Vrijednosti mase IPE profila dani su tablično (tablica 6.4.) i grafički (slika 6.2.).

Tablica 6.4. Masa IPE profila po metru dužnom

Presjek	Masa profila [kg/m']
IPE 80	6
IPE 100	8,09
IPE 120	10,36
IPE 140	12,87
IPE 160	15,78
IPE 180	18,76
IPE 200	22,37
IPE 220	26,22
IPE 240	30,69
IPE 270	36,03
IPE 300	42,23
IPE 330	49,14
IPE 360	57,07
IPE 400	66,33
IPE 450	77,56
IPE 500	91,06
IPE 550	105,19
IPE 600	122,46



Slika 6.2. Prikaz masa pojedinih IPE profila (utroška čelika)

6.2.3 Moment površine 2. stupnja poprečnog presjeka IPE profila

Moment površine 2. stupnja I_y za IPE profile definiran je prema izrazu (4.2). Uz uvrštene zadane vrijednosti za profil IPE 240:

$$h_w = 240 - 2 \cdot 9,8 = 220,4 \text{ mm}$$

$$I_{y,1} = \frac{120,0 \cdot (9,8)^3}{24} + \frac{120,0 \cdot 9,8}{2} \cdot \left(\frac{240,0 - 9,8}{2} \right)^2$$

$$I_{y,2} = \frac{6,2 \cdot 220,4^3}{48}$$

$$I_{y,3} = \frac{15^4}{12} + 15^2 \cdot \left(\frac{220,4 - 15,0}{2} \right)^2$$

$$I_{y,4} = -\frac{(9\pi^2 - 64) \cdot 15^4}{144\pi} - \frac{15^2 \pi}{4} \cdot \left(\frac{220,4}{2} - 15 + \frac{60,0}{3\pi} \right)^2$$

Konačni rezultat:

$$I_y = 38916262,4 \text{ mm}^4$$

Na isti način dobivene su vrijednosti i za ostale presjeke, a rezultati su prikazani u tablici 6.5.

Tablica 6.5. *Momenti površine 2. stupnja IPE profila*

Presjek	Moment površine 2. stupnja [cm ⁴]
IPE 80	80,14
IPE 100	117
IPE 120	317,8
IPE 140	541,2
IPE 160	869,3
IPE 180	1317
IPE 200	1943
IPE 220	2772
IPE 240	3892
IPE 270	5790
IPE 300	8356
IPE 330	11770
IPE 360	16270
IPE 400	23130
IPE 450	33740
IPE 500	48200
IPE 550	67120
IPE 600	92080

Nakon što su dobivene vrijednosti momenta površine 2. stupnja I_y , u sljedećoj točki proračunate su vrijednosti momenta otpora W_y , koji je u izravnoj vezi s momentom površine 2. stupnja i koji je potreban prilikom određivanja otpornosti poprečnog presjeka i otpornosti elementa na savijanje.

6.2.4 Moment otpora poprečnog presjeka IPE profila

S obzirom da postoje tri tipa momenta otpora poprečnog presjeka:

- plastični moment otpora W_{pl} ,
- elastični moment otpora W_{el} ,
- efektivni moment otpora W_{eff} ,

potrebno je odrediti razred kojem pripada traženi poprečni presjek kako bi mu se pridodala mjerodavna vrijednost momenta otpora i samim time izračunala otpornost na savijanje. Vrijednost elastičnog momenta otpora $W_{y,el}$ za IPE profile definiran je prema izrazu (4.19). Uz uvrštene zadane vrijednosti za profil IPE 240:

$$W_{el,y} = \frac{2 \cdot 38916262,4}{240,0} = 324302,19 \text{ mm}^3$$

Vrijednost plastičnog momenta otpora $W_{y,pl}$ za IPE profile definiran je prema izrazu (4.20). Uz uvrštene zadane vrijednosti za profil IPE 240:

$$h_w = 240 - 2 \cdot 9,8 = 220,4 \text{ mm}$$

$$W_{pl,y,1} = \frac{120}{2} \cdot 9,8 \cdot \left(\frac{240 - 9,8}{2} \right)$$

$$W_{pl,y,2} = \frac{1}{16} \cdot (6,2 \cdot 220,4^2)$$

$$W_{pl,y,3} = 15,0^2 \cdot \left(\frac{220,40 - 15,0}{2} \right)$$

$$W_{pl,y,4} = -\frac{15^2 \pi}{4} \cdot \left(\frac{220,40}{2} - 15,0 + \frac{60,0}{3\pi} \right)$$

Konačni rezultat:

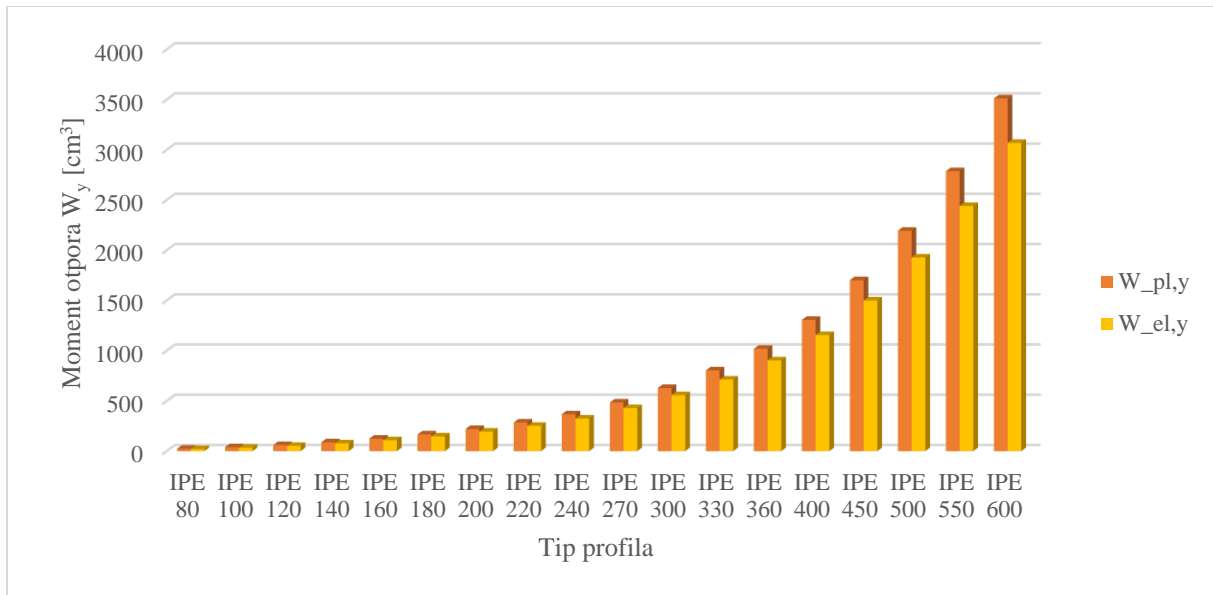
$$W_{pl,y} = 366645,33 \text{ mm}^3$$

Vidljivo je kako se za isti presjek profila, vrijednosti $W_{pl,y}$ i $W_{el,y}$ uvelike razlikuju, stoga je potrebna velika pažnja prilikom procjene razredbe kako se ne bi krivo odredila otpornost presjeka i elementa i samim time dovela u pitanje pouzdanost konstrukcije u kojoj se nalazi takav element.

Koristeći isti proračun, dobivene su vrijednosti i za ostale profile, a rezultati su prikazani tablično (tablica 6.6.) i grafički (slika 6.3.).

Tablica 6.6. *Momenti otpora IPE profila*

Presjek	Elastični moment otpora [cm³]	Plastični moment otpora [cm³]
IPE 80	20,03	23,22
IPE 100	34,2	39,41
IPE 120	52,96	60,73
IPE 140	77,32	88,34
IPE 160	108,7	123,9
IPE 180	146,3	166,4
IPE 200	194,3	220,6
IPE 220	252	285,4
IPE 240	324,3	366,6
IPE 270	428,9	484
IPE 300	557,1	628,4
IPE 330	713,1	804,3
IPE 360	903,6	1019
IPE 400	1156	1307
IPE 450	1500	1702
IPE 500	1928	2194
IPE 550	2441	2787
IPE 600	3069	3512



Slika 6.3. Prikaz usporednih vrijednosti elastičnog i plastičnog momenta otpora

6.3 Razredba presjeka i otpornost poprečnog presjeka na savijanje

6.3.1 Razredba IPE presjeka

Otpornost na savijanje oko jače osi presjeka dobiva se prema izrazima:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{y,pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{za razrede presjeka 1 i 2} \quad (6.2)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{y,el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{za razred presjeka 3} \quad (6.3)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{y,eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{za razred presjeka 4} \quad (6.4)$$

U gornjim izrazima oznake su sljedeće:

$W_{y,pl}$ plastični moment otpora (razred 1 i 2),

$W_{y,el}$ elastični moment otpora (razred 3),

$W_{y,eff}$ efektivni moment otpora (razred 4),

γ_{M0} parcijalni faktor,

f_y granica popuštanja čelika.

Odabrane vrijednosti parametara za proračun:

$$f_y = 355,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

Vidljivo je da uz geometrijske karakteristike profila koje rezultiraju određenim vrijednostima momenta otpora W_y , drugi bitni parametri koji ulaze u proračun otpornosti presjeka na savijanje su kvaliteta čelika, točnije njegova granica popuštanja f_y i parcijalni faktor γ_{M0} . Kako su vrijednosti parametara f_y i γ_{M0} isti za svaku od mogućih proračunatih vrijednosti, potrebno je odrediti razred traženog presjeka koji prema [3] za dio presjeka izložen savijanju ovisi o:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon \quad \text{za razred presjeka 1} \quad (6.5)$$

$$\frac{c}{t} \leq 83\varepsilon \quad \text{za razred presjeka 2} \quad (6.6)$$

$$\frac{c}{t} \leq 124\varepsilon \quad \text{za razred presjeka 3} \quad (6.7)$$

te za dio presjeka izložen tlačnoj sili:

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon \quad \text{za razred presjeka 1} \quad (6.8)$$

$$\frac{c}{t} \leq 10\varepsilon \quad \text{za razred presjeka 2} \quad (6.9)$$

$$\frac{c}{t} \leq 14\varepsilon \quad \text{za razred presjeka 3} \quad (6.10)$$

gdje su:

$$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r \quad \text{za hrbat} \quad (6.11)$$

$$c = \frac{b - t_w}{2} - r \quad \text{za pojasnicu} \quad (6.12)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (6.13)$$

Uz uvrštene zadane vrijednosti za profil IPE 240:

a) Hrbat

$$c = h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 240 - 2 \cdot 9,8 - 2 \cdot 15,0 = 190,4 \text{ mm}$$

Uvjet za razred 1:

$$\frac{c}{t} \leq 72 \cdot \varepsilon ; \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

$$\frac{c}{t} = \frac{c}{t_w} = \frac{190,40}{6,2} = 30,71 \leq 72 \cdot \varepsilon = 72,0 \cdot 0,81 = 58,32 \rightarrow \text{Hrbat je razred I}$$

b) Pojasnica

$$c = \frac{b - t_w}{2} - r = \frac{120,0 - 6,2}{2} - 15,0 = 41,9 \text{ mm}$$

Uvjet za razred 1:

$$\frac{c}{t} \leq 72 \cdot \varepsilon ; \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

$$\frac{c}{t} = \frac{c}{t_f} = \frac{41,90}{9,8} = 4,28 \leq 9 \cdot \varepsilon = 9,0 \cdot 0,81 = 7,29 \rightarrow \text{Pojasnica je razred I}$$

Rezultat proračuna pokazuje da se poprečni presjek može svrstati u razred presjeka 1 te da se otpornost presjeka i elementa računa koristeći plastični moment otpora W_{pl} . Analogno tome, dobiveni su sljedeći razredi presjeka za sve IPE profile u tablici 6.7.

Tablica 6.7. Razredi poprečnih presjeka profila

Presjek	Razred presjeka
IPE 80	Razred 1
IPE 100	Razred 1
IPE 120	Razred 1
IPE 140	Razred 1
IPE 160	Razred 1
IPE 180	Razred 1
IPE 200	Razred 1
IPE 220	Razred 1
IPE 240	Razred 1
IPE 270	Razred 1
IPE 300	Razred 1
IPE 330	Razred 1
IPE 360	Razred 1
IPE 400	Razred 1
IPE 450	Razred 1
IPE 500	Razred 1
IPE 550	Razred 1
IPE 600	Razred 1

6.3.2 Otpornost presjeka IPE profila na savijanje

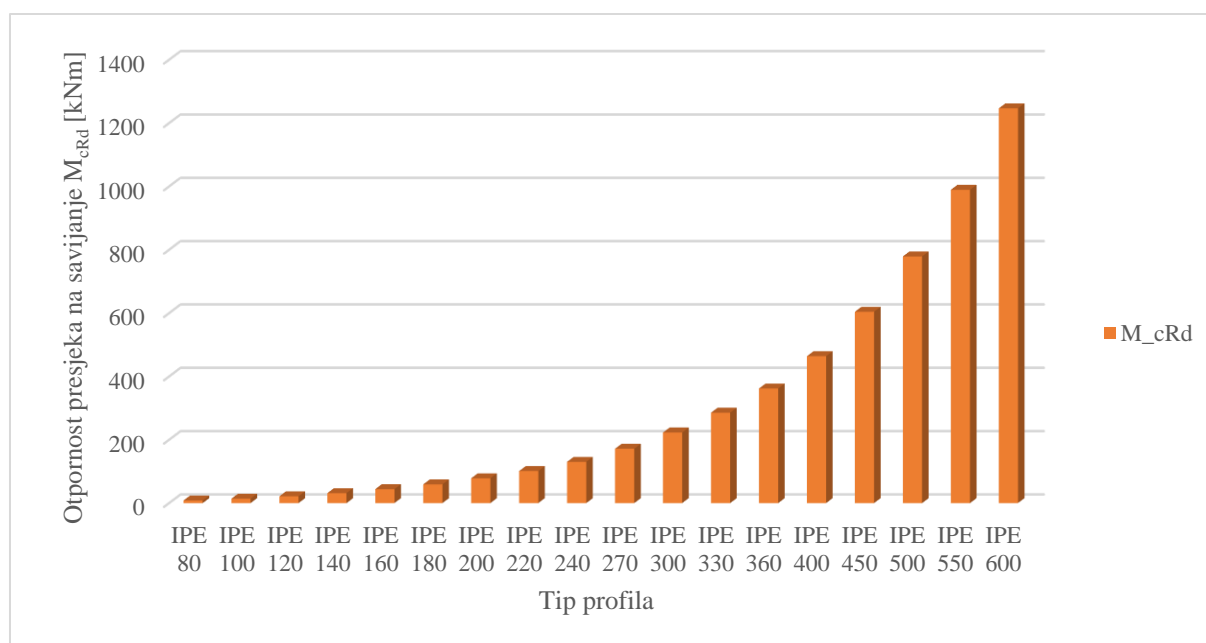
Otpornost na savijanje poprečnog presjeka računa se prema (6.2). Uz uvrštene zadane vrijednosti za profil IPE240:

$$M_{c,Rd} = \frac{366,6 \cdot 35,5}{1,0} = 13014,3 \text{ kNcm} = 130,14 \text{ kNm}$$

Ostale vrijednosti otpornosti presjeka dobivene su koristeći isti izraz te su prikazane tablično (tablica 6.8.) i grafički (slika 6.4.).

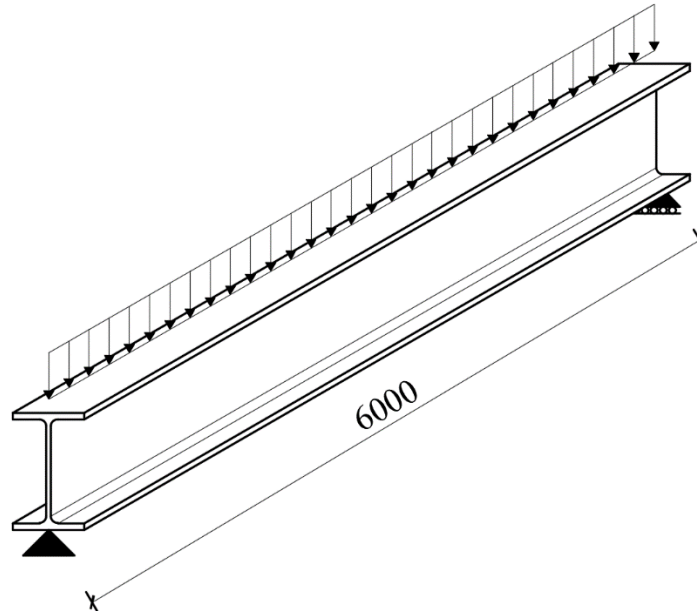
Tablica 6.8. Otpornost IPE presjeka na savijanje

Presjek	Otpornost presjeka na savijanje M_{cRd} [kNm]
IPE 80	8,24
IPE 100	13,99
IPE 120	21,56
IPE 140	31,36
IPE 160	43,98
IPE 180	59,07
IPE 200	78,31
IPE 220	101,32
IPE 240	130,14
IPE 270	171,82
IPE 300	223,08
IPE 330	285,53
IPE 360	361,75
IPE 400	463,99
IPE 450	604,21
IPE 500	778,87
IPE 550	989,39
IPE 600	1246,76

**Slika 6.4.** Prikaz otpornosti poprečnog presjeka IPE profila na savijanje

6.4 Otpornost elementa IPE profila na savijanje

6.4.1 Elastični kritični moment bočnog torzijskog izvijanja



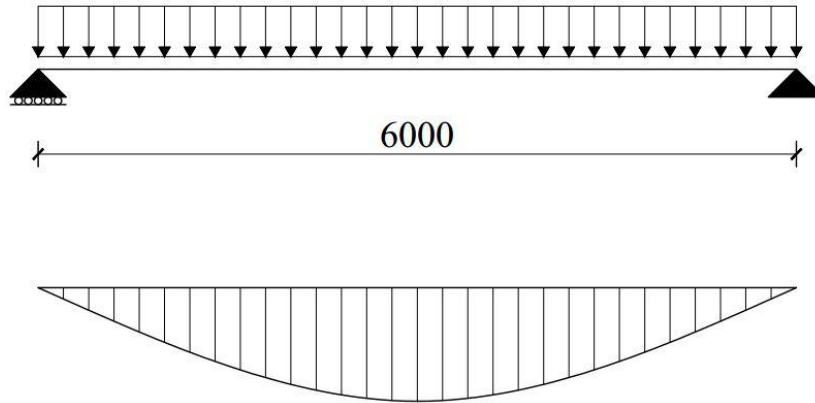
Slika 6.5. Prikaz statičkog sustava IPE nosača

Elastični kritični moment bočnog torzijskog izvijanja:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right] \quad (6.14)$$

Prema [20] u gornjem izrazu oznake su sljedeće:

E	modul elastičnosti,
G	modul posmika,
I_w	konstanta krivljenja,
I_z	moment površine 2. stupnja oko slabije osi presjeka,
I_t	torzijska konstanta,
z_g	razmak između točke djelovanja opterećenja i centra posmika,
L	dužina nosača između točaka pridržanja,
k, k_w	faktori dužine izvijanja.



Slika 6.6. Prikaz statičkog sustava IPE nosača i oblika momentnog dijagrama

Faktori C_1 i C_2 ovise o:

- svojstvima presjeka,
- uvjetima oslanjanja,
- obliku momentnog dijagrama.

Za slučaj slobodno oslonjenog nosača, vrijednosti koeficijenata su [20]:

$$C_1 = 1,127,$$

$$C_2 = 0,454,$$

dok su vrijednosti faktora dužine izvijanja [20]:

$$k = k_w = 1,0$$

Moment površine 2. stupnja IPE profila oko slabije osi računa se prema (4.8). Uz uvrštene zadane vrijednosti za profil IPE 240:

$$h_w = 240 - 2 \cdot 9,8 = 220,4 \text{ mm}$$

$$I_{z,1} = \frac{9,8 \cdot 120,0^3}{24}$$

$$I_{z,2} = \frac{220,40 \cdot 6,2^3}{48}$$

$$I_{z,3} = \frac{15,0^4}{12} + 15,0^2 \cdot \left(\frac{6,2 + 15,0}{2} \right)^2$$

$$I_{z,4} = -\frac{(9\pi^2 - 64) \cdot 15,0^4}{144\pi} - \frac{15,0^2 \pi}{4} \cdot \left(\frac{6,2}{2} + 15,0 - \frac{60,0}{3\pi} \right)^2$$

Konačni rezultat:

$$I_z = 2836341,64 \text{ mm}^4 = 283,63 \text{ cm}^4$$

Torzijska konstanta za IPE profile računa se prema (4.14). Uz uvrštene zadane vrijednosti za profil IPE 240:

$$I_t = \frac{2}{3} \cdot (120 - 0,63 \cdot 9,8) \cdot 9,8^3 + \frac{1}{3} \cdot (240 - 2 \cdot 9,8) \cdot 6,2^3 +$$

$$+ 2 \cdot \frac{6,2}{9,8} \cdot \left(0,145 + 0,1 \cdot \frac{15,0}{9,8} \right) \cdot \left[\frac{\left(15,0 + \frac{6,2}{2} \right)^2 + (15,0 + 9,8)^2 - 15,0^2}{2 \cdot 15,0 + 9,8} \right]^4$$

Konačni rezultat:

$$I_t = 128798,12 \text{ mm}^4 = 12,88 \text{ cm}^4$$

Konstanta krivljena za IPE profile dobiva se koristeći izraz (4.18). Uz uvrštene zadane vrijednosti za profil IPE 240:

$$I_w = \frac{9,8 \cdot 120,0^3}{24} \cdot (240,0 - 9,8)^2 = 3,739 \cdot 10^{10} \text{ mm}^6 = 37391,18 \text{ cm}^6$$

Nakon izračuna svih komponenti, dobiven je elastični kritični moment:

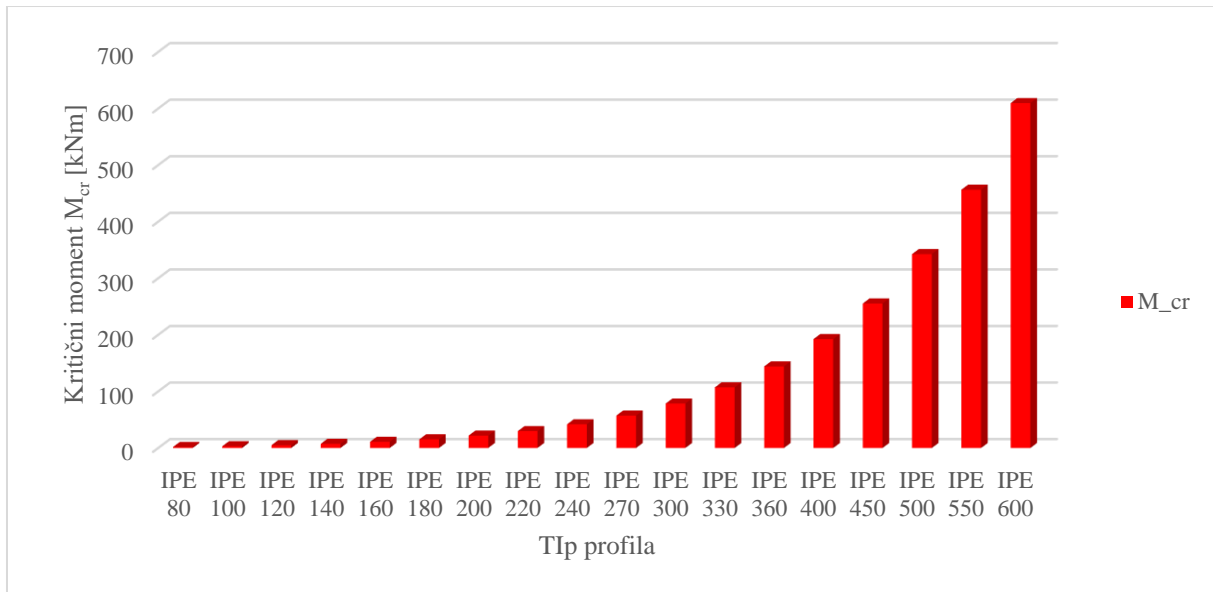
$$M_{cr} = 1,127 \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 283,63}{600^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{37391,18}{283,63} + \frac{600^2 \cdot 8077 \cdot 12,88}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 283,63} + (0,454 \cdot 12,0)^2} - 0,454 \cdot 12,0 \right]$$

$$= 4197,97 \text{ kNcm} = 41,98 \text{ kNm}$$

Vrijednosti elastičnog kritičnog momenta za ostale presjeka dane su u tablici 6.9. te na slici 6.7.

Tablica 6.9. Vrijednosti elastičnog kritičnog momenta za IPE profile

Presjek	Elastični kritični moment M_{cr} [kNm]
IPE 80	1,7875
IPE 100	3,1674
IPE 120	4,9618
IPE 140	7,4166
IPE 160	11,0086
IPE 180	15,3297
IPE 200	21,9304
IPE 220	29,9294
IPE 240	41,9782
IPE 270	57,3265
IPE 300	78,6167
IPE 330	107,215
IPE 360	144,2424
IPE 400	192,5004
IPE 450	255,4477
IPE 500	342,7325
IPE 550	456,5246
IPE 600	609,6824



Slika 6.7. Prikaz vrijednosti elastičnog kritičnog momenta IPE profila

6.4.2 Proračun faktora redukcije i dobivanje otpornosti elementa na savijanje

Bezdimenzionalna vitkost:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{366,6 \cdot 35,5}{4197,97}} = 1,761 > \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,40$$

Faktor redukcije:

$$\frac{h}{b} = \frac{240}{120} = 2,00 \rightarrow \text{mjerodavna krivulja izvijanja } a \rightarrow \alpha_{LT} = 0,21$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,21 \cdot (1,761 - 0,2) + 1,761^2 \right] = 2,214$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{2,214 + \sqrt{2,214^2 - 1,761^2}} = 0,281 < 1,0$$

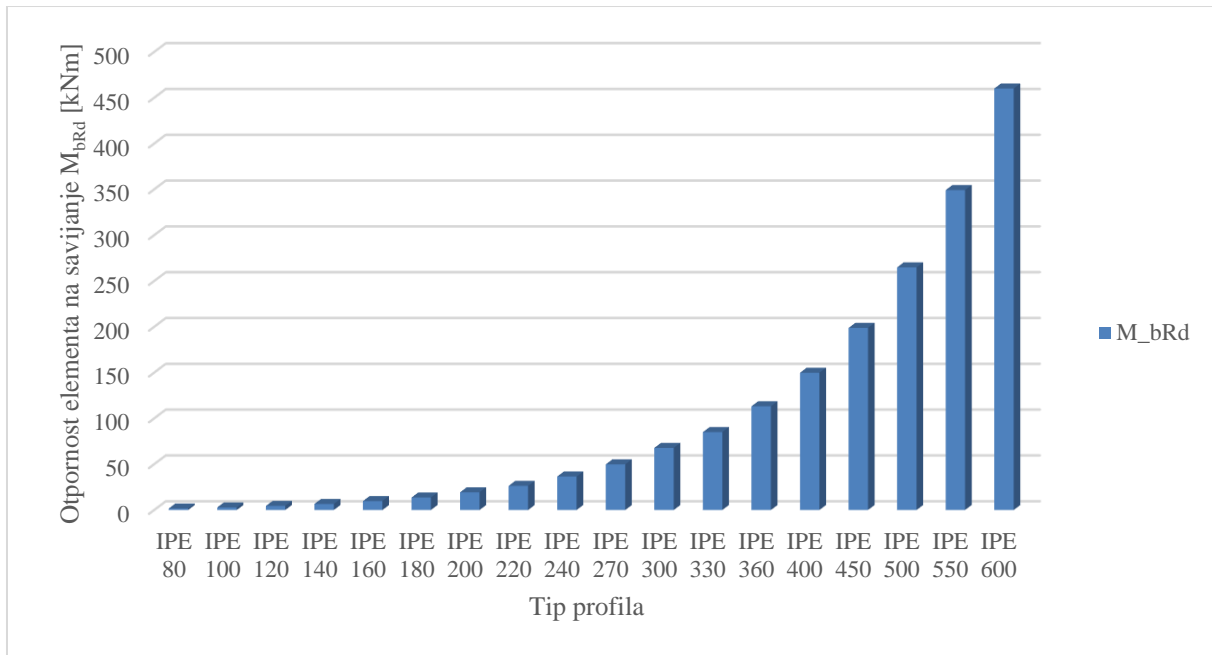
Računska otpornost:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,281 \cdot \frac{366,6 \cdot 35,5}{1,0} = 3657,02 \text{ kNcm} = 36,57 \text{ kNm}$$

Rezultati za ostale IPE profile dani su u tablici 6.10. i na slici 6.8.

Tablica 6.10. Otpornost elemenata IPE profila na savijanje

Presjek	Otpornost elementa na savijanje M_{bRd} [kNm]
IPE 80	1,61
IPE 100	2,84
IPE 120	4,46
IPE 140	6,65
IPE 160	9,81
IPE 180	13,65
IPE 200	19,34
IPE 220	26,34
IPE 240	36,57
IPE 270	49,83
IPE 300	67,82
IPE 330	85,09
IPE 360	113,23
IPE 400	149,87
IPE 450	198,79
IPE 500	264,82
IPE 550	349,25
IPE 600	460,05



Slika 6.8. Prikaz otpornosti elemenata na savijanje koristeći opću metodu

6.5 Kalibracija numeričkog modela

6.5.1 Uvod

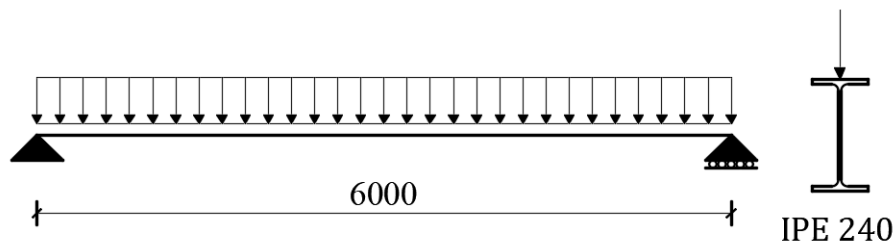
Metoda koja je u današnje vrijeme jako raširena u inženjerstvu i koja može riješiti najsloženije inženjerske probleme jest metoda konačnih elemenata. Gotovo svi kompjuterski programi za raznovrsne proračune baziraju se upravo na toj metodi. Međutim, iako je vrlo moćna, ne mora nužno značiti da pokazuje uvijek ispravne rezultate. Najčešće, netočni rezultati mogu biti posljedica ljudske pogreške ili nedovoljnog znanja, uvođenja pojednostavljenja kako bi se uštedjelo na vremenu, nesavršenosti računalnog programa itd. Zbog tih i sličnih razloga provodi se kalibracija modela. Obično se rješenja kalibriranog modela provjeravaju sa rješenjima za koja znamo da su točna ili su potvrđena ispitivanjem. Nakon kalibracije može se krenuti u daljnje istraživanje.

U ovom poglavlju modeliran je nosač izveden od profila IPE 240 opterećen na savijanje oko jače osi, raspona 6 metara. Model je kalibriran na temelju elastičnog kritičnog momenta, odnosno, numerička rješenja uspoređena su s analitičkim rješenjima i rješenjima iz programa LTBeam [21].

6.5.2 Opis kalibracijskog modela

Istraživanje je provedeno u komercijalnom programskom paketu Abaqus 6.14 [22]. S obzirom da je konačan rezultat otpornost elementa na savijanje, izvršena je analiza u literaturi poznata kao "GMNIA", odnosno *geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections included*. Analiza je provedena u dva koraka, linearna i nelinearna.

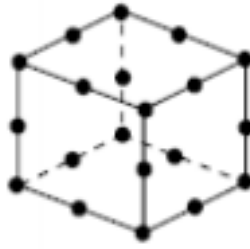
Statički sustav, prikazan na slici 6.9., jednostavno je oslonjen nosač koja ima viličasta pridrzanja na krajevima. Viličastim pridržanjima sprječavaju se bočni pomaci i torzija, dok je krivljenje presjeka na ležajevima dopušteno.



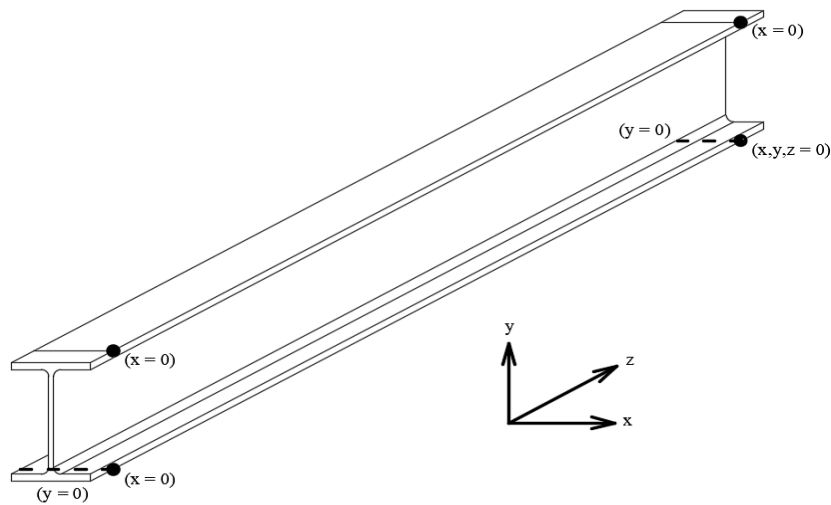
Slika 6.9. Statički sustav

Materijal korišten u linearnoj analizi je čelik s modulom elastičnosti $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$ i Poissonovim koeficijentom $\nu = 0,3$. Model je napravljen sa volumnim SOLID elementima iz razloga što radijus zaobljenja ima značajan utjecaj na torzijsku konstantu potrebnu za određivanje elastičnog kritičnog momenta [23], te bi modeliranje sa plošnim (SHELL) elementima bilo netočno i zahtijevalo bi velike prilagodbe da bi se došlo do točnog rezultata. Kroz cjelokupno istraživanje i na temelju brojnih rezultata analiza, utvrđeno je da je za ovakav model najbolje primijeniti tip konačnog elementa C3D20R. Riječima, svaki konačni element je kocka sa 20 čvorova i koristi kvadratnu interpolaciju te se ti elementi često nazivaju elementima drugog reda [24]. Također ovaj element koristi reduciranu integraciju, što može i ne mora utjecati na točnost rezultata.

Da bismo dobili kritični množitelj opterećenja koji uzrokuje bočno torzijsko izvijanje prvo je napravljena linearna elastična analiza izvijanja, tzv. "buckling" analiza. Ono što je traženo je prvi mod izvijanja i kao takav mjerodavan je za daljnju provedbu istraživanja. Kao što je već spomenuto, ležajni uvjeti su simulirani kao viličasti i prikazani su na slici 6.11.



Slika 6.10. Tip konačnog elementa [24]

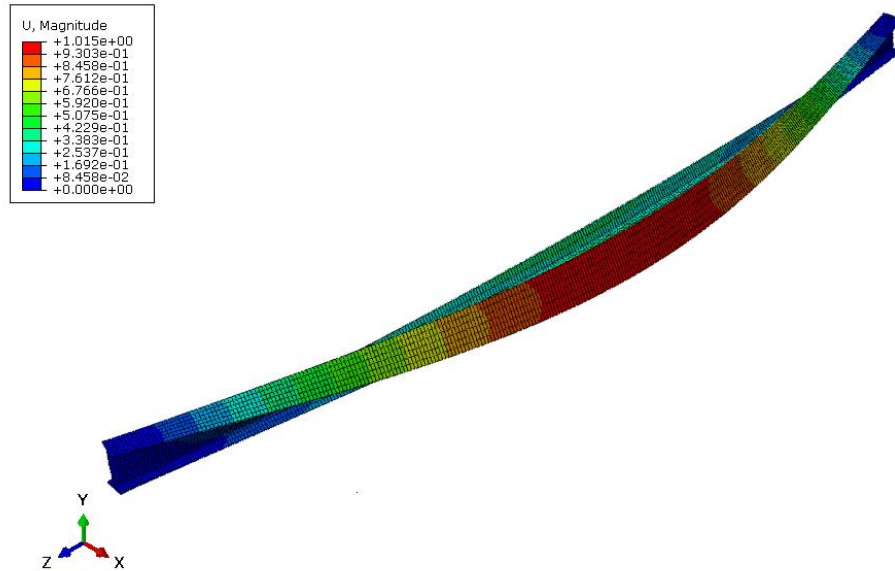


Slika 6.11. Simulacija viličastih pridržanja

Na slici 6.9. vidi se da je nosač centrično opterećen kontinuiranim opterećenjem. U Abaqus – u je ovo opterećenje uneseno kao niz koncentriranih sila od 100 N na razmacima od 10 cm duž nosača u smjeru gravitacije. Najveći moment savijanja na ovakvom statičkom sustavu je na sredini i za ovakav tip i vrijednost opterećenja iznosi 4,5 kNm. Množenjem kritičnog množitelja opterećenja sa najvećim momentom savijanja dobije se upravo M_{cr} , odnosno kritični elastični moment pri kojem dolazi do izvijanja nosača. Prikaz modela i oblika izvijanja dan je na slici 6.12. te je uz to u tablici 6.11. dana usporedba numeričkih rješenja sa analitičkim rješenjima i rezultatima iz programa LTBeam.

Programski paket kao što je Abaqus koristi se većinom u znanstveno istraživačke svrhe i nije primjenjiv za svakodnevnu inženjersku upotrebu. Njime doduše, možemo vjerno simulirati stvarno ponašanje materijala i ostalih karakteristika. Kako se u ovom istraživanju radi o čeliku, možemo reći da je njegova glavna prednost što je duktilan. Samim time, možemo iskoristiti

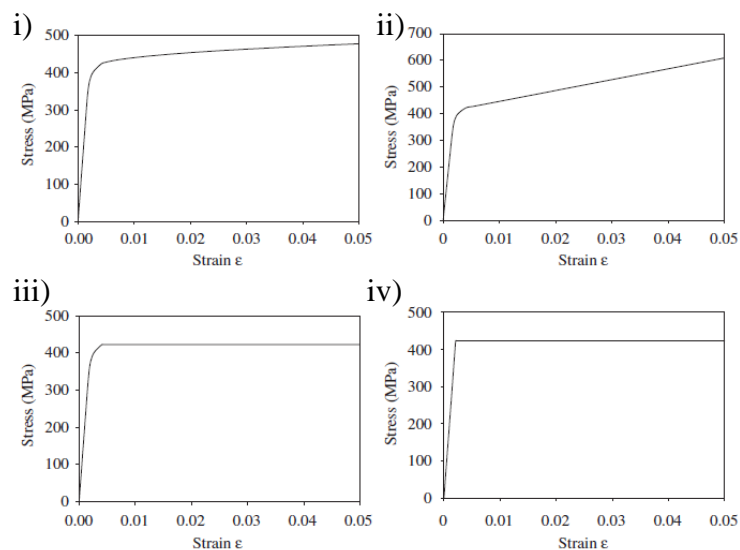
njegova plastična svojstva. Promatrajući $\sigma - \varepsilon$ dijagrame (naprezanje – deformacija) na slici 6.13., može se vidjeti kako postoji niz različitih načina kako se ponašanje materijala može definirati u programu.



Slika 6.12. Mjerodavan oblik izvijanja (bočno – torzijski mod)

Tablica 6.11. Usporedba analitičkih i numeričkih rezultata za IPE 240

Profil	M_{cr} [kNm] (Analitički)	M_{cr} [kNm] (Abaqus)	M_{cr} [kNm] (LTBeam)
IPE 240	41,98	41,59	41,78



Slika 6.13. Ponašanje čelika [25]

Budući da u svrhu ovog istraživanja nije provedeno ispitivanje u laboratoriju, nije bilo moguće definirati materijal kao što je prikazano u prva tri slučaja na slici 6.13. Iz tog razloga je ponašanje materijala za nelinearnu analizu definirano kao što je prikazano u slučaju iv), na slici 6.13. Granica popuštanja čelika, f_y , uzeta je sa vrijednošću 355 N/mm^2 .

Prilikom modeliranja u nelinearnoj analizi, potrebno je uzeti u obzir nesavršenosti samog elementa, kako geometrijske tako i strukturalne. U literaturi [3] su dane vrijednosti nesavršenosti koje se mogu uzeti kao mjerodavne i objedinjuju geometrijske te strukturalne nesavršenosti. Vrijednosti su dane u tablici 6.12.

Tablica 6.12. Odnosi za određivanje vrijednosti nesavršenosti (Tablica 5.1 EN 1993-1-1)

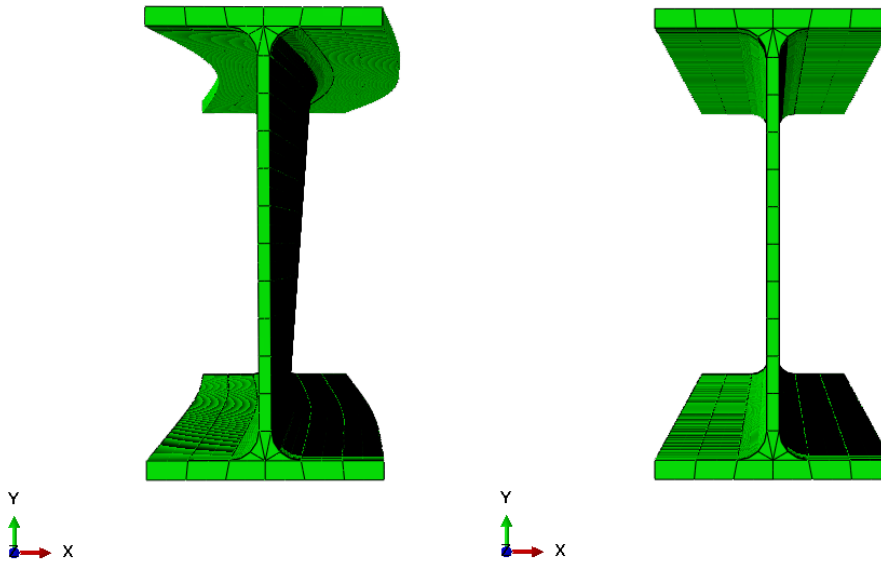
Krivulja izvijanja prema Tabl. 6.1	Elastična analiza	Plastična analiza
	e_0/L	e_0/L
a ₀	1/350	1/300
a	1/300	1/250
b	1/250	1/200
c	1/200	1/150
d	1/150	1/100

Na temelju tablice 6.13. [3], ako usporedimo odnos h/b , za sve profile koji su obrađeni, taj odnos je manji od 2, što znači da je mjerodavna krivulja izvijanja *a*, prema kojoj određujemo veličinu nesavršenosti elementa. Kako je poznato da je nosač raspona 6 metara, jednostavnim izračunom dobije se da je veličina nesavršenosti 24 mm.

Tablica 6.13. Odnosi potrebni za određivanje mjerodavne krivulje izvijanja (Tablica 6.4 EN 1993-1-1)

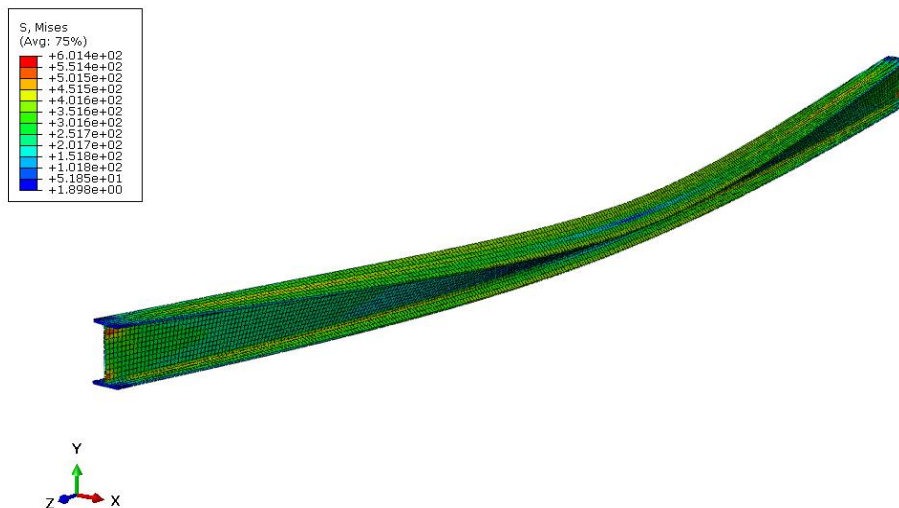
Poprečni presjek	Ograničenja	Krivulja izvijanja
Valjani I presjeci	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Zavareni I presjeci	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Ostali presjeci	-	d

Na slici 6.14. prikazan je izgled nosača sa i bez nesavršenosti.



Slika 6.14. Prikaz modela sa i bez nesavršenosti

Provedbom modificirane Riksove metode analize dobivena je otpornost elementa na savijanje. Na slici 6.15. može se vidjeti izgled nosača nakon dosizanja krajnjeg opterećenja. U tablici 6.14. dane su vrijednosti dobivene numeričkom analizom i uspoređene su s analitičkim proračunom.



Slika 6.15. Prikaz nosača nakon dosizanja krajnjeg opterećenja

Tablica 6.14. *Usporedba otpornosti elemenata IPE 240 dobivenih analitički i numerički*

Profil	Otpornost [kNm] (Analitički)	Otpornost [kNm] (Abaqus)	Odstupanje [%]
IPE 240	36,57	36,63	0,16

7 OTPORNOST HLADNO OBLIKOVANOG TANKOSTIJENOG PROFILA NA SAVIJANJE

7.1 Uvod

U ovom poglavlju prikazan je postupak proračuna otpornosti HOP profila. Prema [2], proračun tankostijenih profila provodi se u tri koraka kako je prikazano na slikama 4.7., 4.8. i 4.9. u poglavlju 4. Obzirom na prije navedeno da se tankostijeni profili svrstavaju u razred 4 poprečnog presjeka, cilj proračuna je odrediti efektivnu površinu poprečnog presjeka i na temelju toga odrediti efektivni moment otpora presjeka $W_{y,eff}$, tj. otpornost na savijanje.

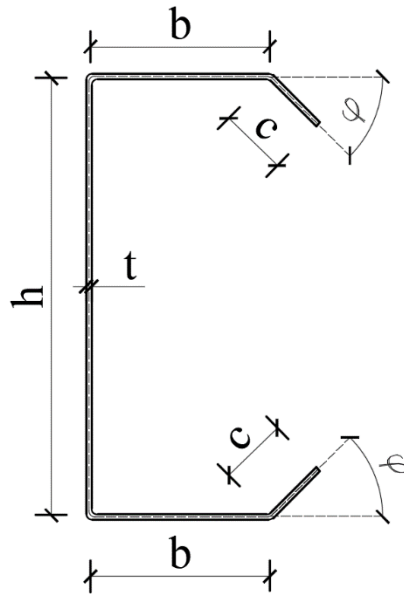
7.2 Proračun efektivnog presjeka

7.2.1 Osnovni podaci o profilu HOP 340

Tablica 7.1. Geometrijske i mehaničke karakteristike profila HOP 340

Duljina vanjske ukrute	$c = 30 \text{ mm}$
Širina gornje pojasnice	$b = 90 \text{ mm}$
Visina hrpta	$h = 337 \text{ mm}$
Debljina stijenke (nominalna)	$t_{nom} = 3,04 \text{ mm}$
Debljina stijenke	$t = 3 \text{ mm}$
Kut nagiba zaobljenja	$\varphi = 30^\circ$
Granica popuštanja	$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
Modul elastičnosti	$E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$
Poissonov koeficijent	$\nu = 0,3$
Modul posmika	$G = 80\,770 \text{ N/mm}^2$

Napomena: Geometrijske karakteristike profila su zadane s osnim vrijednostima.



Slika 7.1. Prikaz polovice poprečnog presjeka sa zadanim geometrijskim karakteristikama

7.2.2 Provjere geometrijskih karakteristika

Provjera početnih geometrijskih karakteristika prema (5.1, 5.2 i 5.3):

$$\frac{b}{t} = \frac{90,0}{3,0} = 30,0 < 60 \quad \text{Uvjet je ispunjen!}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{30,0}{3,0} = 10,0 < 50 \quad \text{Uvjet je ispunjen!}$$

$$\frac{h}{t} = \frac{337,0}{3,0} = 112,33 < 500 \quad \text{Uvjet je ispunjen!}$$

Provjera intervala vrijednosti odnosa c/b prema (5.4):

$$\frac{c}{b} = \frac{30,0}{90,0} = 0,33 \rightarrow 0,2 < 0,33 < 0,6 \quad \text{Uvjet je ispunjen!}$$

Bruto poprečni presjek:

$$A = t(2c + 2b + h) = 3,0 \cdot (2 \cdot 30,0 + 2 \cdot 90,0 + 337,0) = 1731,0 \text{ mm}^2$$

Početni položaj neutralne osi:

$$z_{b1} = \frac{h}{2} = \frac{337,0}{2} = 168,50 \text{ mm}$$

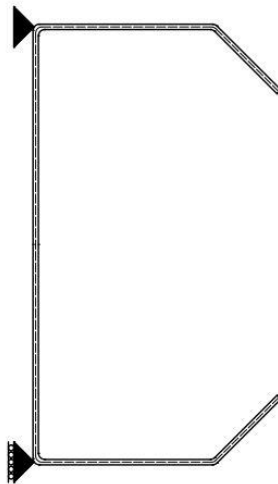
Također, prema [2], utjecaj rubnih radijusa zaobljenja se može zanemariti ako su zadovoljeni izrazi (5.6) i (5.7)

$$\frac{r}{t} = \frac{2,5}{3,0} = 0,83 \leq 5 \quad \text{Uvjet je ispunjen!}$$

$$\frac{r}{b} = \frac{2,5}{90,0} = 0,03 \leq 0,1 \quad \text{Uvjet je ispunjen!}$$

7.2.3 Korak 1

Opći (iterativni) postupak primjenjuje se za proračun karakteristika efektivnog presjeka za pojasnicu u tlaku.



Slika 7.2. Prikaz ekvivalentnog modela za proračun

Inicijalna vrijednost efektivne površine poprečnog presjeka dobiva se koristeći efektivnu širinu pojasnice. Efektivne širine dobivaju se tako da pretpostavimo da je tlačno naprezana pojasnica dvostruko pridržana ($K = \infty$). Također uzima se u obzir da tlačno naprezanje (7.1) u središnjoj crti ukrućenja nije reducirano.

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} \quad (7.1)$$

Efektivna širina tlačno naprezane pojasnice, prema [5], za unutarnje elemente pod utjecajem jednolikog tlaka:

$\psi = 1$ za jednoliki tlak

$k_{\sigma} = 4$ faktor izvijanja

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$$

Za gornju pojasnicu (geometrijska karakteristika b) relativna vitkost iznosi, prema [5]:

$$\bar{\lambda}_{p,b} = \frac{\frac{b}{t}}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{\frac{90,0}{3,0}}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{4}} = 0,649$$

$$\bar{\lambda}_{p,b} > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot \psi} = 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055} = 0,673 \rightarrow \rho = 1,0$$

Faktor redukcije širine (za unutarnji element izložen tlaku):

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,b} - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,b}^2} = \frac{0,649 - 0,055 \cdot (3 + 1)}{0,649^2} = 1,02 \rightarrow \rho = 1,0$$

Efektivna širina pojasnice b:

$$b_{eff} = \rho \cdot b = 1,0 \cdot 90,0 = 90,0 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 45,0 \text{ mm}$$

Efektivna širina rubnog ukrućenja, prema [4], ovisno o faktoru izvijanja:

$$\frac{c}{b} \leq 0,35 \quad \rightarrow \quad k_{\sigma} = 0,50$$

$$0,35 < \frac{c}{b} \leq 0,60 \quad \rightarrow \quad k_{\sigma} = 0,50 + 0,83 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{c}{b} - 0,35\right)^2}$$

$$\frac{c}{b} = \frac{30,0}{90,0} = 0,33 < 0,35 \rightarrow k_{\sigma} = 0,50$$

Relativna vitkost rubnog ukrućenja:

$$\bar{\lambda}_{p,c} = \frac{\frac{c}{t}}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{\frac{30,0}{3,0}}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{0,50}} = 0,612$$

Faktor redukcije širine za vanjski element izložen jednolikom tlaku, prema [5]:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,c} - 0,188}{\bar{\lambda}_{p,c}^2} = \frac{0,612 - 0,188}{0,612^2} = 1,132$$

Efektivna širina prema tome je:

$$c_{eff} = \rho \cdot c = 1,0 \cdot 30,0 = 30,0 \text{ mm}$$

Efektivna površina rubnog ukrućenja:

$$A_s = t(c_{eff} + b_{e2}) = 3,0 \cdot (30,0 + 45,0) = 225,0 \text{ mm}^2$$

7.2.4 Korak 2

Određivanje faktora redukcije uz primjenu efektivnog poprečnog presjeka rubnog ukrućenja. S obzirom na to omogućuju se utjecaju kontinuiranog opružnog pridržanja, slika 7.3.

Elastična kritična sila rubnog ukrućenja, prema [4]:

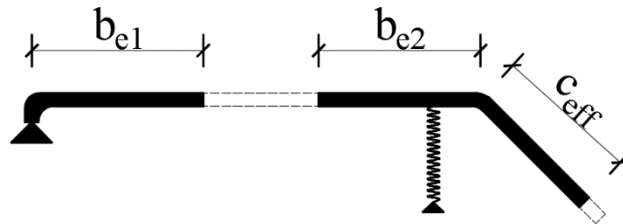
$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{K \cdot EI_s}}{A_s} \quad (7.2)$$

gdje je:

K – krutost opruge po jedinici dužine

$$K = \frac{E \cdot t^3}{4(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 h_\rho + b_1^3 + 0,5b_1 b_2 h_\rho k_f} \quad (7.3)$$

b_1 – udaljenost od hrpta do centra efektivnog presjeka ukrućenja za dio presjeka u tlaku (gornja pojasnica), tj. udaljenost težišta do točke rotacije efektivnog presjeka rubnog ukrućenja.



Slika 7.3. Prikaz modela rubnog ukrućenja

$$b_1 = e = b - b_{e2} + \frac{\frac{b_{e2}^2}{2} + \frac{c_{eff}^2 \cos(\varphi)}{2} + b_{e2} \cdot c_{eff}}{b_{e2} + c_{eff}} \quad (7.4)$$

$$b_1 = 90,0 - 45,0 + \frac{\frac{45,0^2}{2} + \frac{30,0^2 \cos(30^\circ)}{2} + 45,0 \cdot 30,0}{45,0 + 30,0} = 81,70 \text{ mm}$$

$$K = \frac{210000,0 \cdot 3,0^3}{4(1-0,3^2)} \cdot \frac{1}{81,70^2 \cdot 337,0 + 81,70^3} = 0,557 \text{ N/mm}^2$$

Efektivni moment površine 2. stupnja ukrućenja:

$$y_T = \frac{b_{e2} \cdot \sin(\varphi) \cdot c_{eff} + \frac{\sin(\varphi) \cdot c_{eff}^2}{2}}{b_{e2} + c_{eff}} \quad (7.5)$$

$$y_T = \frac{45,0 \cdot \sin(30^\circ) \cdot 30,0 + \frac{\sin(30^\circ) \cdot 30,0}{2}}{45,0 + 30,0} = 9,1 \text{ mm}$$

$$I_s = \frac{b_{e2} \cdot t^3}{12} + b_{e2} \cdot t \cdot [\sin(\varphi) \cdot c_{eff} - y_T]^2 + \frac{t}{\sin(\varphi)} \cdot \frac{(c_{eff} \sin(\varphi))^3}{12} + c_{eff} \cdot t \cdot \left[\frac{c_{eff} \sin(\varphi)}{2} - y_T \right]^2$$

$$I_s = \frac{45 \cdot 3^3}{12} + 45 \cdot 3 \cdot [\sin(30^\circ) \cdot 30 - 9,1]^2 + \frac{3}{\sin(30^\circ)} \cdot \frac{(30 \cdot \sin(30^\circ))^3}{12} + 30 \cdot 3 \cdot \left[\frac{30 \cdot \sin(30^\circ)}{2} - 9,1 \right]^2$$

$$I_s = 4826,25 \text{ mm}^4$$

Iz čega slijedi da je kritično naprezanje prilikom izvijanja za rubno ukrućenje:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{K \cdot EI_s}}{A_s} = \frac{2\sqrt{0,557 \cdot 210000 \cdot 4826,25}}{225,0} = 211,28 \text{ N/mm}^2$$

Relativna vitkost:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{355}{211,28}} = 1,296$$

Faktor redukcije za rubno ukrućenje određuje se prema:

$$\bar{\lambda}_d \leq 0,65 \quad \rightarrow \quad \chi_d = 1,0$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad \rightarrow \quad \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d$$

$$\bar{\lambda}_d \geq 1,38 \quad \rightarrow \quad \chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d}$$

Iz toga slijedi:

$$0,65 < \bar{\lambda}_d = 1,296 < 1,38 \quad \rightarrow \quad \chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot 1,296 = 0,533$$

7.2.5 Korak 3

Kako je faktor redukcije ukrućenja za izvijanje manji od 1, potrebno je raditi iteracije kako bi bolje definirali vrijednost tog istog faktora redukcije.

Iteracije se rade prema modificiranim verzijama ρ dobivene preko:

$$\sigma_{com,Ed,i} = \frac{\chi_d \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}}$$

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d}$$

Iterativni proces se zaustavlja kada faktor χ konvergira.

Početne vrijednosti – prva iteracija:

$$\chi_d = 0,533$$

$$b_{eff} = 30,0 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 45,0 \text{ mm}$$

$$c_{eff} = 30,0 \text{ mm}$$

$$t_{red} = t \cdot \chi_d = 3,0 \cdot 0,533 = 1,60$$

Za završne vrijednosti, n – ta iteracija, s obzirom na to da koeficijent χ_d počinje rasti već u prvoj iteraciji, uzimaju se početne vrijednosti kao mjerodavne:

$$\chi_d = 0,533$$

$$b_{eff} = 30,0 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 45,0 \text{ mm}$$

$$c_{\text{eff}} = 30,0 \text{ mm}$$

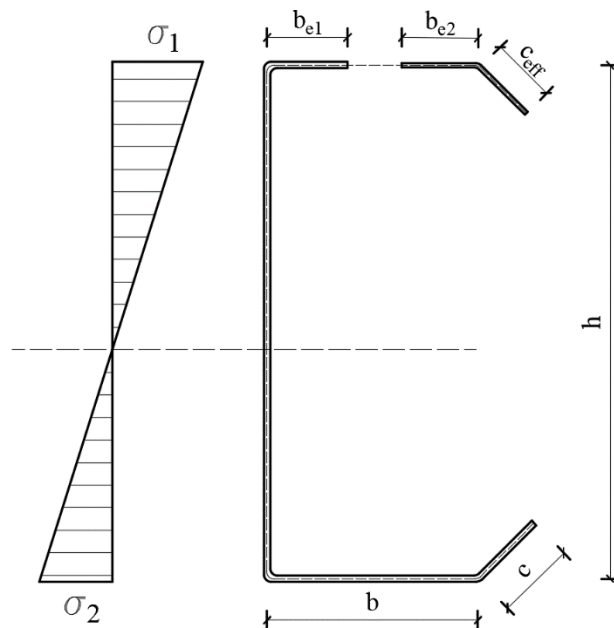
$$t_{\text{red}} = t \cdot \chi_d = 3,0 \cdot 0,533 = 1,60$$

Položaj neutralne osi:

$$h_c = \frac{c \left(h - \frac{\sin(\varphi) \cdot c}{2} \right) + b \cdot h + \frac{h^2}{2} + \frac{\sin(\varphi) \cdot c_{\text{eff}}^2 \cdot \chi_d}{2}}{c + b + h + b_{e1} + (b_{e2} + c_{\text{eff}}) \cdot \chi_d}$$

$$h_c = \frac{30,0 \left(337,0 - \frac{\sin(30^\circ) \cdot 30,0}{2} \right) + 90,0 \cdot 337,0 + \frac{337,0^2}{2} + \frac{\sin(30^\circ) \cdot 30,0^2 \cdot 0,533}{2}}{30,0 + 90,0 + 337,0 + 45,0 + (45,0 + 30,0) \cdot 0,533}$$

$$h_c = 179,20 \text{ mm}$$



Slika 7.4. Prikaz raspodjele naprezanja u poprečnom presjeku

Za središnji dio hrpta, geometrijska karakteristika h , prema [5], za unutarnje elemente pod utjecajem jednolikog tlaka:

$$\psi = \frac{h_c - h}{h_c} = \frac{179,20 - 337,0}{179,20} = -0,881$$

Omjer naprezanja:

$$\psi = -0,881$$

Faktor izvijanja prema [5]:

$$k_{\sigma} = 7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$$

$$k_{\sigma} = 7,81 + 6,29 \cdot 0,881 - 9,78(-0,881)^2 = 20,932$$

Relativna vitkost:

$$\bar{\lambda}_{p,h} = \frac{\frac{h}{t}}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{\frac{337,0}{3,0}}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{20,932}} = 1,063$$

Faktor redukcije širine:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,h} - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,h}^2} = \frac{1,063 - 0,055 \cdot (3 - 0,881)}{1,063^2} = 0,838$$

Efektivna širina tlačne zone hrpta:

$$h_{eff} = \rho \cdot h_c = 0,838 \cdot 337,0 = 150,15 \text{ mm}$$

U blizini pojasnice u tlaku:

$$h_{e1} = 0,4 \cdot h_{eff} = 0,4 \cdot 150,15 = 60,06 \text{ mm}$$

U blizini neutralne osi:

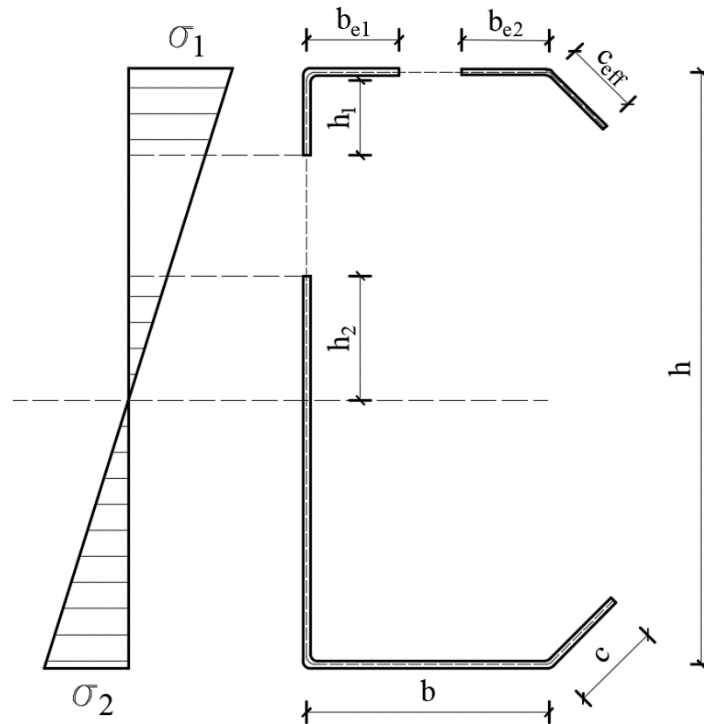
$$h_{e2} = 0,6 \cdot h_{eff} = 0,6 \cdot 150,15 = 90,09 \text{ mm}$$

Efektivna širina hrpta u blizini pojasnice u tlaku:

$$h_1 = h_{e1} = 60,06 \text{ mm}$$

U blizini pojasnice u vlaku:

$$h_2 = h - (h_c - h_{e2}) = 337,0 - (179,20 - 90,087) = 247,89 \text{ mm}$$



Slika 7.5. Prikaz proračunatih komponenti h_1 i h_2

7.2.6 Efektivne geometrijske karakteristike

Efektivna površina presjeka:

$$A_{eff} = t \cdot [c + b + h_2 + h_1 + b_{e1} + (b_{e2} + c_{eff}) \cdot \chi_d]$$

$$A_{eff} = t \cdot [30,0 + 90,0 + 247,89 + 60,06 + 45,0 + (45,0 + 30,0) \cdot 0,533]$$

$$A_{eff} = 1538,72 \text{ mm}^2$$

Položaj neutralne osi:

$$z_c = \frac{t \left[c \left(h - \frac{\sin(\varphi) \cdot c}{2} \right) + b \cdot h + h_2 \left(h - \frac{h_2}{2} \right) + h_1 \cdot \frac{h_1}{2} + \frac{\sin(\varphi) \cdot c_{eff}^2 \cdot \chi_d}{2} \right]}{A_{eff}}$$

$$z_c = \frac{3,0 \cdot \left[30 \cdot \left(337 - \frac{\sin(30^\circ) \cdot 30}{2} \right) + 90 \cdot 337 + 247,89 \left(337 - \frac{247,89}{2} \right) + \frac{60,06^2}{2} + \frac{\sin(30^\circ) \cdot 30^2 \cdot 0,533}{2} \right]}{1538,72}$$

$$z_c = 185,13 \text{ mm}$$

Položaj neutralne osi u odnosu na pojasnicu u vlaku:

$$z_t = h - z_c = 337,0 - 185,13 = 151,87 \text{ mm}$$

Efektivni moment površine 2. stupnja prema izrazu (4.39):

$$I_{eff,y,1} = \frac{3}{\sin(30^\circ)} \cdot \frac{(\sin(30^\circ) \cdot 30)^3}{12} + 30 \cdot 3 \cdot \left(151,87 - \frac{\sin(30^\circ) \cdot 30}{2} \right)^2$$

$$I_{eff,y,2} = \frac{90 \cdot 3^3}{12} + 90 \cdot 3 \cdot 151,87^2$$

$$I_{eff,y,3} = \frac{3 \cdot 247,89^3}{12} + 247,89 \cdot 3 \cdot \left(151,87 - \frac{247,89}{2} \right)^2$$

$$I_{eff,y,4} = \frac{3 \cdot 60,06^3}{12} + 60,06 \cdot 3 \cdot \left(185,13 - \frac{60,06}{2} \right)^2$$

$$I_{eff,y,5} = \frac{45 \cdot 3^3}{12} + 45 \cdot 3 \cdot 185,13^2$$

$$I_{eff,y,6} = \frac{45 \cdot (3 \cdot 0,533)^3}{12} + 45 \cdot (3 \cdot 0,533) \cdot 185,13^2$$

$$I_{eff,y,7} = \frac{(3 \cdot 0,533) \cdot (\sin(30^\circ) \cdot 30)^3}{\sin(30^\circ) \cdot 12} + 30 \cdot (3 \cdot 0,533) \cdot \left(185,13 - \frac{\sin(30^\circ) \cdot 30}{2}\right)^2$$

$$I_{eff,y} = 25487836,04 \text{ mm}^4$$

Efektivni moment otpora

U odnosu na pojasnicu u tlaku:

$$W_{eff,y,c} = \frac{I_{eff,y}}{z_c} = \frac{25487836,04}{185,13} = 137678,30 \text{ mm}^3$$

U odnosu na pojasnicu u vlaku:

$$W_{eff,y,t} = \frac{I_{eff,y}}{z_t} = \frac{25487836,04}{151,87} = 167822,30 \text{ mm}^3$$

7.3 Otpornost presjeka na savijanje

Mjerodavni efektivni moment otpora:

$$W_{eff,y} = \min(W_{eff,y,c}, W_{eff,y,t}) = 137678,30 \text{ mm}^3$$

Otpornost presjeka na savijanje:

$$M_{b,Rd} = \frac{2 \cdot W_{eff,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2 \cdot 137678,30 \cdot 355}{1,0} \cdot 10^{-6} = 97,75 \text{ kNm}$$

7.4 Otpornost elementa na savijanje

Za proračun otpornosti elementa na savijanje potrebno je proračunati dodatne geometrijske karakteristike.

Moment površine 2. stupnja bruto presjeka I_z prema (4.33):

$$I_{z,1} = \frac{337 \cdot 3^3}{6}$$

$$I_{z,2} = \frac{3 \cdot 90^3}{3}$$

$$I_{z,3} = \frac{t}{\cos(30^\circ)} \cdot \frac{(\cos(30^\circ) \cdot 30)^3}{12} + 30 \cdot 3 \cdot \left(90 + \frac{\cos(30^\circ) \cdot 30}{2} \right)^2$$

$$I_z = 7021112,30 \text{ mm}^4$$

Torzijska konstanta presjeka I_t prema (4.38):

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot \left[4 \cdot 30,0 \cdot 3,0^3 + 4 \cdot 90,0 \cdot 3,0^3 + 337,0 \cdot (2 \cdot 3,0)^3 \right] = 28584,0 \text{ mm}^4$$

Konstanta krivljenja presjeka I_w – vrijednost dobivena prema [19]:

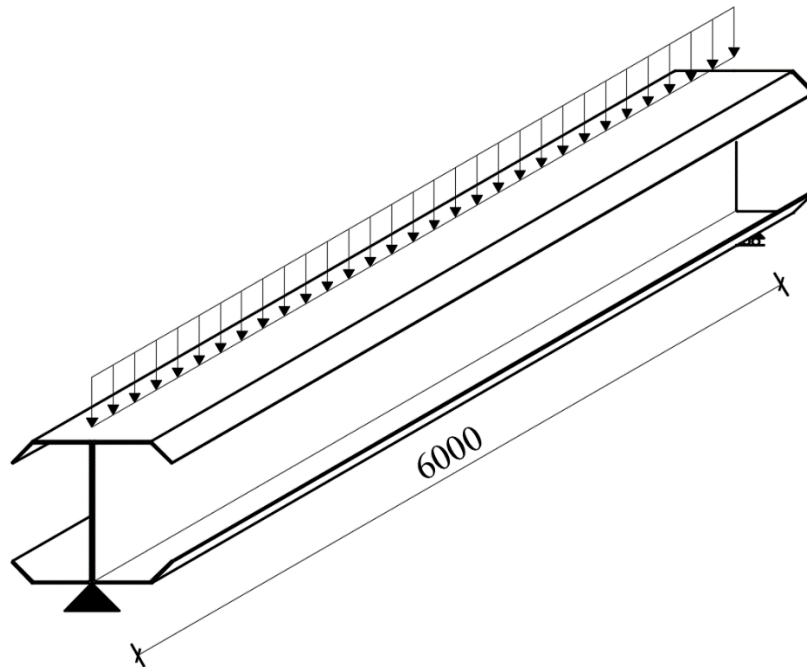
$$I_w = 200878295709,0 \text{ mm}^6$$

Elastični kritični moment bočnog torzijskog izvijanja:

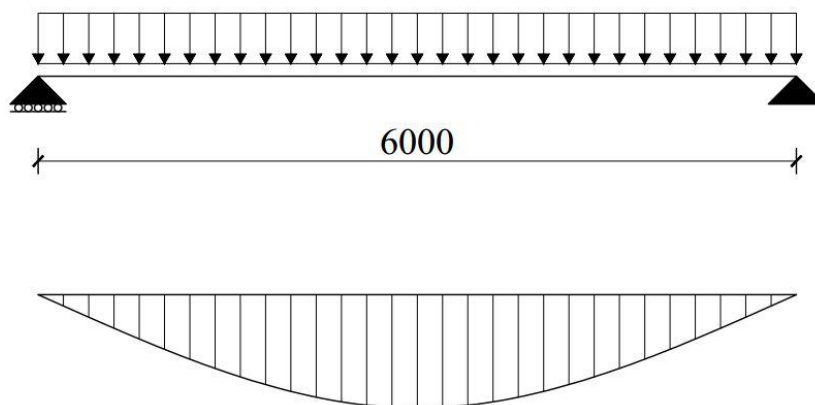
$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right] \quad (7.6)$$

Prema [20] u gornjem izrazu oznake su sljedeće:

- E modul elastičnosti,
- G modul posmika,
- I_w konstanta krivljenja,
- I_z moment površine 2. stupnja oko slabije osi presjeka,
- I_t torzijska konstanta,
- z_g razmak između točke djelovanja opterećenja i centra posmika,
- L dužina nosača između točaka pridržanja,
- k, k_w faktori dužine izvijanja.



Slika 7.6. Prikaz statičkog sustava HOP nosača



Slika 7.7. Prikaz statičkog sustava HOP nosača i oblika momentnog dijagrama

Za slučaj slobodno oslonjenog nosača, vrijednosti koeficijenta C_1 i C_2 su:

$$C_1 = 1,127,$$

$$C_2 = 0,454,$$

dok su vrijednosti faktora dužine izvijanja [20]:

$$k = k_w = 1,0$$

Za uvrštene vrijednosti za profil HOP 340:

$$M_{cr} = 1,127 \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 7021112,3}{6000^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{20,09 \cdot 10^{10}}{7021112,3} + \frac{6000^2 \cdot 81000 \cdot 28584,0}{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 7021112,3} + \left(0,454 \cdot \frac{337}{2}\right)^2} - 0,454 \cdot \frac{337}{2} \right]$$

$$M_{cr} = 56,46 \text{ kNm}$$

Bezdimenzionalna vitkost:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{eff,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 137,68 \cdot 35,5}{5646,0}} = 1,316 > \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,40$$

Faktor redukcije:

$$\text{mjerodavna krivulja izvijanja } \mathbf{b} \rightarrow \alpha_{LT} = 0,34$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,34 \cdot (1,316 - 0,2) + 1,316^2 \right] = 1,556$$

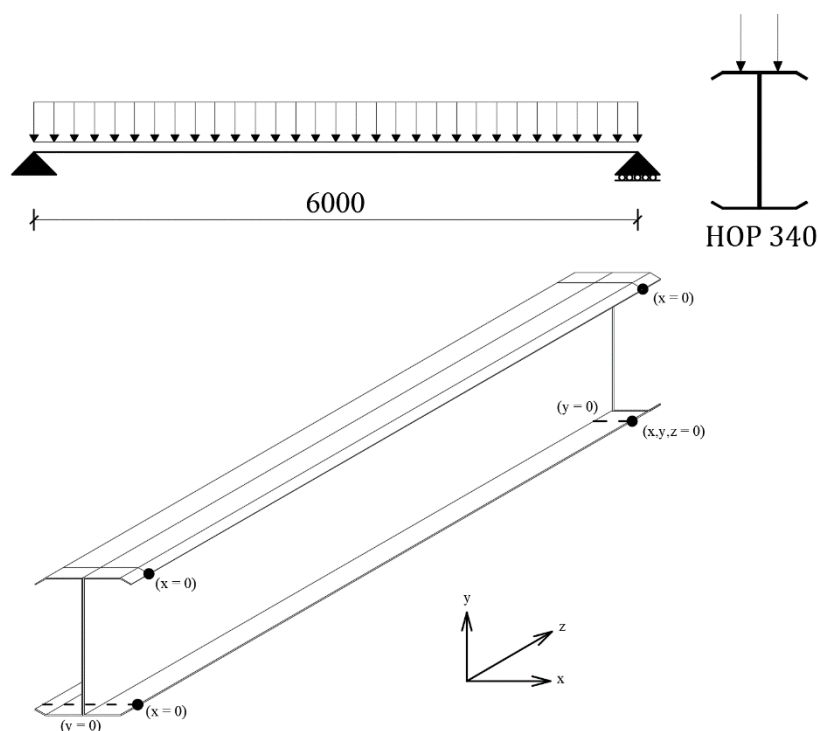
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{1,556 + \sqrt{1,556^2 - 1,316^2}} = 0,446 < 1,0$$

Računska otpornost:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{W_{eff,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,446 \cdot \frac{2 \cdot 137,68 \cdot 35,5}{1,0} = 4359,77 \text{ kNcm} = 43,60 \text{ kNm}$$

7.5 Opis kalibracije numeričkog modela

Za primjer je odabran profil HOP 340 koji je optimiziran da bude ekvivalentan profilu IPE 240. Za ovaj model također je primijenjena GMNIA analiza. Materijal i rubni uvjeti u linearnoj analizi modelirani su identično kao što je objašnjeno u točki 6.5.2. Međutim, kako se radi o elementu konstante debljine svega 3 mm, korišteni su plošni (SHELL) konačni elementi S4R. To je dakle element sa 4 točke i reduciranom integracijom. Na slici 7.8. je prikazan statički sustav i simulacija rubnih uvjeta.



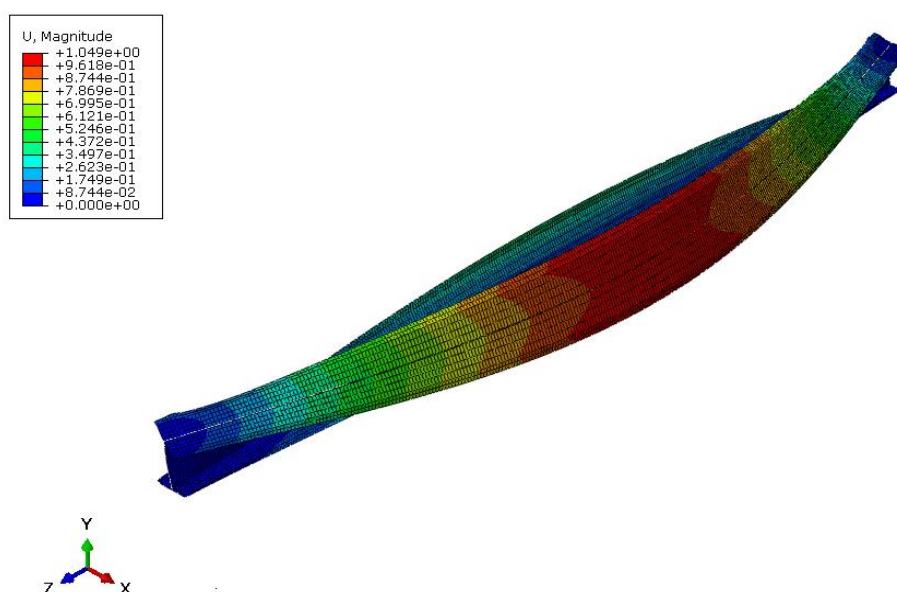
Slika 7.8. Prikaz statičkog sustava HOP nosača i simulacije rubnih uvjeta

Sa slike 7.8. je vidljivo da je nosač opterećen na dva mjesta. Kako je ovo sastavljeni nosač od dva C profila, u linearnoj analizi spojen je preko hrpta TIE vezom koja kontinuirano spaja oba hrpta po cijeloj dužini i visini i predstavlja apsolutno krutu vezu. Nanošenje sile direktno na hrbat ili razdvajanje na dvije sile ne daje apsolutno nikakvu razliku, pa je iz praktičnih razloga

opterećenje postavljeno sa dvije sile. Koncentrirane sile su na svakih 10 cm postavljene u smjeru gravitacije iznosa 50 N. Model je kalibriran na temelju elastičnog kritičnog momenta. Prikaz prvog oblika izvijanja dan je na slici 7.9., a rezultati usporedbe u tablici 7.2.

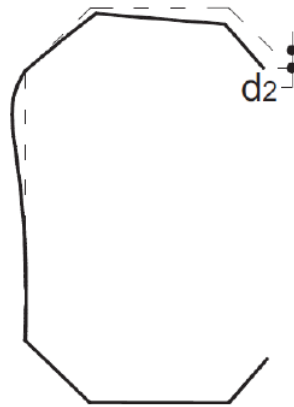
Tablica 7.2. Usporedba analitičkih i numeričkih rezultata za HOP 340

Profil	M_{cr} [kNm] (Analitički)	M_{cr} [kNm] (Abaqus)	M_{cr} [kNm] (LTBeam)
HOP 340	56,46	56,93	56,35



Slika 7.9. Prvi oblik izvijanja (bočno – torzijski mod)

Materijal za nelinearnu analizu zadan je identično kao za IPE profil. Velika razlika je u zadavanju inicijalne nesavršenosti u odnosu na toplo valjane profile. Prema [26], dana je geometrijska tolerancija reda veličine $L/1000$, međutim kako bi uzeli u obzir i strukturalne nesavršenosti, kao mjerodavna vrijednost odabrana je $L/500$. Uz to je tražen prvi lokalni oblik izvijanja te je i za taj oblik izvijanja unesena vrijednost nesavršenosti prema [27]. Potrebno je napomenuti da je za svaki optimizirani HOP profil prvi lokalni oblik izvijanja bio distorzijski.



Slika 7.10. Distorzijski mod izvijanja [27]

Na slici 7.10. je prikazan općeniti distorzijski mod C profila i kako se promatra nesavršenost za takav oblik izvijanja. Prema [27], uzimanje u obzir nesavršenosti predstavlja problem zbog velikih varijacija koje postoje u podacima o maksimalnim nesavršenostima. Jedna od alternativa je da se veličina maksimalne nesavršenosti tretira kao slučajna varijabla gdje primjenjujemo kumulativnu funkciju distribucije koja u općem obliku glasi:

$$F(x) = P(X \leq x),$$

odnosno, $F(x)$ je vjerojatnost da slučajna varijabla poprimi vjerojatnost manju ili jednaku x . Vrijednost kumulativne funkcije distribucije za ovaj slučaj dana je sa:

$$F(x) = P(\Delta \leq d),$$

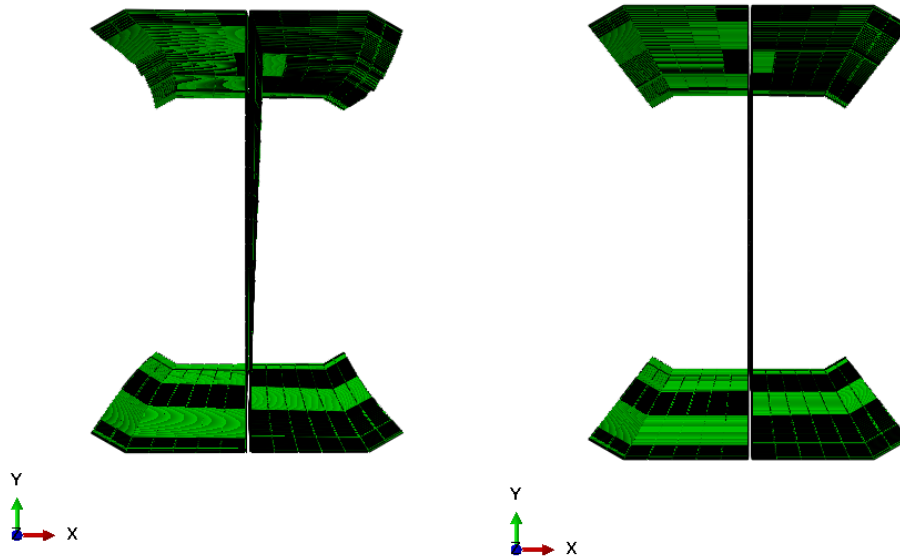
i kaže da je vjerojatnost da je slučajna vrijednost nesavršenosti Δ manja od diskretne determinističke nesavršenosti d .

Također, prema [27] za distorzijsko izvijanje vrijednost nesavršenosti jednaka je:

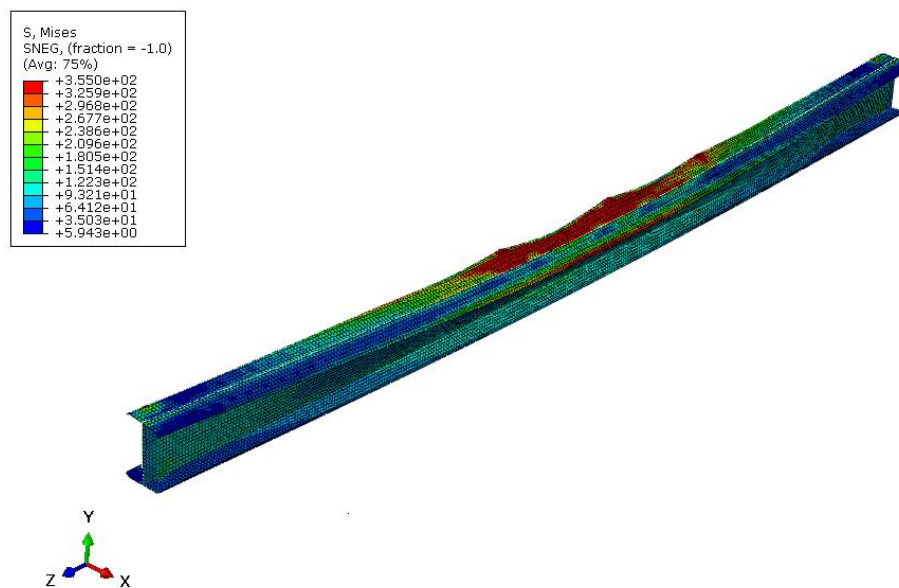
$$d_2 / t = 0,94$$

što znači da se očekuje da će element imati maksimalnu nesavršenost manju od ove vrijednosti u 50% slučajeva.

Kada pogledamo sve navedeno, za globalni oblik vrijednost nesavršenosti iznosi 12 mm, a za distorzijski 2,82 mm, odnosno 2,35 mm, ovisno o debljini stijenke (slika 7.11.) Korištenjem modificirane Riksove metode analize dobivena je otpornost elementa na savijanje. Na slici 7.12. prikazan je nosač nakon dosizanja krajnjeg opterećenja te su u tablici 7.3. dani uspoređeni rezultati sa analitičkim proračunom.



Slika 7.11. Prikaz profila HOP 340 sa i bez nesavršenosti



Slika 7.12. Prikaz nosača HOP 340 nakon dosizanja krajnjeg opterećenja

Tablica 7.3. *Usporedba otpornosti elemenata HOP 340 dobivenih analitički i numerički*

Profil	Otpornost [kNm] (Analitički)	Otpornost [kNm] (Abaqus)	Odstupanje [%]
HOP 340	43,60	41,37	5,11

8 SPAJANJE HLADNO OBLIKOVANOG PROFILA TOČKASTIM ZAVARIVANJEM

8.1 Uvodne napomene

U prethodnoj točki, nosač profila HOP 340 modeliran je idealno (veza između dva hrpta apsolutno kruta) kako bi se dobiveni rezultati mogli verificirati na temelju analitičkog proračuna. Pošto se radi o sastavljenom nosaču, on mora biti spojen, bilo vijčano ili zavarivanjem, stoga je u ovom istraživanju odabrana varijanta spajanja zavarivanjem, točnije točkastim zavarivanjem. Gledajući s aspekta ekonomičnosti, ovakav način spajanja prikladan je jer ukoliko profil pokaže dovoljno dobra svojstva, postoji mogućnost automatizirane proizvodnje.

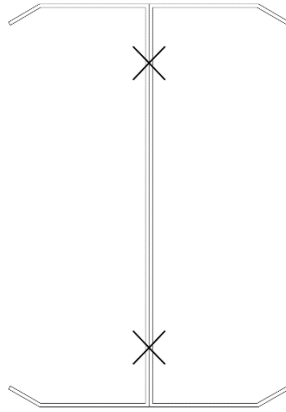
Kao što je već rečeno, laboratorijsko ispitivanje u sklopu istraživanja nije provedeno, stoga parametre zavara u numeričkom modelu nije bilo moguće zadati. Da bi se dobio optimalan broj točkastih zavara, parametri zavara nisu toliko nužni, pa su se u ovim analizama zavari zadali pod pretpostavkom da neće otkazati.

8.2 Optimizirani raspored zavara – varijanta 1

Prva optimizacija zavara napravljena je tako da su duž cijelog nosača zavari postavljeni na konstantnom razmaku od 100 mm, slika 8.1. Promatrajući poprečni presjek nosača, vidljivo je da su zavari odmaknuti od gornje i donje pojasnice za 50 mm, slika 8.2. S ovim rasporedom zavara dobili smo prilično blisku vrijednost otpornosti elementa na savijanje u usporedbi sa modelom kojem su hrptovi povezani krutom TIE vezom.

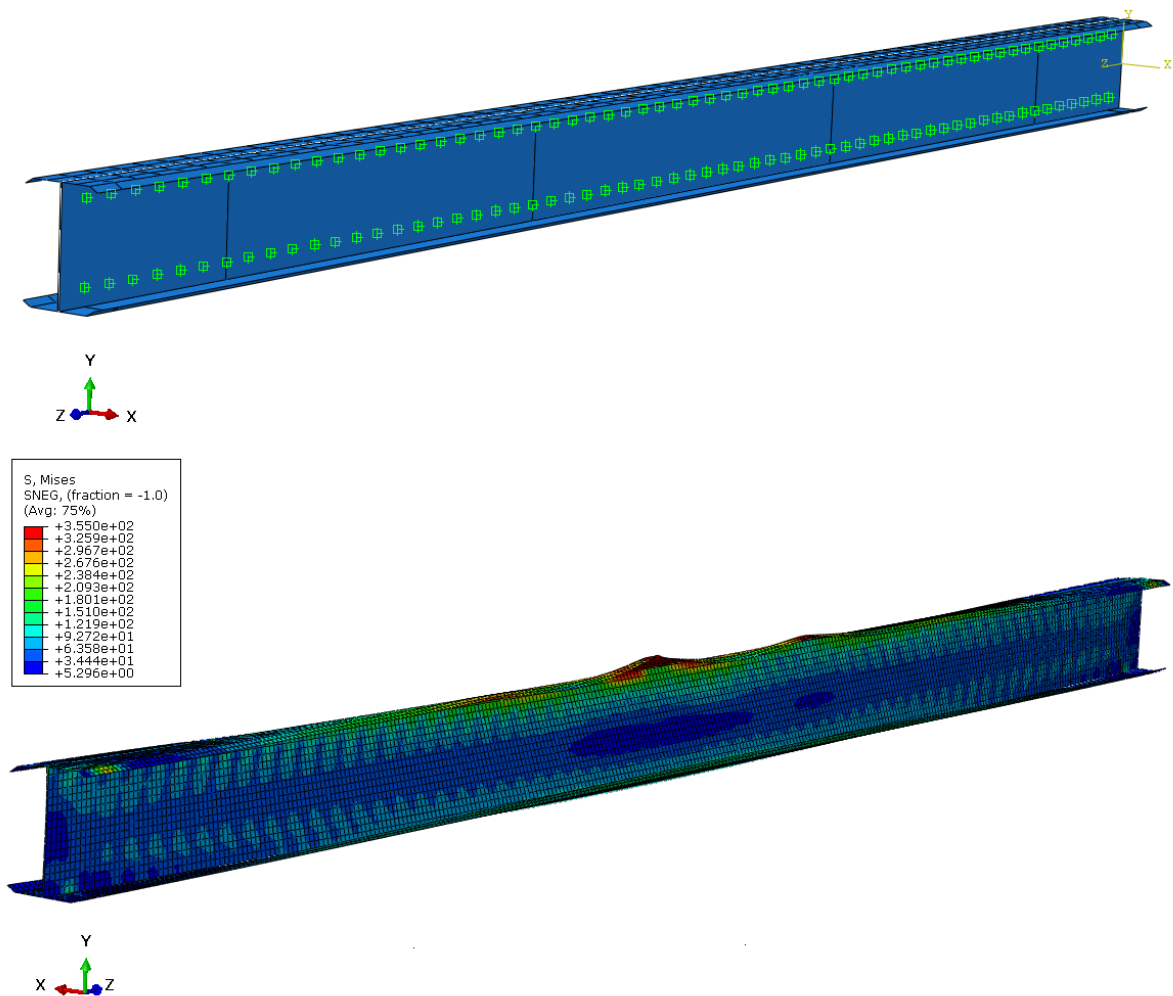


Slika 8.1. Prikaz pozicija zavara s uzdužne strane



Slika 8.2. *Prikaz pozicija zavara s poprečne strane*

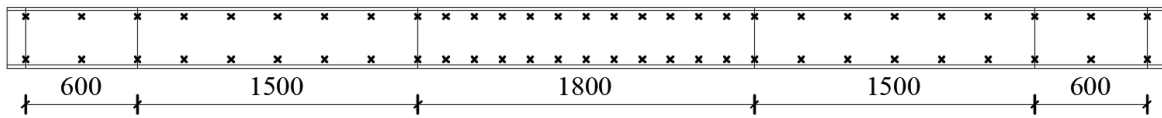
Razmak od 100 mm proizvoljno je određen, ali da taj razmak bude konstantan po cijeloj duljini nosača ciljano je napravljen za prvu analizu. Razlog tome je što se iz ovakvog rasporeda vidi gdje su prva mjesta aktivacije zavara. Kada imamo kontinuirano opterećen nosač, moment savijanja je najveći na sredini, dok su poprečne sile najveće na krajevima nosača. Po tom principu bilo bi logično staviti gušći raspored zavara na krajevima i postupno povećavati razmak prema sredini. Međutim, analiza je pokazala sasvim suprotno. Prva aktivacija zavara dogodila se upravo na sredini i nastavila prema krajevima. Analogno tome dolazi se do zaključka da je poprečna sila najveća na krajevima, ali ne u zavaru, već u elementu. To se može objasniti time što nema relativnog pomaka na krajevima zbog ležajeva i kako se prvo krivljenje elementa događa na sredini logično je da će se tu najprije aktivirati zavari, slika 8.3.



Slika 8.3. Prikaz pozicija zavara s uzdužne strane u Abaqus – u i nosač nakon dosizanja krajnjeg opterećenja sa zavarima na konstantnom razmaku

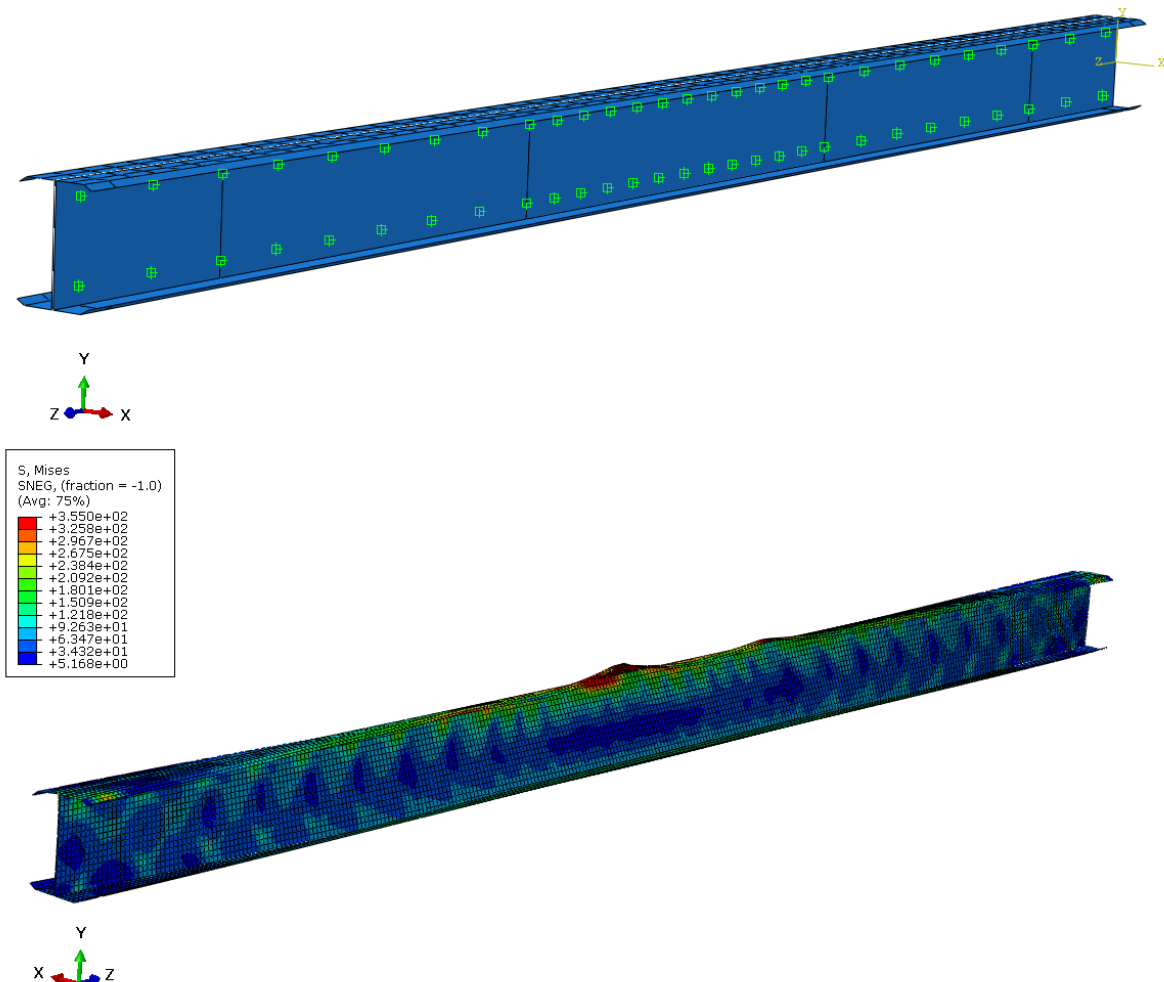
8.3 Optimizirani raspored zavara – varijanta 2

Na temelju prethodne točke gdje je opisano kojim redoslijedom treba postaviti raspored zavara, tražen je optimalni broj zavara. Praćenjem numeričkog modela kroz analizu, pokazalo se da se zavari aktiviraju po segmentima duž nosača počevši od sredine, stoga je nosač podijeljen na pet dijelova. Središnji dio gdje se događa prvo aktiviranje zavara duljine je 1800 mm. Prema krajevima nosača segmenti su postavljeni na 1500 mm te 600 mm sa obje strane. Shematski prikaz dan je na slici 8.4.



Slika 8.4. Prikaz pozicija zavara s uzdužne strane

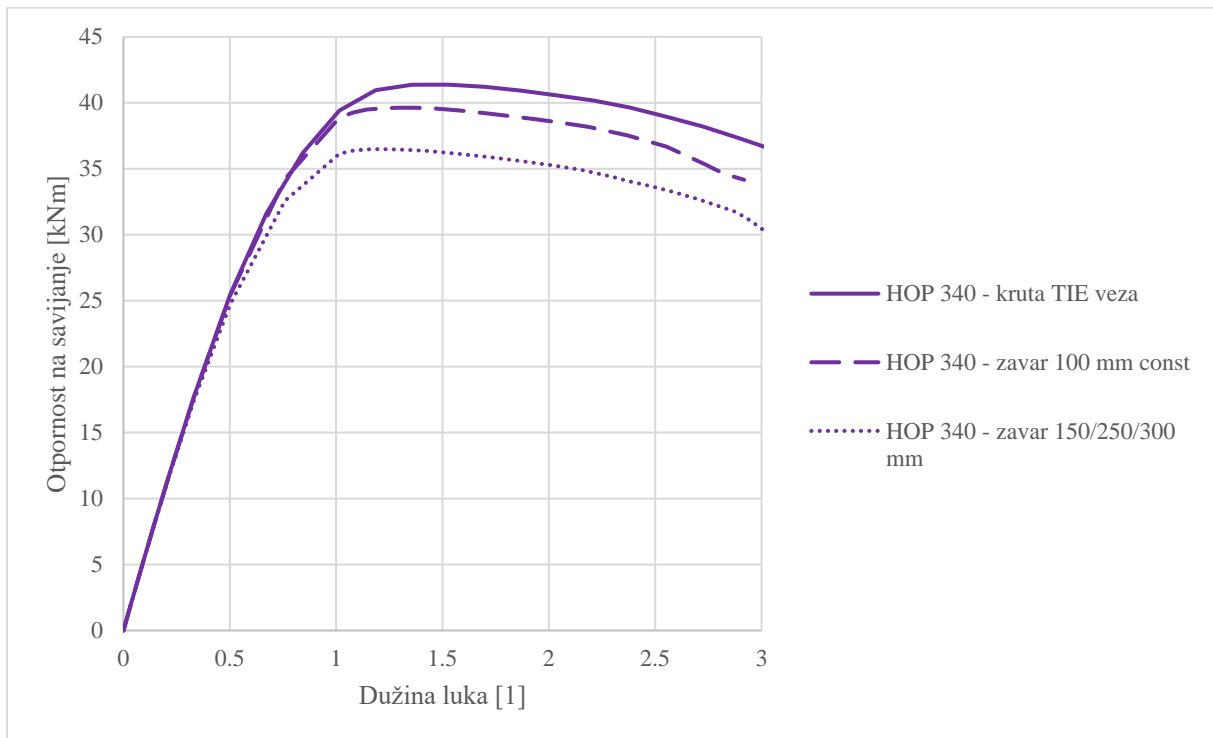
U srednjem segmentu od 1800 mm, zavari su postavljeni na svakih 150 mm. Na segmentima od 1500 mm zavari se nalaze na svakih 250 mm te na krajevima u segmentima od 600 mm na svakih 300 mm. Prikaz numeričkog modela nalazi se na slici 8.5.



Slika 8.5. Prikaz pozicija zavara s uzdužne strane u Abaqus – u i nosač nakon dosizanja krajnjeg opterećenja sa zavarima na diskretnom razmaku 150/250/300

8.4 Zaključne napomene

U sljedećim tablicama i dijagramima prikazana je usporedba različitih načina spajanja profila HOP 340 koji je dan kao reprezentativni primjer kroz cijeli rad.



Slika 8.6. Usporedba različitih tipova povezivanja profila HOP 340

Tablica 8.1. Odstupanja različitih tipova povezivanja u odnosu na apsolutno krutu vezu

	Otpornost [kNm]	Odstupanje [%]
HOP 340 – TIE veza	41,37	0,0
HOP 340 – 100 mm	39,63	4,21
HOP 340 – 150/250/300	36,49	11,80

Na temelju podataka prikazanih iznad zaključujemo da pravilnim odabirom rasporeda zavara možemo postići traženu otpornost elementa bez značajnih gubitaka. Vidljivo je da se u prvoj varijanti rasporeda gdje se nalazi 122 zavara i u drugoj varijanti gdje se nalazi 58 zavara, otpornost nije značajno promijenila, ali se broj zavara smanjio za više od pola.

9 REZULTATI I RASPRAVA

9.1 Područje analize

U radu su provedene parametarske analize usporedbe "zelenog" područja prikazanog na slici 5.12. u poglavlju 5 koje odgovara rasponu IPE profila (IPE180, IPE200, IPE220, IPE240) i HOP profila (HOP280, HOP300, HOP320, HOP340) optimiziranih na temelju geometrijskih karakteristika navedenih IPE profila.

Nepromjenjive varijable, tj. zajednički parametri korišteni u svakom modelu su:

- raspon nosača,
- rubni uvjeti,
- tip opterećenja,
- materijalne karakteristike.

Naime, odabrani raspon nosača odgovara tipičnim rasponima sekundarnih nosača međukatnih konstrukcija ili podrožnica. Spajanje sekundarnih elemenata na stupove ili glavne nosače većinom je zglobno, odnosno bez mogućnosti preuzimanja momenata savijanja na krajevima. Kako je opterećenje na sekundarne elemente najčešće od slojeva međukatne konstrukcije (betonska ploča, slojevi poda, ...) ili od pokrova (trapezni lim, sendvič paneli, ...), zaključuje se da su takvi elementi podložni jednolikom opterećenju duž cijelog elementa. Rezultat toga je savijanje kao dominantno opterećenje. Materijal koji je odabran za sve analizirane elemente u ovom radu je konstrukcijski čelik S355 koja se najčešće primjenjuje u svakodnevnoj inženjerskoj praksi.

Na temelju opisanog, kao jedine promjenjive varijable razmatrane su geometrijske karakteristike poprečnog presjeka, jer je cilj istraživanja usporedba otpornosti dvaju različitih tipova profila s razlikom u načinu njihovog oblikovanja.

9.2 Kalibracija profila IPE i HOP

Ovdje su dane usporedbe kalibracije na temelju elastičnog kritičnog momenta za oba tipa profila. Kao što je već rečeno, kalibracija modela je provedena s ciljem dobivanja pouzdanih rezultata. Odstupanja Δ_1 i Δ_2 prikazana u tablicama 9.1. i 9.2. računata su prema sljedećim izrazima:

$$\Delta_1 = \left| \frac{M_{cr}(\text{Abaqus}) - M_{cr}(\text{Analitika})}{M_{cr}(\text{Abaqus})} \right| \cdot 100 \text{ [\%]}$$

$$\Delta_2 = \left| \frac{M_{cr}(\text{Abaqus}) - M_{cr}(\text{LTBeam})}{M_{cr}(\text{Abaqus})} \right| \cdot 100 \text{ [\%]}$$

Tablica 9.1. Usporedba elastičnog kritičnog momenta razmatranih IPE profila

Profil	Analitika [kNm]	Abaqus [kNm]	LTBeam [kNm]	Δ_1 [%]	Δ_2 [%]
IPE 180	15,33	15,36	15,35	0,20	0,07
IPE 200	21,93	22,31	21,81	1,70	2,24
IPE 220	29,93	29,85	29,92	0,27	0,23
IPE 240	41,98	41,59	41,78	0,94	0,46

Tablica 9.2. Usporedba elastičnog kritičnog momenta razmatranih HOP profila

Profil	Analitika [kNm]	Abaqus [kNm]	LTBeam [kNm]	Δ_1 [%]	Δ_2 [%]
HOP 280	23,64	24,35	23,59	2,92	3,12
HOP 300	32,17	32,66	32,92	1,50	0,80
HOP 320	43,08	43,03	42,97	0,12	0,14
HOP 340	56,46	56,93	56,35	0,83	1,02

Dobiveni rezultati ispitivanja elementa na elastični kritični moment bočnog torzijskog izvijanja pokazuju male razlike između analitičkog proračuna, numeričkog modeliranja u Abaqus – u te računalnog programa LTBeam koji se isključivo koristi za proračun elastičnog kritičnog momenta M_{cr} . S ovako malim odstupanjima, rezultati se mogu smatrati dobrim pokazateljem

valjanosti, ne samo analitičkog proračuna, već i kalibriranog numeričkog modela svakog elementa.

9.3 Otpornost na savijanje HOP profila

Rezultati usporedbe otpornosti na savijanje HOP profila prema analitičkom proračunu dani su u tablici 9.3., dok se odstupanje u rezultatima između analitičkog proračuna i numeričkog modeliranja dobilo koristeći sljedeći izraz:

$$\Delta = \left| \frac{M_{b,Rd} (Abaqus) - M_{b,Rd} (Analitika)}{M_{b,Rd} (Abaqus)} \right| \cdot 100 [\%]$$

Tablica 9.3. Usporedba otpornosti elementa na savijanje HOP profila

Profil	Otpornost [kNm] (Analitika)	Otpornost [kNm] (Abaqus)	Odstupanje Δ [%]
HOP 280	17,36	19,81	12,37
HOP 300	24,60	25,05	1,80
HOP 320	33,24	30,63	7,85
HOP 340	43,58	41,37	5,07

Rezultati pokazuju da se, koristeći pravila za proračun prema [4], usvajajući pritom efektivne vrijednosti momenta otpora koji je direktno vezan za iznos otpornosti na savijanje pojedinog elementa i pažljivim numeričkim modeliranjem, pritom pazeći na tip konačnog elementa, broj konačnih elemenata, način povezivanja i zadavanje materijalnih te geometrijskih karakteristika, dolazi do potvrde proračuna otpornosti elementa na savijanje u pogledu slučaja ostvarivanja apsolutno krute (TIE) veze između dva dijela poprečnog presjeka promatranog elementa. Rezultati prikazani u ovoj točki ne mogu se smatrati konačnima jer u praksi takav tip veze nije moguće ostvariti.

9.4 Različiti načini povezivanja HOP profila

Rezultati otpornosti za različite ostvarive načine spajanja dva dijela HOP profila dani su u tablici 9.4. i prikazani grafički na slici 9.1. Vrijednosti odstupanja svakog pojedinog rezultata računane su prema sljedećim izrazima:

Odstupanje između krute TIE veze i diskretno postavljenih zavara na svakih 100 mm duž elementa:

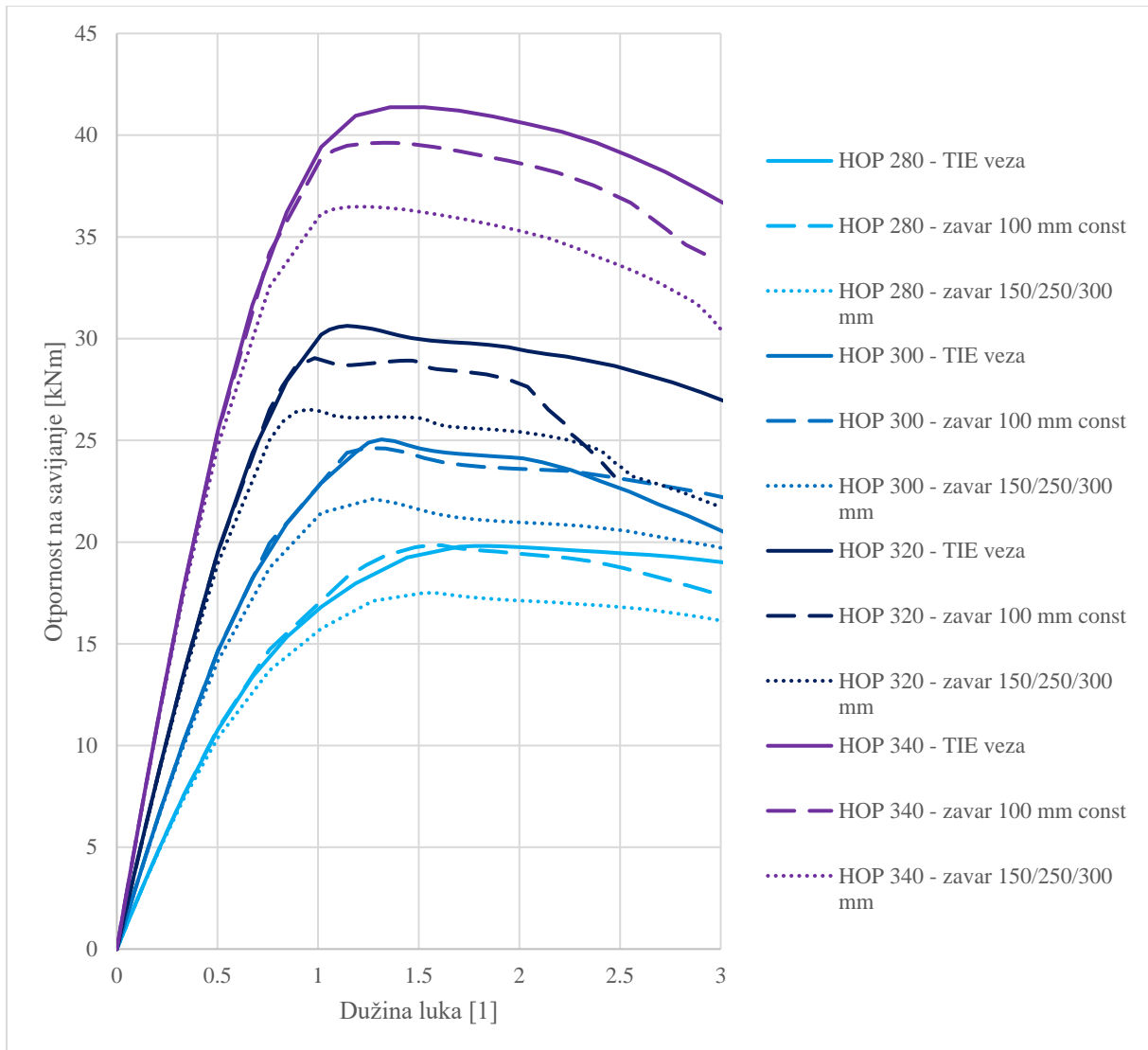
$$\Delta_1 = \left| \frac{M_{b,Rd}(TIE) - M_{b,Rd}(100 \text{ mm})}{M_{b,Rd}(TIE)} \right| \cdot 100 [\%]$$

Odstupanje između krute TIE veze i diskretno postavljenih zavara na razmacima 150/250/300 mm od sredine elementa prema krajevima:

$$\Delta_2 = \left| \frac{M_{b,Rd}(TIE) - M_{b,Rd}(150 / 250 / 300 \text{ mm})}{M_{b,Rd}(TIE)} \right| \cdot 100 [\%]$$

Tablica 9.4. Usporedba otpornosti na temelju različitog načina spajanja HOP profila

Profil	Način povezivanja	Otpornost [kNm]	Odstupanja Δ_1 i Δ_2 [%]
HOP 280	Kruta TIE veza	19,81	0,0
	Zavar 100 mm const	19,85	0,20
	Zavar 150/250/300 mm	17,51	11,61
HOP 300	Kruta TIE veza	25,05	0,0
	Zavar 100 mm const	24,62	1,72
	Zavar 150/250/300 mm	22,12	11,70
HOP 320	Kruta TIE veza	30,63	0,0
	Zavar 100 mm const	29,05	5,16
	Zavar 150/250/300 mm	26,52	13,42
HOP 340	Kruta TIE veza	41,37	0,0
	Zavar 100 mm const	39,63	4,21
	Zavar 150/250/300 mm	36,49	11,80



Slika 9.1. Usporedba različitih načina povezivanja HOP profila

Prilikom usporedbe rezultata vidljiv je nezanemariv pad otpornosti između početne konfiguracije (TIE veza) s konačnom konfiguracijom diskretnog rasporeda zavora (150/250/300 mm) u iznosu od oko 12%. Unatoč tome, vrijednosti otpornosti elementa na savijanje za konačnu konfiguraciju, dobivene s rasporedom zavora 150/250/300 mm, daju prihvatljive vrijednosti otpornosti elementa na savijanje uzimajući u obzir značajno smanjenje broja zavora, što može dovesti do smanjenja troškova tijekom proizvodnje svakog od tih elemenata.

9.5 Otpornost na savijanje IPE i HOP profila

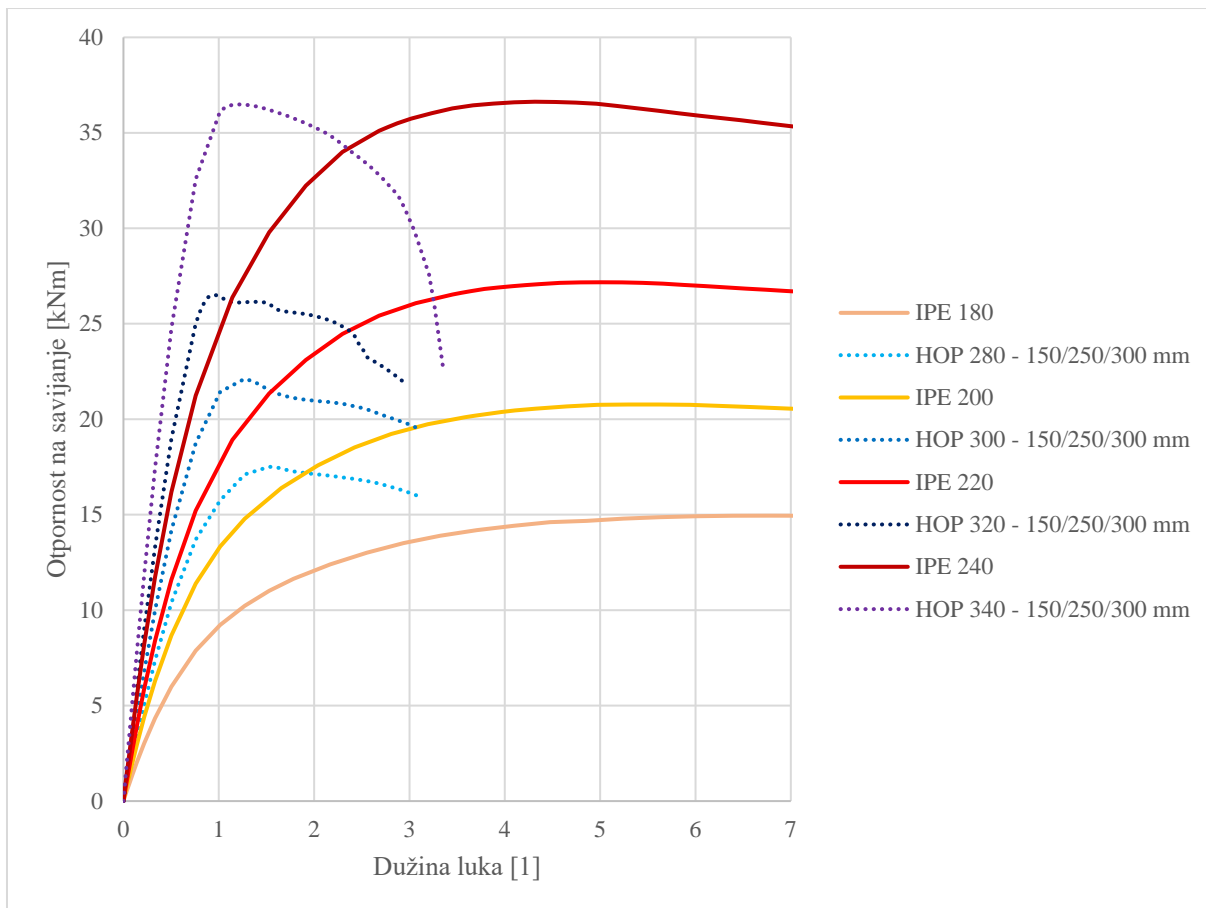
Kao jedna od dviju glavnih usporedbi u ovom istraživanju, u tablici 9.5. i grafički na slikama 9.2. i 9.3., dani su numerički rezultati ispitivanja HOP profila ostvarenih diskretnom vezom zavara na razmacima 150/250/300 mm koja je usvojena kao konačna i IPE profila. Unatoč smanjenju otpornosti, zbog korištenja manjeg broja zavara, profili HOP 280 i HOP 300 ostvaruju veću otpornost elementa na savijanje u odnosu na IPE 180 i IPE 200, dok profili HOP 320 i HOP 340 ostvaruju manju, ali ne značajnu razliku u otpornosti u odnosu na profile IPE 220 i IPE 240.

Odstupanje rezultata otpornosti dobiveno je prema izrazu:

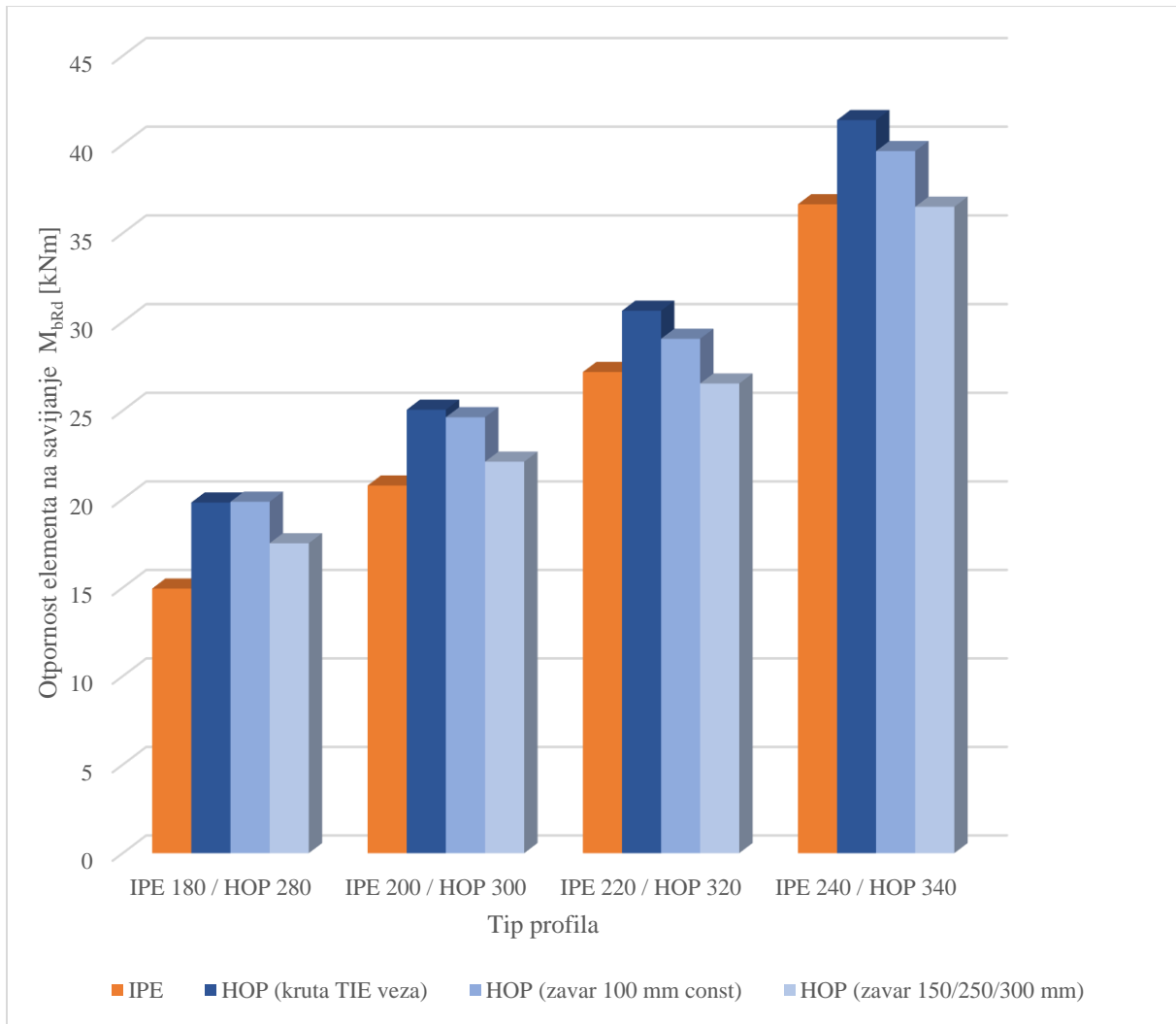
$$\Delta = \left| \frac{M_{b,Rd}(HOP) - M_{b,Rd}(IPE)}{M_{b,Rd}(HOP)} \right| \cdot 100 \text{ [%]}$$

Tablica 9.5. *Usporedba otpornosti IPE i HOP profila (150/250/300)*

Profil	Otpornost [kNm]	Odstupanje Δ [%]
IPE 180	14,94	14,68
HOP 280	17,51	
IPE 200	20,77	6,10
HOP 300	22,12	
IPE 220	27,17	2,39
HOP 320	26,52	
IPE 240	36,63	0,38
HOP 340	36,49	



Slika 9.2. Usporedba otpornosti IPE i HOP profila



Slika 9.3. Usporedba otpornosti IPE i HOP profila

9.6 Utrošak materijala

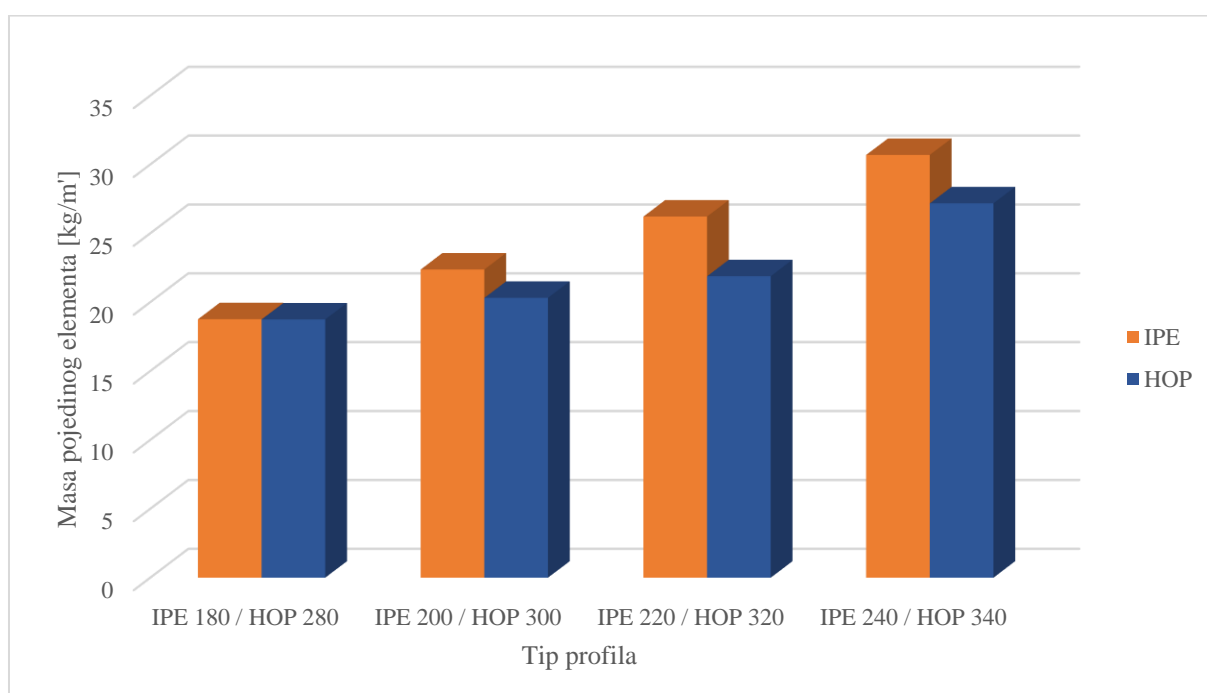
Druga glavna usporedba ovog istraživanja je usporedba utroška materijala za svaki od elemenata. Rezultati usporedbe dani su u tablici 9.6. i grafički na slici 9.4., a mogući utrošak materijala izražen je preko mase elemenata. Svi navedeni HOP profili, izuzev profila HOP 280, pokazuju značajno smanjenje mase, a time i utroška čelika, u usporedbi s IPE profilima. Ta vrijednost nam govori o mogućim povoljnim utjecajima na cijenu samog HOP profila u usporedbi s IPE profilom, pogotovo u slučaju potrebe za većim brojem istovjetnih elemenata korištenih na istoj konstrukciji. Olakšavanje konstrukcije ne samo da ima prednost kad je riječ o cijeni, već i kod proračuna građevine na potresno djelovanje te kod proračuna temeljenja.

Odstupanje rezultata masa dobiveno je sljedećim izrazom:

$$\Delta = \left| \frac{m(\text{IPE}) - m(\text{HOP})}{M_{b,Rd}(\text{IPE})} \right| \cdot 100 [\%]$$

Tablica 9.6. Usporedba masa IPE i HOP profila

Profil	Masa [kg/m']	Odstupanje Δ [%]
IPE 180	18,76	0,11
HOP 280	18,74	
IPE 200	22,37	9,21
HOP 300	20,31	
IPE 220	26,22	16,55
HOP 320	21,88	
IPE 240	30,69	11,44
HOP 340	27,18	



Slika 9.4. Prikaz usporedbe masa IPE i HOP profila

10 ZAKLJUČAK

10.1 Neposredni zaključci

S obzirom na veliki broj radova u kojima se može naći usporedba otpornosti na razini poprečnog presjeka različitih oblika hladno oblikovanih tankostijenih profila, cilj ovog istraživanja bila je moguća primjena i usporedba otpornosti na razini elementa jednog od takvih profila s toplo valjanim profilima koji se najčešće koriste u inženjerskoj praksi.

Na početku rada postavljene su dvije hipoteze, prva da će razvijeni hladno oblikovani sastavljeni profil imati približno jednaku ili veću otpornost elementa na savijanje uz manji utrošak čelika u odnosu na standardizirani toplo valjani IPE profil s kojim se uspoređivao te druga hipoteza, da diskretnim spajanjem dvaju dijelova hladno oblikovanog elementa neće doći do značajnog gubitka otpornosti na savijanje. Obje hipoteze su potvrđene provedenim istraživanjem.

Prilikom istraživanja, optimizacija i iznalaženje geometrije svakog hladno oblikovanog profila provedena je koristeći ograničenja dana u europskim normama [4], [5]. Također, analitički proračun je proveden koristeći se pravilima i smjernicama danima u europskim normama. Rezultati analitičkog proračuna uspoređeni su s rezultatima dobivenima numeričkim simulacijama kako bi se utvrdila točnost svakog od dvaju tipova proračuna. S obzirom na to da je apsolutno kruta veza između dva profila samo teoretski moguća, numeričkim modeliranjem simuliran je što realniji način povezivanja dva tankostijena elementa u diskretnim točkama.

Na temelju provedenog istraživanja mogu se donijeti sljedeći neposredni zaključci:

- Pogodnim oblikovanjem presjeka hladno oblikovanog tankostijenog elementa, uz određena geometrijska ograničenja, moguće je ostvariti bolju otpornost elementa na savijanje u odnosu na određene standardizirane toplo valjane profile.
- S obzirom na manju debljinu stijenke tankostijenih profila, za približno iste otpornosti elementa na savijanje u odnosu na toplo valjane profile, moguć je manji utrošak materijala što dovodi do manje vlastite težine elementa i mogućih povoljnih

ekonomskih učinaka prilikom serijske proizvodnje takvih hladno oblikovanih elemenata.

- Diskretno spajanje tankostijenih profila ne dovodi do značajnih gubitaka glede otpornosti elementa na savijanje. Diskretnim spajanjem smanjuje se broj zavara prilikom moguće serijske proizvodnje hladno oblikovanih profila što ima pozitivan učinak na jednostavnost izrade i bržu proizvodnju i u konačnici dovodi do manjih troškova proizvodnje.

10.2 Preporuke za daljnja istraživanja

Provedbom ovog istraživanja otvorilo se niz pitanja i ideja za daljnja istraživanja te svakako vrijedi napomenuti da kalibrirani numerički modeli iz ovog rada mogu poslužiti kao dobra osnova za takva buduća istraživanja. Sukladno tome, daju se sljedeće preporuke za daljnji smjer istraživanja:

- Na temelju proučene literature, pozornost bi trebalo obratiti na iznalaženje novih geometrijskih karakteristika tankostijenih profila gdje ima potencijala za dobivanje još većih otpornosti, međutim s proširenim ograničenjima kao što je navedeno u [12].
- Potrebno je istražiti ostale postojeće načine povezivanja (ili inovativne) sastavljenih tankostijenih nosača i dati ocjenu pouzdanosti na temelju dobivenih rezultata.
- Daljnja istraživanja se također trebaju bazirati na sprezanju tankostijenih sastavljenih profila i betona s različitim načinima ostvarivanja posmičnih veza između dva materijala. Eksperimentalna ispitivanja spregnutih sustava, primjerice HOP profila iz ovog istraživanja ili nekog drugog srodnog profila sa lakoagregatnim betonom zasigurno bi skrenula pozornost znanstvenicima i stručnjacima u građevinarstvu i eventualno postala temelj na kojem bi se bazirao analitički proračun za svakodnevnu upotrebu takvih sustava.

ZAHVALE

Zahvaljujemo se Zavodu za konstrukcije Građevinskog fakulteta u Zagrebu koji nam je omogućio pisanje ovog rada.

Najveću zahvalu upućujemo našem mentoru doc. dr. sc. Ivanu Lukačeviću na savjetima te neumornom vođenju i poticanju kroz cjelokupno istraživanje.

Također zahvaljujemo prof. dr. sc. Darku Dujmoviću na konstruktivnim savjetima i pomoći.

POPIS LITERATURE

- [1] “Preuzeto s web stranice.” [Online]. Available: <https://www.bjc1994.com/bjchi/other-services/built-up-beams/> (Pristup: 6. travanj 2019.).
- [2] D. Dubina, V. Ungureanu, R. Landolfo: Design of Cold-formed Steel Structures. Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-3 Design of cold-formed Steel Structures. Ernst & Sohn, A Wiley Company, ISBN-13: 978-3-433-02979-4, Berlin, 2012.
- [3] HRN EN 1993-1-1: Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1993-1-1:2005/A1:2014).
- [4] HRN EN 1993-1-3: Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija - Dio 1-3: Opća pravila - Dodatna pravila za hladno oblikovane elemente i limove (EN 1993-1-3:2006+AC:2009).
- [5] HRN EN 1993-1-5: Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija - Dio 1-5: Pločasti konstrukcijski elementi (EN 1993-1-5:2006/A1:2017).
- [6] ESDEP, The European Steel Design Education Programme, 1994.
- [7] J. M. Davies, “Recent research advances in cold-formed steel structures,” J. Constr. Steel Res., vol. 55, no. 1–3, pp. 267–288, 2000.
- [8] D. Dujmović, Separat iz kolegija Metalne konstrukcije 2: Konstrukcije od tankostijenih profila i limova,” Građevinski fakultet u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [9] B. W. Schafer, “Direct Strength Method (DSM) Design Guide,” Des. Guid. CF06-1, Am. Iron Steel Inst., 2006.
- [10] “Preuzeto s web stranice.” [Online]. Available: https://shellbuckling.com/presentations/thinWalledBeamColumns/pages/page_21.html. (Pristup: 6. travanj 2019.).
- [11] J. Ye, S. M. Mojtabei, I. Hajirasouliha, P. Shepherd, and K. Pilakoutas, “Strength and deflection behaviour of cold-formed steel back-to-back channels,” Eng. Struct., vol. 177, no. October, pp. 641–654, 2018.
- [12] J. Ye, I. Hajirasouliha, J. Becque, and K. Pilakoutas, “Development of more efficient cold-formed steel channel sections in bending,” Thin-Walled Struct., vol. 101, pp. 1–13, 2016.
- [13] J. Ye, I. Hajirasouliha, J. Becque, and A. Eslami, “Optimum design of cold-formed steel beams using Particle Swarm Optimisation method,” J. Constr. Steel Res., vol. 122, pp.

-
- 80–93, 2016.
- [14] “Visual Basic for Applications - Stable release: 7.1.” Microsoft.
- [15] B. Androić, D. Dujmović, and I. Džeba, *Metalne konstrukcije 1*. Zagreb: IGH, 1994.
- [16] I. Džeba, B. Androić, and D. Dujmović, *Metalne konstrukcije 3*. Zagreb: I.A. projektiranje, 1998.
- [17] *Stahl im Hochbau, Handbuch für die Anwendung von Stahl im Hoch - und Tiefbau Band I/Teil1*, Düsseldorf, 1984.
- [18] V. Šimić, *Otpornost materijala 1*, Zagreb: Školska knjiga, 2002.
- [19] “Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2017” Autodesk.
- [20] B. Androić, D. Dujmović, and I. Džeba, *Čelične konstrukcije 1*. Zagreb: I.A. projektiranje, 2009.
- [21] “CTCIM, LTBeam software (user manual), Centre Technique Industriel de la Construction Métallique Saint Aubin.” Francuska, 2012.
- [22] “ABAQUS, User’s Manual.” Dassault Systèmes Simulia Corp., 2012.
- [23] I. Čudina, “Određivanje elastičnog kritičnog momenta nosača jednoosno simetričnog poprečnog presjeka primjenom numeričkih simulacija”, Studentski rad za Rektorovu nagradu, 2017.
- [24] D. Dujmović, Predavanje iz kolegija Stabilnost konstrukcija “Primjena software-a ABAQUS kod problema stabilnosti pločastog elementa”, Građevinski fakultet u Zagrebu, 2018.
- [25] M. R. Haidarali and D. A. Nethercot, “Finite element modelling of cold-formed steel beams under local buckling or combined local/distortional buckling,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 49, no. 12, pp. 1554–1562, 2011.
- [26] HRN EN 1090-2: Izvedba čeličnih i aluminijskih konstrukcija - 2. dio: Tehnički zahtjevi za čelične konstrukcije (EN 1090-2:2008+A1:2011).
- [27] B. W. Schafer and T. Peköz, “Computational modeling of cold-formed steel: Characterizing geometric imperfections and residual stresses,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 47, no. 3, pp. 193–210, 1998.

POPIS SLIKA

Slika 1.1. <i>Vruće valjani I profil, H profil i U profil</i>	1
Slika 1.2. <i>Zavareni limeni nosači [1]</i>	2
Slika 1.3. <i>Široki spektar oblikovanja tankostijenih elemenata [6]</i>	3
Slika 1.4. <i>Povećanje nosivosti presjeka bez utroška materijala</i>	3
Slika 1.5. <i>Strukturalne nesavršenosti u materijalu [8]</i>	4
Slika 1.6. <i>Načini izrade hladno oblikovanih profila [6]</i>	4
Slika 1.7. <i>Raspodjela naprezanja u ploči [8]</i>	5
Slika 1.8. <i>Shematski prikaz lokalnog, distorzijskog i globalnog otkazivanja</i>	6
Slika 1.9. <i>Prikaz poluvalova na kojima se događaju različiti oblici otkazivanja [10]</i>	7
Slika 1.10. <i>Primjeri vijaka koji formiraju navoj u prethodno izbušenoj rupi [6]</i>	8
Slika 1.11. <i>Primjeri vijaka koji narezuju navoj u prethodno izbušenoj rupi [6]</i>	8
Slika 1.12. <i>Primjeri samobušećih vijaka [6]</i>	9
Slika 1.13. <i>Tehnike elektrootpornog zavarivanja [6]</i>	10
Slika 1.14. <i>Primjena tankostijenih limova [6]</i>	10
Slika 1.15. <i>Primjena tankostijenih profila [6]</i>	11
Slika 3.1. <i>Struktura istraživanja</i>	15
Slika 4.1. <i>Prikaz konstrukcijskih svojstava elemenata u ovisnosti $M - \varphi$</i>	16
Slika 4.2. <i>Prikaz razreda poprečnih presjeka</i>	17
Slika 4.3. <i>Prikaz geometrije IPE profila</i>	19
Slika 4.4. <i>Prikaz geometrije HOP profila – bruto</i>	22
Slika 4.5. <i>Prikaz geometrije HOP profila – efektivni presjek</i>	25
Slika 4.6. <i>Dijagram toka za proračun otpornosti presjeka (IPE profil)</i>	26
Slika 4.7. <i>Dijagram toka za proračun otpornosti presjeka (HOP profil) – dio 1</i>	27
Slika 4.8. <i>Dijagram toka za proračun otpornosti presjeka (HOP profil) – dio 2</i>	28
Slika 4.9. <i>Dijagram toka za proračun otpornosti presjeka (HOP profil) – dio 3</i>	29
Slika 4.10. <i>Dijagram toka za proračun otpornosti elementa (IPE i HOP profil)</i>	30
Slika 5.1. <i>Shematski prikaz skupine HOP profila u sklopu međukatne konstrukcije</i>	31
Slika 5.2. <i>Shematski prikaz HOP profila u sklopu međukatne konstrukcije</i>	31
Slika 5.3. <i>Dijagram toka optimizacije profila</i>	33
Slika 5.4. <i>Prikaz geometrijskih karakteristika HOP optimiziranog presjeka</i>	34

Slika 5.5. <i>Prikaz sheme promjene nagiba rubnog ukrućenja</i>	37
Slika 5.6. <i>a) Prikaz početne geometrije presjeka b) Prikaz konačne geometrije presjeka</i>	37
Slika 5.7. <i>Prikaz odnosa nagiba vanjskog ukrućenja i momenta otpora</i>	38
Slika 5.8. <i>Prikaz odnosa nagiba vanjskog ukrućenja i širine poprečnog presjeka</i>	38
Slika 5.9. <i>a) Prikaz bruto HOP presjeka b) Redukcija prilikom proračuna efektivnog presjeka</i> <i>c) Prikaz efektivnog presjeka</i>	41
Slika 5.10. <i>Prikaz odnosa visine presjeka i momenta otpora</i>	43
Slika 5.11. <i>Prikaz odnosa visine presjeka i površine presjeka</i>	43
Slika 5.12. <i>Odnos visine presjeka i momenta otpora - Zeleno područje</i>	44
Slika 6.1. <i>Prikaz geometrije IPE profila</i>	45
Slika 6.2. <i>Prikaz masa pojedinih IPE profila (utroška čelika)</i>	49
Slika 6.3. <i>Prikaz usporednih vrijednosti elastičnog i plastičnog momenta otpora</i>	54
Slika 6.4. <i>Prikaz otpornosti poprečnog presjeka IPE profila na savijanje</i>	58
Slika 6.5. <i>Prikaz statičkog sustava IPE nosača</i>	59
Slika 6.6. <i>Prikaz statičkog sustava IPE nosača i oblika momentnog dijagrama</i>	60
Slika 6.7. <i>Prikaz vrijednosti elastičnog kritičnog momenta IPE profila</i>	63
Slika 6.8. <i>Prikaz otpornosti elemenata na savijanje koristeći opću metodu</i>	65
Slika 6.9. <i>Statički sustav</i>	66
Slika 6.10. <i>Tip konačnog elementa [24]</i>	67
Slika 6.11. <i>Simulacija viličastih pridržanja</i>	67
Slika 6.12. <i>Mjerodavan oblik izvijanja (bočno – torzijski mod)</i>	68
Slika 6.13. <i>Ponašanje čelika [25]</i>	68
Slika 6.14. <i>Prikaz modela sa i bez nesavršenosti</i>	70
Slika 6.15. <i>Prikaz nosača nakon dosizanja krajnjeg opterećenja</i>	70
Slika 7.1. <i>Prikaz polovice poprečnog presjeka sa zadanim geometrijskim karakteristikama</i>	73
Slika 7.2. <i>Prikaz ekvivalentnog modela za proračun</i>	74
Slika 7.3. <i>Prikaz modela rubnog ukrućenja</i>	77
Slika 7.4. <i>Prikaz raspodjele naprezanja u poprečnom presjeku</i>	80
Slika 7.5. <i>Prikaz proračunatih komponenti h_1 i h_2</i>	82
Slika 7.6. <i>Prikaz statičkog sustava HOP nosača</i>	86
Slika 7.7. <i>Prikaz statičkog sustava HOP nosača i oblika momentnog dijagrama</i>	86
Slika 7.8. <i>Prikaz statičkog sustava HOP nosača i simulacije rubnih uvjeta</i>	88
Slika 7.9. <i>Prvi oblik izvijanja (bočno – torzijski mod)</i>	89
Slika 7.10. <i>Distorzijski mod izvijanja [27]</i>	90

Slika 7.11. <i>Prikaz profila HOP 340 sa i bez nesavršenosti</i>	91
Slika 7.12. <i>Prikaz nosača HOP 340 nakon dosizanja krajnjeg opterećenja</i>	91
Slika 8.1. <i>Prikaz pozicija zavora s uzdužne strane</i>	93
Slika 8.2. <i>Prikaz pozicija zavora s poprečne strane</i>	94
Slika 8.3. <i>Prikaz pozicija zavora s uzdužne strane u Abaqus – u i nosač nakon dosizanja krajnjeg opterećenja sa zavarima na konstantnom razmaku</i>	95
Slika 8.4. <i>Prikaz pozicija zavora s uzdužne strane</i>	96
Slika 8.5. <i>Prikaz pozicija zavora s uzdužne strane u Abaqus – u i nosač nakon dosizanja krajnjeg opterećenja sa zavarima na diskretnom razmaku 150/250/300</i>	96
Slika 8.6. <i>Usporedba različitih tipova povezivanja profila HOP 340</i>	97
Slika 9.1. <i>Usporedba različitih načina povezivanja HOP profila</i>	102
Slika 9.2. <i>Usporedba otpornosti IPE i HOP profila</i>	104
Slika 9.3. <i>Usporedba otpornosti IPE i HOP profila</i>	105
Slika 9.4. <i>Prikaz usporedbe masa IPE i HOP profila</i>	106

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. <i>Prikaz razreda poprečnog presjeka</i>	18
Tablica 5.1. <i>Ograničenja geometrijskih parametara HOP presjeka ovisno o debljini stijenke</i>	35
Tablica 5.2. <i>Konačna ograničenja geometrije HOP presjeka prema [4]</i>	35
Tablica 5.3. <i>Granične vrijednosti širina optimiziranih presjeka ovisno o širini IPE profila</i> ..	39
Tablica 5.4. <i>Granične vrijednosti visina optimiziranih presjeka ovisno o visini IPE profila</i> ..	40
Tablica 5.5. <i>Osnovne geometrijske karakteristike HOP profila</i>	44
Tablica 5.6. <i>Bruto geometrijske karakteristike HOP profila</i>	44
Tablica 6.1. <i>Geometrijske karakteristike profila IPE240</i>	45
Tablica 6.2. <i>Visine IPE profila</i>	47
Tablica 6.3. <i>Površine IPE profila</i>	48
Tablica 6.4. <i>Masa IPE profila po metru dužnom</i>	49
Tablica 6.5. <i>Momenti površine 2. stupnja IPE profila</i>	51
Tablica 6.6. <i>Momenti otpora IPE profila</i>	53
Tablica 6.7. <i>Razredi poprečnih presjeka profila</i>	57
Tablica 6.8. <i>Otpornost IPE presjeka na savijanje</i>	58
Tablica 6.9. <i>Vrijednosti elastičnog kritičnog momenta za IPE profile</i>	62
Tablica 6.10. <i>Otpornost elemenata IPE profila na savijanje</i>	64
Tablica 6.11. <i>Usporedba analitičkih i numeričkih rezultata za IPE 240</i>	68
Tablica 6.12. <i>Odnosi za određivanje vrijednosti nesavršenosti (Tablica 5.1 EN 1993-1-1)</i> ..	69
Tablica 6.13. <i>Odnosi potrebni za određivanje mjerodavne krivulje izvijanja (Tablica 6.4 EN 1993-1-1)</i>	69
Tablica 6.14. <i>Usporedba otpornosti elemenata IPE 240 dobivenih analitički i numerički</i>	71
Tablica 7.1. <i>Geometrijske i mehaničke karakteristike profila HOP 340</i>	72
Tablica 7.2. <i>Usporedba analitičkih i numeričkih rezultata za HOP 340</i>	89
Tablica 7.3. <i>Usporedba otpornosti elemenata HOP 340 dobivenih analitički i numerički</i>	92
Tablica 8.1. <i>Odstupanja različitih tipova povezivanja u odnosu na apsolutno krutu vezu</i>	97
Tablica 9.1. <i>Usporedba elastičnog kritičnog momenta razmatranih IPE profila</i>	99
Tablica 9.2. <i>Usporedba elastičnog kritičnog momenta razmatranih HOP profila</i>	99
Tablica 9.3. <i>Usporedba otpornosti elementa na savijanje HOP profila</i>	100

Tablica 9.4. <i>Usporedba otpornosti na temelju različitog načina spajanja HOP profila.....</i>	101
Tablica 9.5. <i>Usporedba otpornosti IPE i HOP profila (150/250/300)</i>	103
Tablica 9.6. <i>Usporedba masa IPE i HOP profila</i>	106

SAŽETAK

Mislav Pedišić, Anđelo Valčić

Optimizacija sastavljenih hladno oblikovanih konstrukcijskih elemenata izloženih savijanju

Sastavljeni hladno oblikovani konstrukcijski elementi mogu biti vrlo djelotvorni i atraktivni konstrukcijski elementi zbog uštede materijala, ali i zbog jednostavnosti ugradnje. Stoga se hladno oblikovani sastavljeni profili često koriste kao nosivi elementi u konstrukcijama ili kao razni tipovi pokrova i obloga. Međutim, tipovi profila koji još uvijek imaju najširu primjenu su toplo valjani profili.

Uzimajući u obzir sekundarne elemente međukatnih konstrukcija višekatnih zgrada ili sekundarne nosače u vidu podrožnica kod konstrukcija hala, najčešću primjenu imaju uskopojasni standardizirani europski profili – IPE. Unatoč tome, s obzirom na velik broj ovakvih elemenata u konstrukcijama smanjenje utroška materijala na ovim elementima može značajno utjecati smanjenje troškova izgradnje. Kao rješenje tog problema, ovaj rad istražuje primjenu hladno oblikovanih tankostijenih profila kao alternativnog rješenja sekundarnim nosačima izvedenim toplo valjanim IPE profilima.

Analitičke i numeričke parametarske studije provedene u ovom radu pokazale su da uz pogodno oblikovanje i raspored spojnih sredstava, optimizirani hladno oblikovani tankostijeni elementi pokazuju bolja svojstva (veća otpornost elementa na savijanje), uz manji utrošak materijala, što dovodi do mogućih manjih troškova izgradnje. Na temelju dobivenih rezultata, moguća su daljnja istraživanja vezana na pronalazak povoljnijih tipova presjeka hladno oblikovanih profila koji mogu dovesti do još boljih alternativnih rješenja.

Ključne riječi: Hladno oblikovani, toplo valjani, sekundarni elementi, otpornost na savijanje, točkasto zavarivanje, optimizacija

SUMMARY

Mislav Pedišić, Anđelo Valčić

Optimization of built – up cold – formed structural elements in bending

Built-up cold-formed structural elements can be very efficient structural elements, attractive due to material savings, but also for ease of construction. Therefore, built-up cold-formed elements are mainly used as load-bearing structural members or as various types of roof and wall sheetings. However, types of structural elements that still have the widest application in construction are hot- rolled elements.

Taking into account the secondary elements in floor systems of multi-storey buildings or secondary beams in case of single-storey buildings, the most common application is narrow flange standardized European IPE section. Nevertheless, given a large number of such elements in structures, material savings using these elements, can significantly affect the reduction of construction costs. As a solution to this problem, this research deals with the application of cold-formed thin-walled elements as an alternative solution to secondary hot rolled IPE beams.

The analytical and numerical parametric studies demonstrated in this paper has shown that with proper modelling of cross sections and with the favourable arrangement of connections, optimized built-up cold-formed thin-walled elements result in better characteristics than their counterparts (larger bending capacity), with lower material consumption and thus possibly lower construction costs. Based on the obtained results, further research in finding more favourable types of cross sections of cold-formed elements that can lead to even better alternative solutions is possible.

Keywords: Cold – formed, hot – rolled, secondary elements, bending capacity, spot welding, optimization