

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidatka:

Nataša Aleksić

Tlačna in upogibna nosilnost polnostenskih nosilcev, ojačanih z vzdolžnimi ojačitvami

Diplomska naloga št.: 2968

Mentor:
prof. dr. Darko Beg

Ljubljana, 3. 7. 2007

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **NATAŠA ALEKSIĆ** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
**»TLAČNA IN UPOGIBNA NOSILNOST POLNOSTENSKIH NOSILCEV,
OJAČANIH Z VZDOLŽNIMI OJAČITVAMI«.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 27.06.2007

Nataša Aleksić

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.014.2:624.073.8(043.2)
Avtor:	Nataša Aleksić
Mentor:	prof. dr. Darko Beg
Naslov:	Tlačna in upogibna nosilnost polnostenskih nosilcev, ojačanih z vzdolžnimi ojačitvami
Obseg in oprema:	109 str., 14 pregl., 105 sl., 54 en.
Ključne besede:	Jeklene konstrukcije, polnostenski nosilci, vzdolžne ojačitve, izbočenje pločevine

Izvleček

Diplomska naloga obravnava izračun nosilnosti polnostenskih nosilcev, enostransko ojačanih z vzdolžnimi ojačitvami pravokotnega prereza, pri tlačni in upogibni obremenitvi, ki ga določa standard EN 1993-1-5. Predstavljena so pravila za upoštevanje vpliva izbočenja pločevine zaradi normalnih napetosti.

Izračun po standardu smo s pomočjo programa EXCEL izvedli za večje število primerov in pri tem analizirali vpliv različnih parametrov na rezultate. Parametri, ki smo jih obravnavali, so: položaj ojačitve, vitkost stojine, razmerje med dolžino in višino stojine, razmerje med površinama prečnih prerezov ojačitve in stojine, razmerje med površinama pasnice in stojine, kvaliteta jekla ter višina stojine. Ločeno smo obravnavali primer upogibno obremenjenega I-profila z eno ojačitvijo, z dvema ojačitvama ter primer tlačno obremenjene pločevine z n ojačitvami. Vpliv izbočenja pločevine na nosilnost se v računu po standardu upošteva s pomočjo redukcijskih koeficientov za določanje sodelujočega prereza, ki so odvisni od elastičnih kritičnih napetosti izbočenja. Te se računajo na poenostavljenih računskih modelih, ki le v omejenem obsegu ustrezno ponazarjajo obnašanje ojačane pločevine. Elastične kritične napetosti smo bolj točno določili s pomočjo računalniškega programa EBPlate, ki računa po energijski metodi. Poleg primerjave kritičnih napetosti nas je zanimalo, kako različne vrednosti kritičnih napetosti vplivajo na nosilnost. Zato smo v računu nosilnosti po standardu kritične napetosti izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ nadomestili s kritičnimi napetostmi, izračunanimi s pomočjo programa EBPlate. Primerjava rezultatov obeh načinov računa je pokazala, da se razlike v vrednostih kritičnih napetosti ne odražajo enako v rezultatih za nosilnost.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 624.014.2:624.073.8(043.2)
Author: Nataša Aleksić
Supervisor: prof. dr. Darko Beg
Title: Compression and bending resistance of longitudinally stiffened plate girders
Notes: 109 p., 14 tab., 105 fig., 54 eq.
Key words: Steel structures, plate girders, longitudinal stiffeners, plate buckling

Abstract

This thesis deals with the resistance of plate girders stiffened with one sided rectangular longitudinal stiffeners under compression and bending, determined according to the rules given in EN 1993-1-5. It presents the rules for determination of plate buckling effects due to direct stresses.

Compression and bending resistance was calculated for a wide range of cross sections, using the computer program EXCEL, and the effects of different parameters were studied. The parameters investigated were: the location of the stiffener, the slenderness of the plate, the plate aspect ratio, the stiffener to plate area ratio, the flange to web area ratio, the steel grade and the web height. Separate calculations were made for three different cases: I-girder stiffened with one or two longitudinal stiffeners under bending and plate stiffened with n longitudinal stiffeners under compression. In EN 1993-1-5 the effects of plate buckling are taken into account by effective cross sectional areas, determined by reduction factors which depend on elastic critical buckling stresses. Calculation of critical stresses is based on simplified models which may have limited applicability. Elastic critical buckling stresses were calculated more accurately by using computer program EBPlate (energy method). In addition to the comparison of critical stresses we were interested in the effect that the different critical stresses have on the section resistance. Therefore, the critical plate buckling stress in the expressions given by EN 1993-1-5 was replaced by critical stresses from EBPlate calculation. The comparison of the results of both methods of calculation showed that the differences in critical stresses were differently reflected in the results for section resistance.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Darku Begu za vodenje in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge.

Vsem na Katedri za metalne konstrukcije se zahvaljujem za prijetno delovno vzdušje. Posebna zahvala gre Primožu Može, ki mi je pomagal pri delu z računalniškimi programi.

Zahvalila bi se tudi svojima staršema, ki sta mi omogočila dolgoletni študij in mi z ljubeznijo nudila podporo.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	STANDARD EN 1993-1-5: PLOČEVINASTI KONSTRUKCIJSKI ELEMENTI	3
2.1	Izbočenje pločevine zaradi normalnih napetosti v mejnem stanju nosilnosti (EN1993-1-5, Poglavje 4)	3
2.1.1	Metoda sodelujočega prereza	5
2.1.2	Neojačane pločevine	7
2.1.3	Vzdolžno ojačane pločevine	10
2.1.3.1	Izbočenje panela	12
2.1.3.1.1	Račun kritičnih napetosti ojačane pločevine – primer več vzdolžnih ojačitev (EN 1993-1-5, Dodatek A.1)	13
2.1.3.1.2	Račun kritičnih napetosti ojačane pločevine – primer ene ali dveh vzdolžnih ojačitev (EN 1993-1-5, Dodatek A.2)	14
2.1.3.2	Izbočenje pločevine, podobno uklonu tlačene palice	18
2.1.3.3	Interakcija med izbočenjem panela in uklonom ojačitev	21
2.1.4	Kontrola nosilnosti prereza	22
3	RAČUNSKI PRIMER	23
3.1	Polnostenski nosilec z eno vzdolžno ojačitvijo – čisti upogib	23
3.2	Lokalno izbočenje posameznih panelov	24
3.2.1	Panel 1	24
3.2.2	Panel 2	25
3.3	Elastična kritična napetost izbočenja pločevine $\sigma_{cr,p}$	26
3.4	Izbočenje vzdolžnih ojačitev	28
3.5	Interakcija med izbočenjem pločevine in ojačitve	29
3.6	Geometrijske karakteristike sodelujočega prereza	30
3.7	Upogibna nosilnost prereza	32
3.8	Izbočenje stojine zaradi uklona pasnice	32

4	PARAMETRIČNA ANALIZA	33
4.1	Račun z računalniškim programom EBPlate	35
4.1.1	Metoda računa kritičnih napetosti.....	35
4.1.2	Vhodni podatki	36
4.1.3	Rezultati.....	37
4.2	Račun po standardu EN-1993-1-5.....	43
4.2.1	I-profil z eno vzdolžno ojačitvijo – čisti upogib	44
4.2.1.1	Vpliv vitkosti stojine nosilca h_w/t_w	44
4.2.1.2	Vpliv razmerja med dolžino in višino panela $\alpha=a/h_w$	51
4.2.1.3	Vpliv površine prečnega prereza ojačitve A_{sl}/A_w	58
4.2.1.4	Vpliv kvalitete jekla (S235, S355, S690)	63
4.2.1.5	Vpliv površine prereza pasnice A_f/A_w	66
4.2.1.6	Vpliv višine stojine h_w	67
4.2.2	I-profil z dvema vzdolžnima ojačitvama – čisti upogib	68
4.2.2.1	Vpliv vitkosti stojine nosilca h_w/t_w	68
4.2.2.2	Vpliv razmerja med dolžino in višino panela $\alpha=a/h_w$	75
4.2.2.3	Vpliv površine ojačitve A_{sl}/A_w	81
4.2.2.4	Vpliv kvalitete jekla (S235, S355, S690)	85
4.2.2.5	Vpliv površine prečnega prereza pasnice A_f/A_w	88
4.2.2.6	Vpliv višine stojine h_w	89
4.2.3	Pločevina z eno, dvema ali več vzdolžnimi ojačitvami ojačitvami, čisti tlak....	90
4.2.3.1	Vpliv vitkosti pločevine b/t	90
4.2.3.2	Vpliv razmerja med dolžino in višino panela $\alpha = a/b$	96
4.2.3.3	Vpliv razmerja površin prečnih prerezov ojačitve in pločevine A_{sl}/A_p	99
4.2.3.4	Vpliv kvalitete jekla (S235, S355, S690)	104
5	ZAKLJUČEK	106
VIRI	109	

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Kontrola izbočenja zaradi vpliva pasnic pri različnih vrednostih parametrov .	34
Preglednica 2: Velikosti parametrov pri računu s programom EBPlate.....	36
Preglednica 3: Kritične napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ – ena vzdolžna ojačitev (čisti upogib)	38
Preglednica 4: Kritične napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ – dve vzdolžni ojačitvi (čisti upogib)	40
Preglednica 5: Kritične napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ – n vzdolžnih ojačitev (čisti tlak).....	41
Preglednica 6: Velikosti parametrov pri računu po standardu	43
Preglednica 7: Razlike v nosilnosti med $M_{Rd}(EN)$ in $M_{Rd}(EBPlate)$ glede na vrednosti $M_{Rd}(EBPlate)$ pri legah ojačitve $z_{sl}=0,05h_w$ in $z_{sl}=0,10h_w$	56
Preglednica 8: Povečanje upogibne nosilnosti pri najbolj učinkoviti legi ojačitve glede na nosilnost pri najmanj učinkoviti legi ojačitve na sredini višine stojine za različna razmerja $\alpha=a/h_w$ in vitkosti stojine h_w/t_w (ena vzdolžna ojačitev)	56
Tabela 9: Razlike v nosilnosti med $M_{Rd}(EN)$ in $M_{Rd}(EBPlate)$ glede na $M_{Rd}(EN)$ pri legah ojačitve $z_{sl}=0,05h_w$ in $z_{sl}=0,10h_w$	62
Preglednica 10: Povečanje upogibne nosilnosti pri najbolj učinkoviti legi ojačitve glede na nosilnost pri najmanj učinkoviti legi ojačitve na sredini višine stojine za različna razmerja A_{sl}/A_w in vitkosti stojine h_w/t_w (ena vzdolžna ojačitev)	63
Preglednica 11: Razlike v nosilnosti med $M_{Rd}(EN)$ in $M_{Rd}(EBPlate)$ pri legah 1. ojačitve $z_{slI}=0,05h_w$ in $z_{slI}=0,10h_w$	78
Preglednica 12: Povečanje upogibne nosilnosti pri najbolj učinkoviti legi ojačitev glede na nosilnost pri najmanj učinkoviti legi ojačitve na sredini višine stojine za različna razmerja $\alpha=a/h_w$ in vitkosti stojine h_w/t_w (dve vzdolžni ojačitvi).....	79
Preglednica 13: Razlike v nosilnosti med $M_{Rd}(EN)$ in $M_{Rd}(EBPlate)$ pri legah 1. ojačitve $z_{slI}=0,05h_w$ in $z_{slI}=0,10h_w$	85
Preglednica 14: Povečanje upogibne nosilnosti pri najbolj učinkoviti legi ojačitev glede na nosilnost pri najmanj učinkoviti legi ojačitve na sredini višine stojine za različna razmerja A_{sl}/A_w in vitkosti stojine h_w/t_w (dve vzdolžni ojačitvi).....	85

KAZALO SLIK

Slika 1: Kritične napetosti izbočenja stojine, ojačane z eno vzdolžno ojačitvijo, pri čistem upogibu	2
Slika 2: Izbočenje tlačene pločevine	4
Slika 3: Tlačena pločevina pred in po izbočenju	5
Slika 4: Prerez 4. razreda kompaktnosti – osna sila	6
Slika 5: Prerez 4. razreda kompaktnosti – upogibni moment	7
Slika 6: Koeficient izbočenja $k\sigma$	9
Slika 7: Tlačeni elementi, podprti ob obeh vzdolžnih robovih (Tabela 4.1 v EN 1993-1-5) ..	10
Slika 8: Tlačeni elementi z enim prostim vzdolžnim robom (Tabela 4.2 v EN 1993-1-5)	10
Slika 9: Različna načina izbočenja	11
Slika 10: Ojačana pločevina v tlaku	12
Slika 11: Računski model v primeru ene vzdolžne ojačitve v tlačeni coni	15
Slika 12: Tlačen element ojačitve s pločevino podprt z elastično podlago	16
Slika 13: Računski model z dvema ojačitvama v tlačeni coni	17
Slika 14: Določitev pripadajočih delov pločevine	19
Slika 15: Ekscentričnost ojačitve	21
Slika 16: Interakcija med izbočenjem panela in uklonom ojačitev	22
Slika 17: Vzdolžni in prečni prerez	23
Slika 18: Prečni prerez in razporeditev normalnih napetosti	24
Slika 19: Polni in sodelujoči prerez	26
Slika 20: Ekscentričnost ojačitve	29
Slika 21: Geometrija sodelujočega prereza	30
Slika 22: Preprečitev torzijskega uklona pravokotne ojačitve	34
Slika 23: Računski model	36
Slika 24: Izbočenje panela ($h_w=2000\text{mm}$; $a/h_w=1,0$; $h_w/t_w=200$; $A_{sl}/A_w=0,10$; $z_{sl}/h_w=0,20$) v primeru: a) ene vzdolžne ojačitve ($\sigma_{cr}=1014\text{MPa}$); b) dveh vzdolžnih ojačitev ($\sigma_{cr}=1659\text{MPa}$) – čisti upogib	37
Slika 25: Izbočenje panela ($h_w=2000\text{mm}$; $a/h_w=1,0$; $h_w/t_w=200$; $A_{sl}/A_w=0,10$; $n=3$) v primeru treh vzdolžnih ojačitev ($\sigma_{cr}=645\text{MPa}$) – čisti tlak	37

Slika 26: Lega ojačitve blizu pasnice in blizu sredine višine stojine (računski model ojačitve na elastični podlagi).....	44
Slika 27: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od lege ojačitve za različne vitkosti stojine h_w/t_w (račun po standardu EN 1993-1-5).....	45
Slika 28: Elastične kritične napetosti izbočenja panela σ_{cr} v odvisnosti od lege ojačitve za različne vitkosti stojine h_w/t_w (račun s programom EBPlate).....	46
Slika 29: Primerjava elastičnih kritičnih napetosti izbočenja σ_{cr} v odvisnosti od: a) lege ojačitve z_{sl}/h_w , za vitkost stojine $h_w/t_w=200$ in b) vitkosti stojine h_w/t_w , za lego ojačitve $z_{sl}/h_w=0,20$	47
Slika 30: Redukcijski koeficient ρ_c v odvisnosti od lege ojačitve za različne vitkosti stojine h_w/t_w	48
Slika 31: Primerjava koeficientov ρ_c v odvisnosti od: a) lege ojačitve; b) vitkosti stojine.....	48
Slika 32: M_{Rd} v odvisnosti od: a) lege ojačitve (EN); b) vitkosti stojine (primerjava).....	49
Slika 33: Upogibna nosilnost v odvisnosti od lege ojačitve za posamezne vitkosti h_w/t_w , za primer $h=2000\text{mm}$; $A_{sl}/A_w=0,1$; $A_{fl}/A_w=0,75$; S355.....	50
Slika 34: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w (račun po standardu).....	51
Slika 35: Elastične kritične napetosti izbočenja σ_{cr} v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w (račun s programom EBPlate).....	52
Slika 36: Primerjava kritičnih napetosti izbočenja $\sigma_{cr,(EN)}$ in $\sigma_{cr,(EBPlate)}$ v odvisnosti od lege ojačitve pri posameznih geometrijskih razmerjih a/h_w , za primer: $h_w=2000\text{mm}$, $h_w/t_w=200$, $A_{sl}/A_w=0,1$, $A_{fl}/A_w=0,75$; S355.....	53
Slika 37: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w	54
Slika 38: Primerjava upogibnih nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w	55
Slika 39: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c in upogibnih nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja α	57
Slika 40: Kritične napetosti $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,p}$ v odvisnosti od lege ojačitve za različna razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w	58

Slika 41: Kritične napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ (desno) v odvisnosti od lege ojačitve za različna razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w	59
Slika 42: Primerjava $\sigma_{cr,p}$ ter $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w	59
Slika 43: Primerjava kritičnih napetosti $\sigma_{cr,c}$, $\sigma_{cr,p}$ ter $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od lege ojačitve pri posameznih razmerjih površin prečnih prerezov A_{sl}/A_w	60
Slika 44: Primerjava koeficientov ρ_c v odvisnosti od lege ojačitve za različna razmerja prerezov A_{sl}/A_w	61
Slika 45: Kritične napetosti $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,p}$ v odvisnosti od: a) lege ojačitve; b) vitkosti stojine, za različne kvalitete jekla (S235, S355 in S690)	63
Slika 46: Redukcijski koeficienti ρ_c v odvisnosti od: a) kvalitete jekla (S235, S355 in S690) za $z_{sl}=0,20h_w$; b) lege ojačitve za različne kvalitete jekla.....	64
Slika 47: Upogibna nosilnost M_{Rd} v odvisnosti od: a) kvalitete jekla za različne vitkosti stojine, b) lege ojačitve za različne kvalitete jekla (S235, S355 in S690)	64
Slika 48: Vpliv parametra α na upogibno nosilnost M_{Rd} pri jeklu kvalitete a) S235 in b) S355 za primer: $h_w=2000\text{mm}$, $h_w/t_w=200$, $A_{sl}/A_w=0,1$, $A_f/A_w=0,75$	65
Slika 49: Vpliv parametra A_{sl}/A_w na upogibno nosilnost M_{Rd} pri jeklu kvalitete a) S235 in b) S355 za primer: $h_w=2000\text{mm}$, $h_w/t_w=200$, $A_{sl}/A_w=0,1$, $A_f/A_w=0,75$	65
Slika 50: a) Upogibna nosilnost prečnega prereza v odvisnosti od vitkosti stojine za različna razmerja A_f/A_w ; b) Upogibna nosilnost prečnega prereza v odvisnosti od razmerja A_f/A_w za: b) različna geometrijska razmerja α ; c) različna razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w ; d) različne kvalitete jekla.....	66
Slika 51: a) Upogibna nosilnost prečnega prereza v odvisnosti od vitkosti stojine za različne višine stojin h_w ; upogibna nosilnost prečnega prereza v odvisnosti od višine stojine h_w za: b) različna razmerja ; c) različna razmerja prerezov in d) različne kvalitete jekla	67
Slika 52: Parametri pri primeru dveh vzdolžnih ojačitev	68
Slika 53: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od lege ojačitev za različne vitkosti stojine h_w/t_w (račun po standardu EN 1993-1-5)	69
Slika 54: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od lege ojačitev za različne vitkosti stojine h_w/t_w (račun s programom EBPlate).....	69

Slika 55: Primerjava kritičnih napetosti izbočenja σ_{cr} , v odvisnosti od lege ojačitve pri posameznih vitkosti stojine h_w/t_w , za primer: $h_w=2000\text{mm}$, $a/h_w=1,0$, $A_{sl}/A_w=0,1$, $A_f/A_w=0,75$; S355	71
Slika 56: Primerjava kritičnih napetosti izbočenja σ_{cr} , v odvisnosti vitkosti stojine h_w/t_w ,.....	72
Slika 57: Primerjava koeficientov ρ_c v odvisnosti od lege ojačitve za različne vitkosti stojine h_w/t_w	72
Slika 58: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c v odvisnosti vitkosti stojine h_w/t_w za legi ojačitev $z_{sl}/h_w=0,133$ in $z_{sl}/h_w=0,20$	73
Slika 59: Maksimalna upogibna nosilnost $M_{Rd,max}$ I-profila z eno in dvema vzdolžnima ojačitvama v odvisnosti od vitkosti stojine.....	73
Slika 60: Primerjava upogibne nosilnosti M_{Rd} I-profila z dvema vzdolžnima ojačitvama v odvisnosti od lege ojačitev	74
Slika 61: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od lege ojačitev za različna geometrijska razmerja a/h_w (račun po standardu)	75
Slika 62: Elastične kritične napetosti izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ v odvisnosti od lege ojačitev za različna geometrijska razmerja a/h_w (račun s programom EBPlate)	76
Slika 63: Primerjava elastičnih kritičnih napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$, $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od razmerja a/h_w	76
Slika 64: Primerjava elastičnih kritičnih napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$, $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od lege ojačitev za posamezna geometrijska razmerja a/h_w	77
Slika 65: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w	78
Slika 66: Primerjava upogibnih nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w	79
Slika 67: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c in upogibnih nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w	81
Slika 68: Kritične napetosti a) $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,p}$ ter b) $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od lege ojačitve za različna razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w	82
Slika 69: Primerjava kritičnih napetosti $\sigma_{cr,p}$ ter $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w za položaj ojačitve $z_{sl,1}/h_w=0,133$	82

Slika 70: Primerjava kritičnih napetosti $\sigma_{cr,c}$, $\sigma_{cr,p}$ ter $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od lege ojačitve pri posameznih razmerjih površin prečnih prerezov A_{sl}/A_w	83
Slika 71: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c v odvisnosti od lege ojačitev za različna razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w	84
Slika 72: Primerjava upogibnih nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitev za različna razmerja površin prečnih prerezov A_{sl}/A_w	84
Slika 73: Kritične napetosti $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,p}$ v odvisnosti od: a) lege ojačitve ; b) vitkosti stojine za različne kvalitete jekla (S235, S355 in S690)	85
Slika 74: Redukcijski koeficienti ρ_c v odvisnosti od: a) lege ojačitev; b) vitkosti stojine, za različne kvalitete jekla (S235, S355 in S690) ter c) kvalitete jekla, za različne vitkosti stojine	86
Slika 75: Upogibne nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitve za kvalitete jekla: a)S235; b) S690 za primer: $h=2000\text{mm}$, $h/t=200$, $A_{sl}/A_w=0,1$, $A_f/A_w=0,75$	86
Slika 76: Upogibne nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitve za kvalitete jekla: a)S235; b) S690 za primer: $h=2000\text{mm}$, $h/t=200$, $A_{sl}/A_w=0,1$, $A_f/A_w=0,75$ in različna razmerja A_{sl}/A_w	87
Slika 77: Upogibne nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od kvalitete jekla za različne vitkosti stojine, v primeru $z_{sl}/h_w=0,10$	87
Slika 78: a) Upogibna nosilnost prečnega prereza v odvisnosti od vitkosti stojine za različna razmerja površin A_f/A_w ; b) Upogibna nosilnost prečnega prereza v odvisnosti od razmerja prerezov A_f/A_w za: b) različna geometrijska razmerja α ; c) različna razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w ; d) različne kvalitete jekla, pri legi ojačitev $z_{sl}/h_w=0,10$	88
Slika 79: a) Upogibna nosilnost prečnega prereza M_{Rd} v odvisnosti od vitkosti stojine za različne višine stojin h_w ; M_{Rd} v odvisnosti od višine stojine h_w za: b) različna razmerja α ; c) različna razmerja prerezov A_{sl}/A_w in d) različne kvalitete jekla.....	89
Slika 80: Geometrija panela, ojačanega z n ojačitvami (čisti tlak).....	90
Slika 81: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različne vitkosti stojine h_w/t_w	91
Slika 82: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različne vitkosti stojine h_w/t_w	91
Slika 83: Primerjava $\sigma_{cr,p}$, $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različne vitkosti pločevine b/t , za primer: $b=2000\text{mm}$; $a/b=1,0$; $A_{sl}/A_w=0,10$ in S355	92

Slika 84: Primerjava $\sigma_{cr,p}$, $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od vitkosti pločevine b/t , za primer: $n_{ojačitev}=4$ $b=2000\text{mm}$; $a/b=1,0$; $A_{sl}/A_w=0,10$ in S355	93
Slika 85: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različne vitkosti pločevine b/t	94
Slika 86: Primerjava tlačnih nosilnosti N_{Rd} v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev pri različnih vitkosti pločevine b/t ; za primer: $b=2000\text{mm}$; $a/b=1,0$; $A_{sl}/A_w=0,10$ in S355.....	95
Slika 87: $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja α	96
Slika 88: $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja α	96
Slika 89: Primerjava $\sigma_{cr,p}$, $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja α , za primer: $b=2000\text{mm}$; $b/t=200$; $A_{sl}/A_p=0,10$ in S355.....	97
Slika 90: Primerjava koeficientov ρ_c v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja α	98
Slika 91: Primerjava nosilnosti N_{Rd} v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja α	98
Slika 92: Primerjava nosilnosti N_{Rd} v odvisnosti od razmerja α za različno število vzdolžnih ojačitev	99
Slika 93: Primerjava nosilnosti N_{Rd} v odvisnosti od vitkosti pločevine za različna razmerja α	99
Slika 94: $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja prevezov A_{sl}/A_p	100
Slika 95: a) $\sigma_{cr,p}$ in b) $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od razmerja A_{sl}/A_p za različno število vzdolžnih ojačitev	100
Slika 96: a) $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja A_{sl}/A_p in b) $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od razmerja A_{sl}/A_p za različno število vzdolžnih ojačitev.....	101
Slika 97: Primerjava $\sigma_{cr,p}$, $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja A_{sl}/A_p , za primer: $b=2000\text{mm}$; $b/t=200$; $a/b=1,0$ in S355	102
Slika 98: Primerjava koeficientov ρ_c v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja A_{sl}/A_p	102
Slika 99: Primerjava nosilnosti N_{Rd} v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja A_{sl}/A_p	103

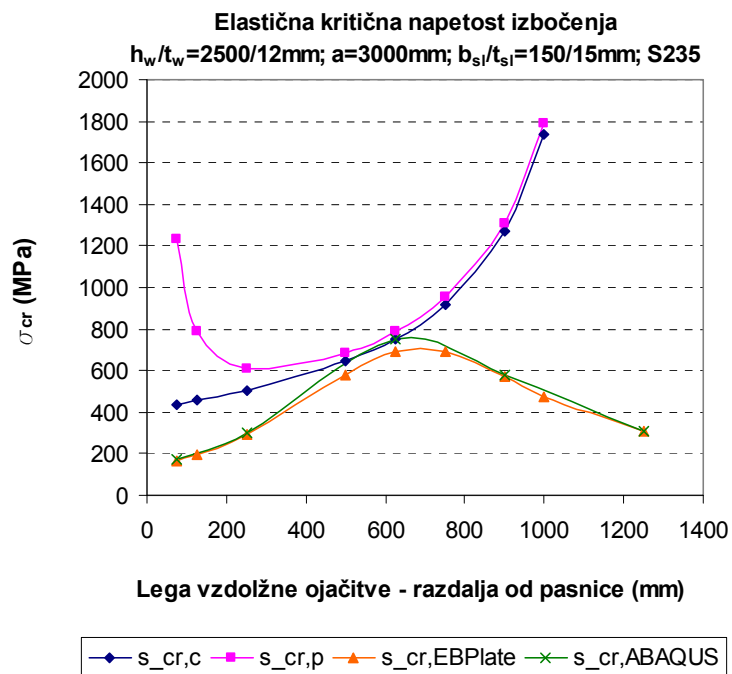
Slika 100: Primerjava nosilnosti N_{Rd} v odvisnosti od A_{sl}/A_p za različno število vzdolžnih ...	103
Slika 101: Kritične napetosti v odvisnosti od števila ojačitev pri različnih kvalitetah jekla .	104
Slika 102: Kritične napetosti $\sigma_{cr,p}$ v odvisnosti od kvalitete jekla za različne vitkosti pločevine	104
Slika 103: Redukcijski koeficient v odvisnosti od števila ojačitev za različne kvalitete jekla	105
Slika 104: Tlačna nosilnost N_{Rd} v odvisnosti od kvalitete jekla za različne vitkosti pločevine	105
Slika 105: : Tlačna nosilnost N_{Rd} v odvisnosti od števila ojačitev pri različnih kvalitetah jekla	105

1 UVOD

Varjeni polnostenski nosilci, sestavljeni iz tankih pločevin, ki so v vzdolžni in/ali prečni smeri ojačane z ojačitvami, se v gradbeništvu uporabljajo pri konstrukcijah, kjer je ključnega pomena visoka nosilnost pri nizki lastni teži. To so n.pr. mostne plošče in škatlasti nosilci mostov velikih razponov, ladijske lupine in plošče, žerjavne proge. Zaradi velike vitkosti takih pločevin se ob nastopu tlačne in upogibne obremenitve pojavi problem stabilnosti oziroma nevarnost izbočenja pločevine. Ojačane pločevine obravnava standard EN 1993-1-5 in problem izbočenja rešuje s pomočjo elastičnih kritičnih napetosti, ki vplivajo na nosilnost. Te se računajo na poenostavljenih računskih modelih. Ker pa je vpliv vzdolžnih ojačitev na izbočenje pločevine odvisen od številnih parametrov, ki določajo geometrijo pločevine in ojačitev, je lahko primernost poenostavljenih računskih modelov v številnih primerih vprašljiva.

Pri primerjavi kritičnih napetosti, izračunanih s poenostavljenimi izrazi po standardu, z rezultati numeričnega računa kritičnih napetosti (računalniška programa ABAQUS in EBPlate) se izkaže, da se rezultati ujemajo le v primeru, ko je ojačitev v srednjem delu tlačene cone. Pri legi ojačitve blizu pasnice in blizu sredine višine stojine, pa vrednosti $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ naraščajo v neskončnost in se bistveno razlikujejo od vrednosti numeričnih rezultatov, ki so tam najmanjše (Slika 1). Pojavi se vprašanje, kakšne so pri tem razlike v nosilnosti prereзов, ki se določa s pomočjo redukcijskih koeficientov, ki so odvisni od kritičnih napetosti. Da bi ugotovili, kako se odstopanja rezultatov obeh načinov računa spreminjajo s spreminjanjem različnih parametrov, ter kako vplivajo na nosilnost, smo v diplomski nalogi izvedli obsežno parametrično analizo. Obravnavali smo primer upogibno obremenjenega I-prereza z eno vzdolžno ojačitvijo in z dvema vzdolžnima ojačitvama ter primer tlačno obremenjene pločevine z več ojačitvami. S spreminjanjem parametrov vitkosti stojine h_w/t_w , razmerja med dolžino in višino stojine α , razmerja med površinama prečnih prereзов ojačitve in stojine A_s/A_w ter lege ojačitve smo s programom EBPlate izvedli približno 600 izračunov za primer upogiba ter približno 200 izračunov za primer tlaka. Račun po standardu smo izvedli v veliko večjem obsegu (s pomočjo programa EXCEL), kjer smo spreminjali tudi parameter pasnice A_f/A_w , višino stojine h_w in kvaliteto materiala. Poleg kritičnih napetosti obeh načinov računa (EN in EBPlate) smo primerjali upogibne oziroma tlačne nosilnosti in redukcijske koeficiente,

ki smo jih v enem primeru izračunali tako, da smo kritične napetosti $\sigma_{cr,p}$ nadomestili s tistimi, ki smo jih izračunali s programom EBPlate.



Slika 1: Kritične napetosti izbočenja stojine, ojačane z eno vzdolžno ojačitvijo, pri čistem upogibu

2 STANDARD EN 1993-1-5: PLOČEVINASTI KONSTRUKCIJSKI ELEMENTI

V standardu EN 1993-1-5 (CEN, 2005) so podani predpisi za dimenzioniranje ojačanih in neojačanih pločevin, obremenjenih v svoji ravnini. Diplomaska naloga podrobneje predstavlja Poglavlje 4: Izbočenje pločevine zaradi normalnih napetosti in Dodatek A: Račun kritičnih napetosti za ojačane pločevine, povzeta po Komentarju k standardu EN 1993-1-5 (Johansson et al., 2005).

2.1 Izbočenje pločevine zaradi normalnih napetosti v mejnem stanju nosilnosti (EN1993-1-5, Poglavlje 4)

Splošna pravila za določanje odpornosti prerezov vseh razredov kompaktnosti so podana v standardu EN 1993-1-1.

Pri vitkem prerezu 4. razreda kompaktnosti, na katerega delujejo normalne napetosti, upoštevamo, da pride do elastične razporeditve napetosti po sodelujočem prerezu, t.j. reduciranem prerezu, ki po izbočenju pločevine še sodeluje pri prenosu normalnih napetosti. Mejna nosilnost prereza je dosežena, ko je v najbolj tlačnem vlaknu sodelujočega prereza dosežena napetost tečenja f_y . Velja:

$$R_{ult} = t b_{eff} f_y = A_{eff} f_y \quad (2.1)$$

Kjer je:

b_{eff} sodejuča širina;
 A_{eff} sodelujoč prerez;
 f_y napetost tečenja.

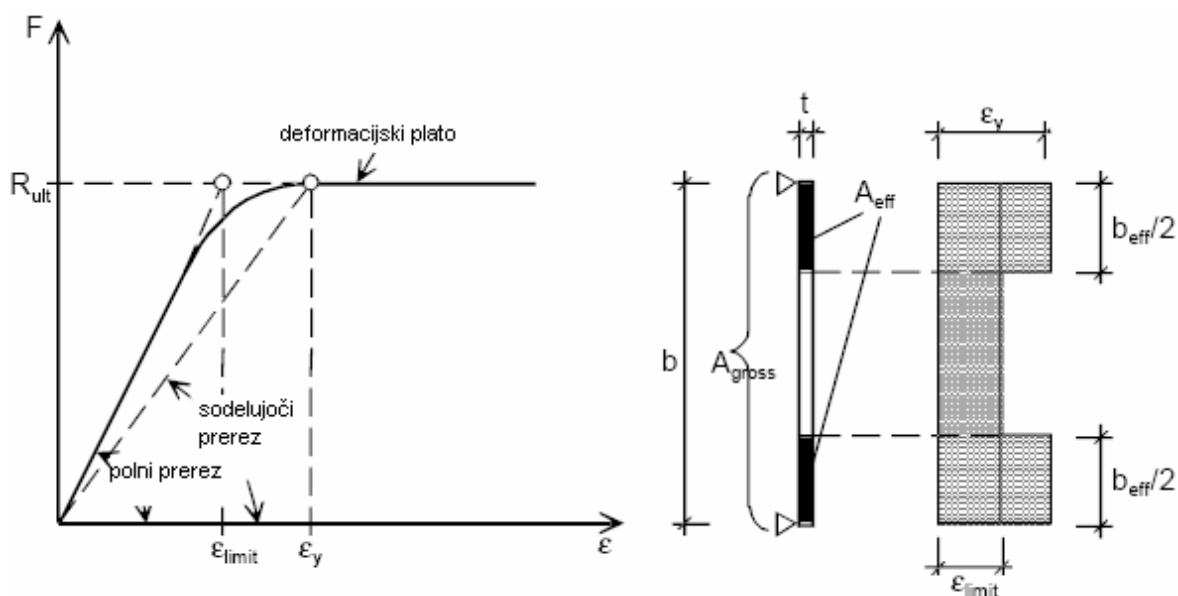
Prerez 4. razreda kompaktnosti pa lahko obravnavamo tudi kot ekvivalenten prerez 3. razreda kompaktnosti, če pri tem največjo projektno tlačno napetost reduciramo tako, da je nižja od meje plastičnosti. V tem primeru upoštevamo karakteristike polnega prereza, dokler deformacije ne dosežejo vrednosti ε_{lim} in napetosti vrednost σ_{lim} . Mejna nosilnost je v tem primeru:

$$R_{ult} = t b \sigma_{lim} = A_{polni} \sigma_{lim} \quad (2.2)$$

Iz zgornjih enačb velja enakost:

$$b \sigma_{lim} = b_{eff} f_y \quad (2.3)$$

Prednost računa z reducirano napetostjo σ_{lim} je, da računamo s polnimi karakteristikami prereza, vendar pa pri tem nosilnost pasnic ni v celoti izkoriščena. Na drugi strani pa je prednost računa s sodelujočim prerezom v tem, da lahko z večjimi deformacijami upoštevamo prerazporeditev obtežbe z enega na drug element, pri čemer je izkoriščena tudi nosilnost pasnic.

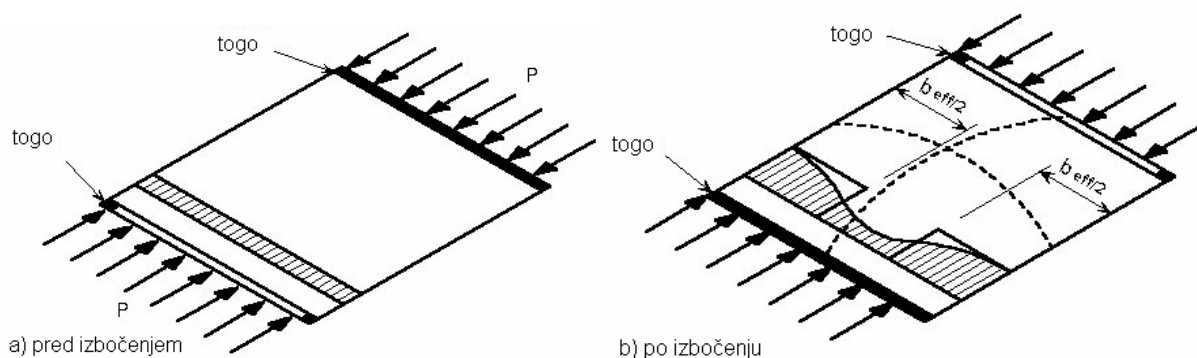


Slika 2: Izbočenje tlačne pločevine

Dva različna pristopa, ki obravnavata problem lokalnega izbočenja, sta metoda sodelujoče širine in metoda reduciranih napetosti. Ne glede na računski pristop, veljajo pravila v standardu EN 1993-1-5 le v primerih, ko so izpolnjeni naslednji kriteriji:

- Paneli so pravokotni, pasnici pa vzporedni ali skoraj vzporedni (vzdolžni rob je pod kotom, ki je manjši od 10°);
- Pri ojačanih pločevinah potekajo ojačitve v smeri vzdolžnih normalnih napetosti in/ali v prečni smeri;
- Odprtine in izrezi so majhni (premer d okroglih lukenj je omejen tako, da je $d \leq 0,05 b$, kjer je b širina pločevine);
- Elementi imajo enakomeren prerez;
- Preprečeno je izbočenje stojine zaradi vpliva tlačnih pasnic.

2.1.1 Metoda sodelujočega prereza



Slika 3: Tlačna pločevina pred in po izbočenju

V pristopu, ki temelji na konceptu sodelujočega prereza, se kontrole vzdolžno ojačanih pločevin izvedejo po naslednjih korakih:

- Določitev razporeditve napetosti, izračunanih ob predpostavki polno učinkovitega prereza;
- Iz dobljene razporeditve napetosti se določijo sodelujoče širine za vsako posamezno pločevino, ki sestavlja prerez;
- Določitev razporeditve napetosti, izračunanih ob upoštevanju karakteristik sodelujočega prereza, ki je sestavljen iz sodelujočih delov vseh pločevin, ki sestavljajo ta prerez;
- Popravek sodelujočega prereza vsake posamezne pločevine, ki se izračuna na osnovi razporeditve napetosti, dobljene v koraku c), ko se razporeda napetosti, dobljena v koraku a) in koraku c) bistveno razlikujeta;
- Zgornji postopek se ponavlja dokler razpored napetosti ni skladen z lastnostmi sodelujočega prereza.

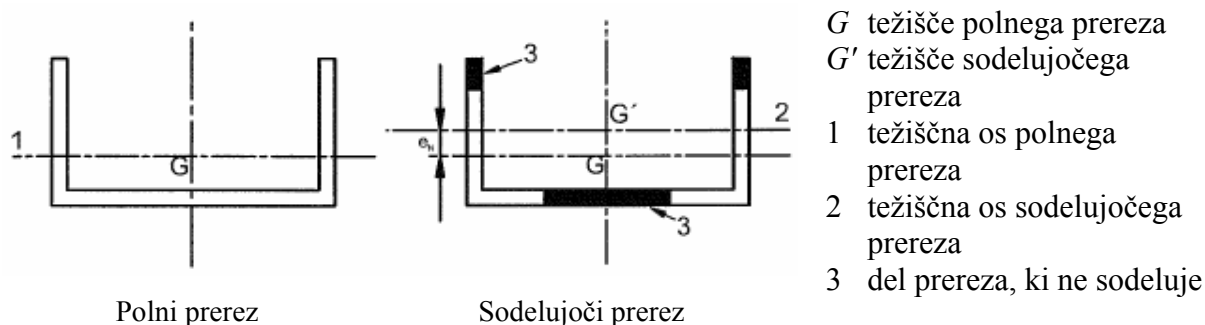
Učinek izbočenja se pri računu togosti in nosilnosti katerekoli (neojačane) pločevine, ki sestavlja panel in vzdolžne ojačitve, upošteva s sodelujočo širino. Koeficient izbočenja k_{σ} vzdolžno ojačane pločevine pa ni omejen z lokalnim izbočenjem pločevine podpanelov, temveč je potrebno obravnavati tako imenovano enakovredno ortotropno pločevino.

Pri dani obtežbi je postkritična rezerva nosilnosti močno odvisna od razmerja med dolžino in širino obravnavane pločevine ter od stopnje ortotropnosti, v primeru ko je pločevina vzdolžno ojačana. Redukcijski koeficienti se računajo tako, da sta upoštevana dva skrajna načina

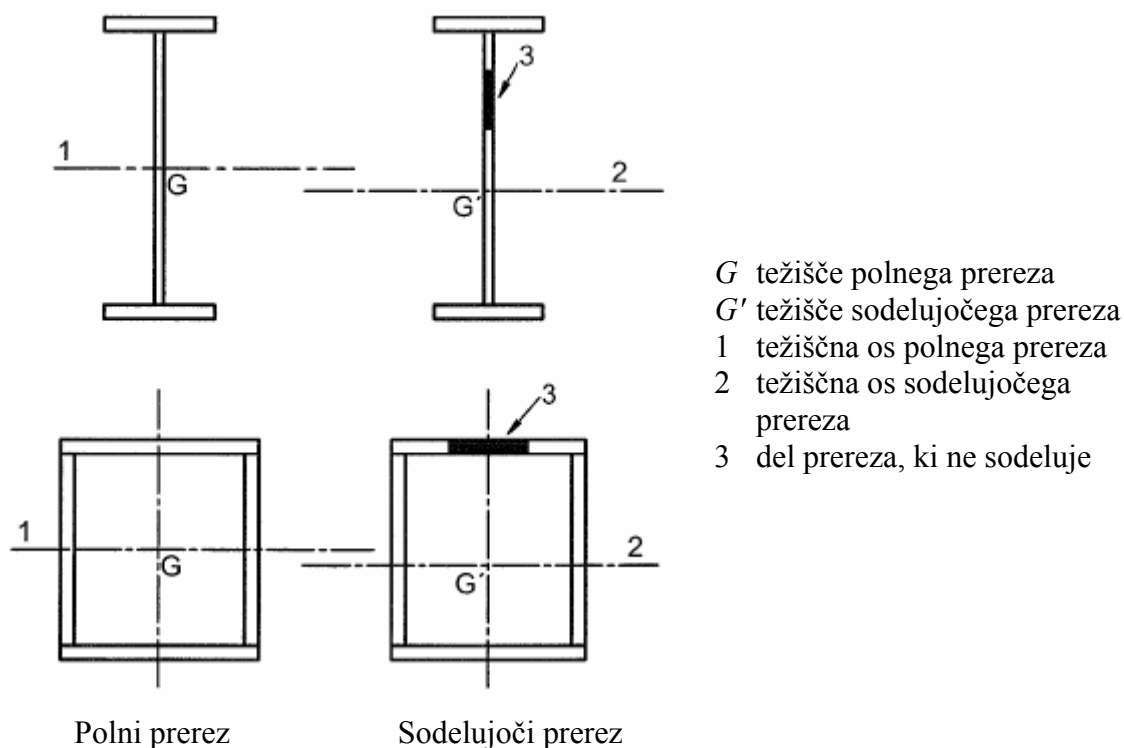
izbočenja – izbočenje ojačanega panela in izbočenje, ki je podobno uklonu tlačene palice – ter interpolacija med obema.

Določanje sodelujočega prereza (EN 1993-1-5, 4.3):

- Pri računu vzdolžnih napetosti moramo upoštevati kombinacijo vplivov strižne podajnosti in izbočenja pločevine.
- Sodelujoče karakteristike prerezov temeljijo na sodelujočih površinah elementov v tlaku in sodelujočih površinah elementov v nategu zaradi strižne podajnosti.
- Pri določanju sodelujoče površine A_{eff} privzamemo, da na prerez delujejo le napetosti zaradi enakomernega osnega tlaka. Pri nesimetričnih prerezih lahko pride do spremembe težišča sodelujočega prereza glede na težišče polnega prereza (e_N) (Slika 4), kar povzroči dodatni moment, ki ga moramo upoštevati pri kontroli nosilnosti prereza.
- Pri določanju efektivnega odpornostnega momenta W_{eff} privzamemo, da na prerez delujejo le upogibne napetosti (Slika 5). Pri dvoosnem upogibu določimo odpornostna momenta okoli obeh glavnih osi.
- Napetost v pasnici se izračuna z elastičnim odpornostnim momentom, ki se nanaša na srednjo ravnino pasnice.



Slika 4: Prerez 4. razreda kompaktnosti – osna sila



Slika 5: Prerez 4. razreda kompaktnosti – upogibni moment

2.1.2 Neojačane pločevine

Sodelujočo širino $b_{c,eff}$ tlačene cone neojačanih elementov določimo tako, da dejansko širino tlačene cone elementa b_c pomnožimo z redukcijskim koeficientom izbočenja pločevine ρ , ki je odvisen od razporeditve napetosti ψ po širini b elementa ter od podprtosti vzdolžnih robov. Sodelujoči prerez je: $A_{c,eff} = \rho \times A_c$. Koeficient ρ določimo po naslednjih izrazih:

- Za notranje tlačene elemente (podprta sta oba vzdolžna robova):

$$\rho = 1,0 \quad \text{za } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad (2.4)$$

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad \text{za } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad (2.5)$$

- Za zunanje tlačene elemente (podprt je en vzdolžni rob):

$$\rho = 1,0 \quad \text{za } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \quad (2.6)$$

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad \text{za } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad (2.7)$$

kjer je $\bar{\lambda}_p$ relativna vitkost pločevine, definirana kot kvadratni koren razmerja med porušno obtežbo in elastično kritično obtežbo tlačene cone pločevine:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{A_c f_y}{A_c \sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad (2.8)$$

Elastična kritična napetost izbočenja pločevine $\sigma_{cr,p}$ je podana kot:

$$\sigma_{cr,p} = k_\sigma \sigma_E = k_\sigma \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (2.9)$$

in z upoštevanjem elastičnega modula $E=210000 \text{ N/mm}^2$, Poissonovega količnika $\nu=0,3$ in materialnega koeficienta $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ dobimo:

$$\lambda_p = \frac{(\bar{b}/t)}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad (2.10)$$

kjer je:

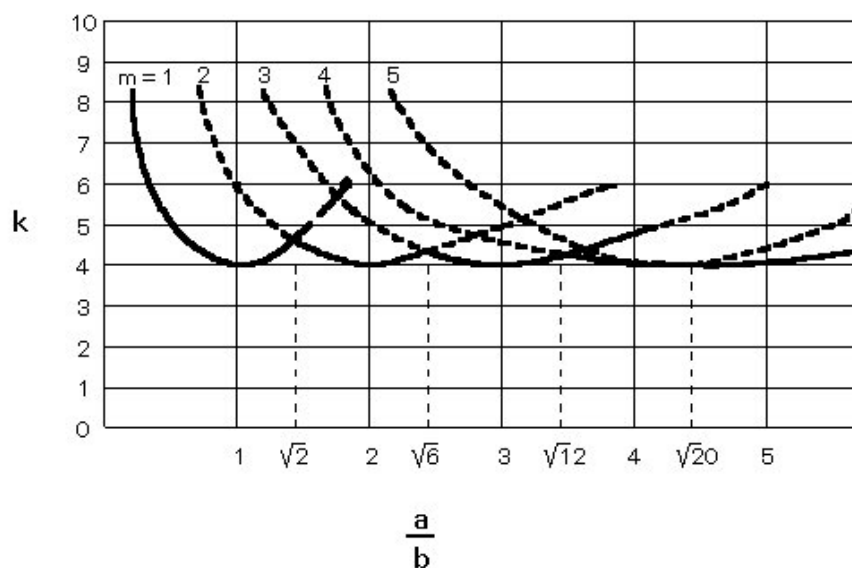
k_σ koeficient izbočenja, odvisen od razmerja robnih napetosti ψ in robnih pogojev.

Za prosto podprte neojačane pločevine pod vplivom enakomernega tlaka je koeficient izbočenja podan kot:

$$k_\sigma = \left(\frac{\alpha}{m} + \frac{m}{\alpha}\right)^2 \quad z \quad \alpha = \frac{a}{b} \quad (2.11)$$

kjer sta a in b dolžina (v smeri tlačnih napetosti) in širina obravnavane neojačane pločevine, m pa je število pol sinusnih valov izbočenja v smeri tlaka. k_σ se v odvisnosti od razmerja α najbolj spreminja v primeru, ko je $m=1$, kar ustreza razmerju $\alpha \leq \sqrt{2}$. Pri večjih vrednostih m so vrednosti k_σ le malo večje od 4, zato je vrednost 4 dober približek za območje $1 \leq \alpha \leq \sqrt{2}$ ter pri tako imenovanih dolgih pločevinah, kjer je $\alpha > \sqrt{2}$ (Slika).

Pri pločevinah z enim vzdolžnim robom vrtljivo podprtim, drugim robom pa prostim, vzamemo, da je $k_\sigma = 0,43$, ne glede na razmerje α .



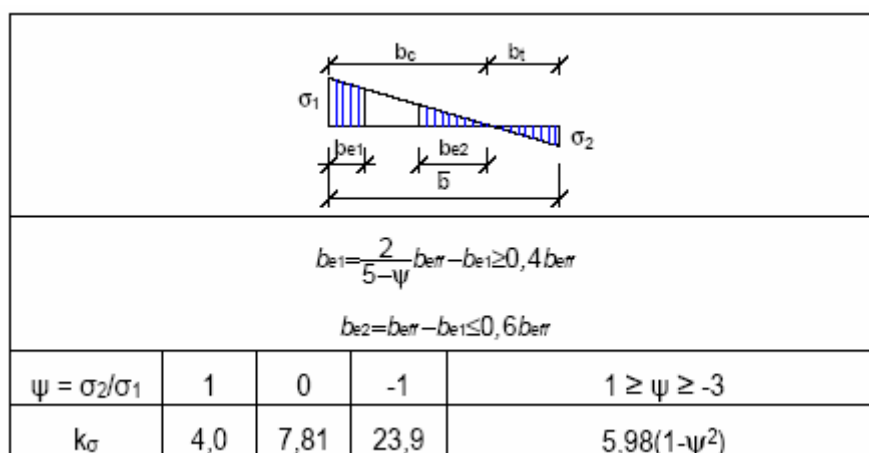
Slika 6: Koeficient izbočenja $k\sigma$

Za vrtljivo podprte neojačane tlačne pločevine pod vplivom linearno razporejenih napetosti je koeficient izbočenja podan preglednicah (Slika 7 in Slika 8).

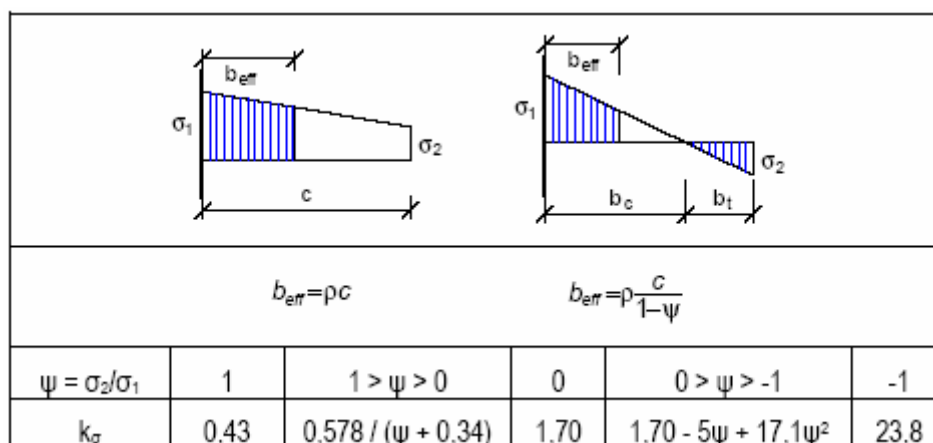
V izrazih za koeficient ρ (enačbi (2.5) in (2.7)) prvi člen (von Karmanov prispevek) opisuje obnašanje idealno elastične ravne pločevine z upoštevanjem postkritične rezerve nosilnosti, drugi člen pa je rezultat eksperimentalnih raziskav in zajema neugoden vpliv geometrijskih nepopolnosti pločevine, zaostalih napetosti ter interakcijo med plastičnim tečenjem materiala in izbočenjem pločevine.

Sodelujoče širine določimo s pomočjo spodnjih preglednic (Slika 7 in Slika 8).

Za pasnice določimo razmerje napetosti ψ s karakteristikami polnega prereza z upoštevanjem strižne podajnosti. Za stojine določimo razmerje napetosti s sodelujočim prerezom pasnice in polnim prerezom stojine.



Slika 7: Tlačeni elementi, podprti ob obeh vzdolžnih robovih (Tabela 4.1 v EN 1993-1-5)



Slika 8: Tlačeni elementi z enim prostim vzdolžnim robom (Tabela 4.2 v EN 1993-1-5)

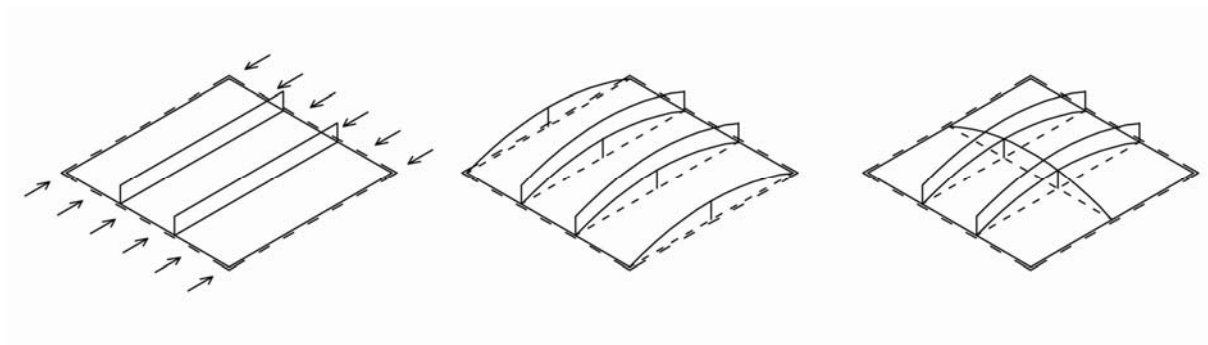
2.1.3 Vzdolžno ojačane pločevine

Pri pločevinah, ki so ojačane z vzdolžnimi ojačitvami, se upoštevajo sodelujoče površine zaradi lokalnega izbočenja posameznih podpanelov med ojačitvami in sodelujoče površine zaradi globalnega izbočenja ojačanega panela. Tako dobimo sodelujočo površino tlačene cone ojačane pločevine:

$$A_{c,eff} = \rho_c A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} t, \quad (2.12)$$

kjer je:

ρ_c redukcijski koeficient, ki upošteva interakcijo med izbočenjem panela in uklonom ojačitev (glej (2.36))



Uklon ojačitev

Izbočenje panela

Slika 9: Različna načina izbočenja

Sodelujoč prerez posameznega podpanela določimo z redukcijskim koeficientom ρ_{loc} , skladno z enačbo (2.5) za neojačane pločevine:

$$\rho_{loc} = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1, \quad (2.13)$$

kjer je $\bar{\lambda}_p$ spremenjena vitkost pločevine, ki upošteva možnost lokalnega izbočenja pločevine med ojačitvami in/ali pločevin, ki sestavljajo prerez vzdolžnih ojačitev. Pri računu porušne obtežbe upoštevamo, da je mejna napetost dosežena na reduciranem prerezu $A_{c,eff,loc}$ in vitkost $\bar{\lambda}_p$ je tako:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{A_{c,eff,loc} f_y}{A_c \sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,p}}}, \quad (2.14)$$

kjer je:

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c} \quad (2.15)$$

$$A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + \sum_c \rho_{loc} b_{c,loc} t \quad (2.16)$$

A_c je polni prerez tlačene cone ojačane pločevine brez delov podpanelov, ki so podprti z nasproti ležečimi pločevinami (n.pr. pasnicami) (Slika 10). V primeru vpliva strižne podajnosti se prerez A_c reducira s faktorjem strižne podajnosti.

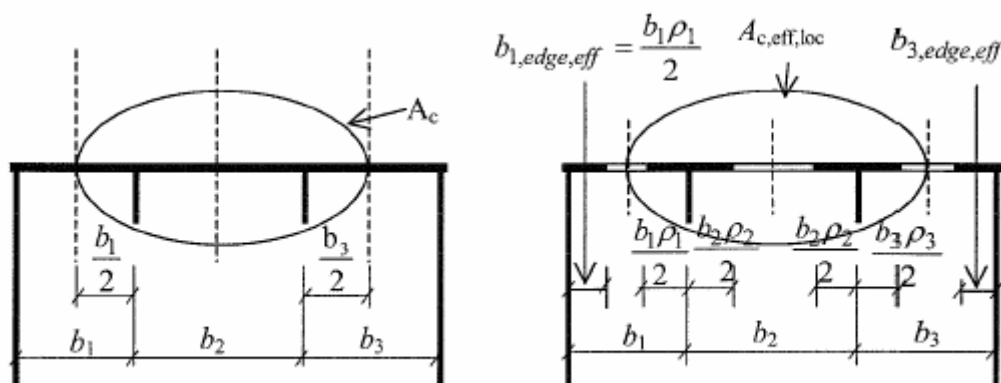
$A_{c,eff,loc}$ je sodelujoči prerez enakega dela ojačane pločevine (ojačitve z ustreznimi pripadajočimi širinami pločevine), ki primerno upošteva možnost izbočenja podpanelov.

$A_{sl,eff}$ je vsota sodelujočih prerezov vseh vzdolžnih ojačitev s polnim prereзом A_{sl} , ki so v tlačeni coni.

\sum_c se nanaša na del ojačanega panela, ki je v tlaku, brez širin $b_{edge,eff}$ (Slika 10).

$b_{c,loc}$ je širina tlačnega dela posameznega podpanela.

$\sigma_{cr,p}$ je kritična napetost izbočenja panela, ki jo izračunamo po navodilih v Dodatku A standarda EN 1993-1-5 (glej 2.1.3.1).



Slika 10: Ojačana pločevina v tlaku

Če je $\rho_c \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$ večje od povprečne napetosti v ojačitvi $\sigma_{com,Ed}$, ostane sodelujoča površina

$A_{c,eff,loc}$ nespremenjena. V nasprotnem primeru jo spremenimo z naslednjim izrazom:

$$A_{c,eff,loc} = \frac{\rho_c f_y A_{sl,1}}{\sigma_{com,Ed} \gamma_{M1}} \quad (2.17)$$

2.1.3.1 Izbočenje panela

Elastična kritična napetost izbočenja pločevine, ojačane z vzdolžnimi ojačitvami, se po standardu določi s poenostavljenim računskim pristopom. Glede na število ojačitev v tlačeni coni pločevine sta možna dva različna pristopa:

- Več vzdolžnih ojačitev: Če so v tlačeni coni vsaj 3 vzdolžne ojačitve smemo ojačano pločevino obravnavati kot ortotropno pločevino, t.j. pločevino, ki nima več diskretnih ojačitev, temveč so ojačitve »razmazane« po pločevini. To pomeni, da je skupna togost vseh ojačitev enakomerno porazdeljena po širini pločevine. S tem dejansko pločevino spremenimo v namišljeno, kjer podpaneli nimajo več pomena. Izbočenje ojačane pločevine se tako prevede

na globalno izbočenje ekvivalentne ortotropne pločevine. Skladno s tem se izračuna elastična kritična napetost pločevine $\sigma_{cr,p}$. (Glej 2.1.3.1.1)

- Ena ali dve ojačitvi: Če je pločevina vzdolžno ojačana z eno ali dvema ojačitvama, se elastična kritična napetost pločevine $\sigma_{cr,p}$ izračuna iz elastične kritične uklonske napetosti $\sigma_{cr,sl}$ ojačitve, ki je najbližje robu z največjo tlačno napetostjo (Glej 2.1.3.1.2). V računskem modelu je ta ojačitev osno obremenjena in podprta z elastično podlago, ki predstavlja stabilizacijske učinke, ki jih ob uklonu ojačitev povzroči upogib pločevine v smeri pravokotno na ojačitve.

2.1.3.1.1 Račun kritičnih napetosti ojačane pločevine – primer več vzdolžnih ojačitev (EN 1993-1-5, Dodatek A.1)

Elastična kritična napetost izbočenja ekvivalentne ortotropne pločevine:

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma} \sigma_E = k_{\sigma} \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (2.18)$$

Koeficient izbočenja k_{σ} je tu odvisen od številnih parametrov (ne le od razmerja α in podprtosti), kot so relativne raztezne, upogibne in torzijske karakteristike prerezov ojačitev ter lege ojačitev. Konzervativno se upošteva, da so robovi pločevine prosto podprti, saj je le pri takem podpiranju velikost postkritične nosilnosti skladna s tisto, ki jo pravila za dimenzioniranje implicitno izkoriščajo.

k_{σ} lahko izračunamo na več načinov:

- s pomočjo tabel (Klöppel, 1968);
- s pomočjo poenostavljenih izrazov;
- z uporabo primerne programske opreme ali primernih numeričnih metod.

Za ojačane pločevine pravokotne oblike, kjer sta dolžina a in širina b taki, da velja $\alpha = a/b \geq 0,5$, in kjer so vsaj tri enakomerno razporejene vzdolžne ojačitve, lahko koeficient izbočenja pločevine k_{σ} približno določimo z naslednjimi izrazi, ki so izpeljani iz teorije ortotropnih pločevin:

$$k_{\sigma,p} = \frac{2\left((1+\alpha^2)^2 + \gamma - 1\right)}{\alpha^2(\psi+1)(1+\delta)} \quad \text{če} \quad \alpha \leq \sqrt[4]{\gamma}$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{4(1+\sqrt{\gamma})}{(\psi+1)(1+\delta)} \quad \text{če} \quad \alpha > \sqrt[4]{\gamma}$$
(2.19)

Pri tem je:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \geq 0,5 \quad \text{razmerje robnih napetosti na širini } b;$$

$$\gamma = \frac{\Sigma I_{sl}}{I_p} \quad \text{relativna upogibna togost ojačitev};$$

$$\delta = \frac{\Sigma A_{sl}}{A_p} \quad \text{relativna osna togost ojačitev};$$

σ_1 večja robna napetost;

σ_2 manjša robna napetost;

ΣI_{sl} vsota vztrajnostnih momentov celotne ojačane pločevine;

I_{sl} vztrajnostni moment pločevine (brez ojačitev) pri upogibu izven ravnine;

$$I_{sl} = \frac{bt^3}{12(1-\nu^2)}$$

ΣA_{sl} vsota polnih površin prerezov posameznih vzdolžnih ojačitev (brez pripadajočih delov pločevine);

A_p poln prerez pločevine (=bt);

2.1.3.1.2 Račun kritičnih napetosti ojačane pločevine – primer ene ali dveh vzdolžnih ojačitev (EN 1993-1-5, Dodatek A.2)

Elastično kritično napetost izbočenja pločevine $\sigma_{cr,p}$ lahko izračunamo na osnovi uklonske kritične napetosti ojačitve s pripadajočim delom pločevine na elastični podlagi.

Če je v tlačeni coni ena ojačitev (ojačitev v natezni coni ne upoštevamo), je:

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{1,05E}{A_{sl,1}} \frac{\sqrt{I_{sl,1} t^3 b}}{b_1 b_2} \quad \text{če} \quad a \geq a_c$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 E I_{sl,1}}{A_{sl,1} a^2} + \frac{E t^3 b a^2}{4 \pi^2 (1-\nu^2) A_{sl,1} b_1^2 b_2^2} \quad \text{če} \quad a < a_c$$
(2.20)

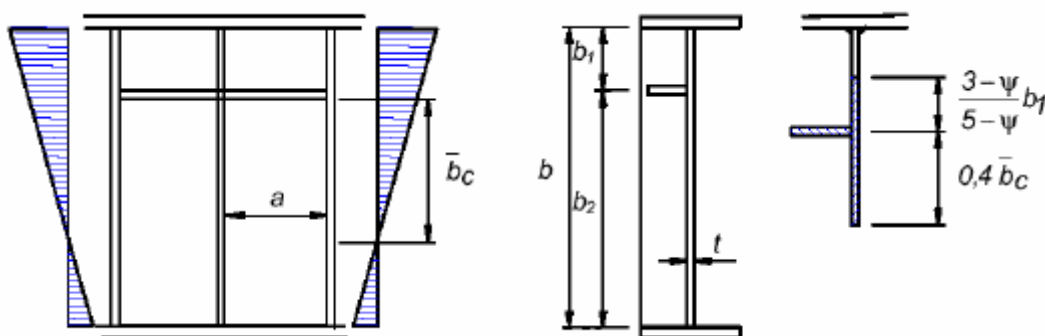
$$z \quad a_c = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,1} b_1^2 b_2^2}{t^3 b}} \quad (2.21)$$

kjer je:

$A_{sl,1}$ je poln prerez dela ojačane pločevine, ki je sestavljen iz:

- površine polnega prereza ojačitve
- površine prereza pripadajočih delov pločevine, ki jih določimo s pomočjo Tabele 1.

Če je celoten podpanel tlačni, se vzame del $(3-\psi)/(5-\psi)$ širine b_l , če pa napetosti v podpanelu spremenijo znak, je pripadajoči del $0,4 \bar{b}_c$ tlačene cone podpanela (Slika 11).



Slika 11: Računski model v primeru ene vzdolžne ojačitve v tlačni coni

Izraz za a_c je izpeljan iz ravnotežne enačbe za členkasto podprto ojačitev s pripadajočim delom pločevine, ki ima dolžino a , upogibno togost $E_{sl,1}$ in površino prereza $A_{sl,1}$ ter leži na elastični podlagi s togostjo k_f , obremenjena pa je z osno silo N (Slika 12). Diferencialna enačba ravnotežja je:

$$EI_{sl,1} \frac{d^4 v}{dx^4} + N \frac{d^2 v}{dx^2} + k_f v = 0 \quad (2.22)$$

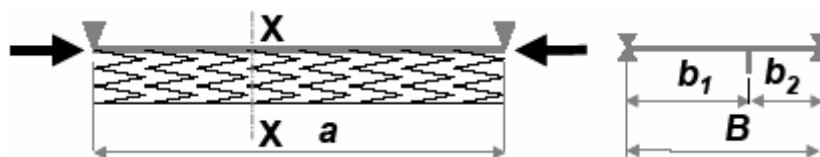
kjer je N tlačna osna sila, v pa pomik pri izbočenju. Če vzamemo, da je pomik v sestavljen iz m pol sinusnih valov dolžine a/m , kjer je m celo število, velja:

$$v = A \sin(m\pi x / a)$$

in z upoštevanjem robnih pogojev dobimo:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{st}}{a^2} \left(m^2 + \frac{k_f a^4}{m^2 \pi^4 EI_{st}} \right) \quad (2.23)$$

Ta enačba podaja kritično silo kot funkcijo števila m , ki je odvisna od karakteristik ojačitve in elastične podlage.



Slika 12: Tlačen element ojačitve s pločevino podprt z elastično podlago

Togost elastične podlage k_f določimo z upoštevanjem prečnega pomika pasu pločevine debeline t in enotske širine ter razpona (b_1+b_2) pri obremenitvi z enotsko točkovno obtežbo, ki predstavlja reakcijo ojačitve na pločevino. Dobimo:

$$k_f = \left[\frac{b_1^2 b_2^2}{3(b_1 + b_2)EI_{ploč.}} \right]^{-1} = \frac{(b_1 + b_2)Et^3}{3,64 b_1^2 b_2^2} \quad (2.24)$$

Ko podlage ni, ali ko je njena togost k_f majhna, moramo za m vzeti vrednost 1. To pomeni, da je elastična podlaga dovolj prožna, da omogoči izbočenje brez vmesne infleksijske točke.

Kritična sila je enaka:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{st}}{a^2} + \frac{Et^3 (b_1 + b_2) a^2}{35,92 b_1^2 b_2^2} \quad (2.25)$$

S postopnim večanjem k_f pridemo do stanja, kjer je sila N manjša pri $m=2$ kot pri $m=1$. To pomeni, da ima uklonska oblika ojačitve infleksijsko točko na sredini. Z dodatnim povečevanjem k_f dobimo še več pol valov ($m=3,4\dots$) in $(m-1)$ vmesnih infleksijskih točk. Pri danem k_f tako obstaja dolžina \bar{a} , pri kateri je za vse vrednosti m , ki so večje od 1, sila N minimalna. Izpeljemo jo iz pogoja $\frac{\partial N}{\partial m} = 0$. Dobimo:

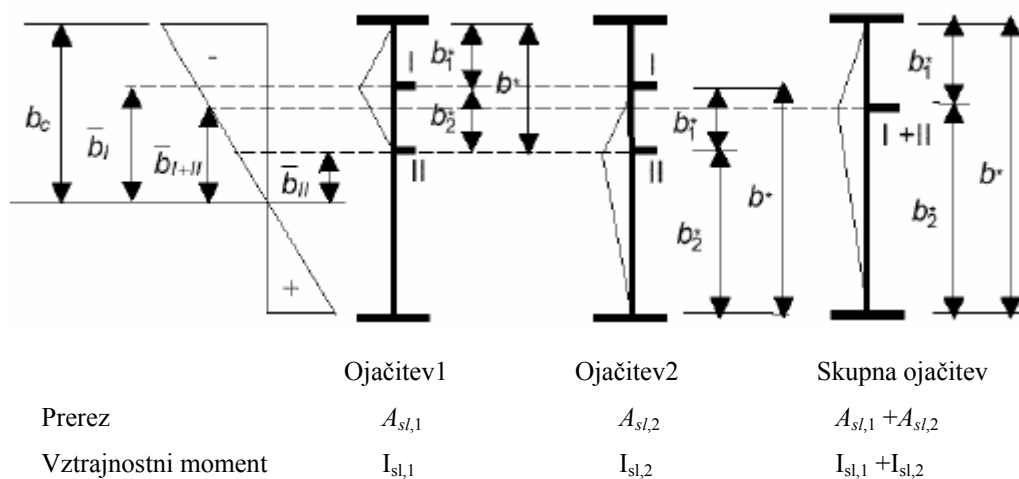
$$\bar{a} = m\pi^4 \sqrt{\frac{EI_{st,1}}{k_f}} \quad (2.26)$$

Če v enačbi za kritično silo N_{cr} a nadomestimo z zgornjim izrazom, dobimo:

$$N_{cr,\min} = 2\sqrt{k_f EI_{st,1}} = \frac{1,05 E}{b_1 b_2} \sqrt{I_{st,1} t^3 (b_1 + b_2)} \quad (2.27)$$

Ta minimalna vrednost je konstanta, ki je neodvisna od m . Vzamemo jo za kritično obtežbo, ko je $m>1$, t.j. ko je $a > a_c$, kjer je a_c vrednost \bar{a} za $m=1$ (glej (2.21)).

V primeru dveh vzdolžnih ojačitev v tlačeni coni je postopek računa enak kot pri eni ojačitvi. Pri tem vsako ojačitev obravnavamo ločeno in predpostavimo izbočenje ene ojačitve, pri čemer se druga obnaša kot toga podpora. Postopek računa za eno ojačitev tako ponovimo dvakrat, z ustreznimi karakteristikami prerezov in razdaljami b_I in b_{II} (Slika 13). Kot rezultat dobimo dve vrednosti elastičnih kritičnih napetosti izbočenja, $\sigma_{cr,sl,I}$ in $\sigma_{cr,sl,II}$.



Slika 13: Računski model z dvema ojačitvama v tlačeni coni

Izbočenje obeh ojačitev hkrati upoštevamo z eno namišljeno skupno ojačitvijo, ki nadomešča obe posamezni ojačitvi, tako da velja:

- karakteristike prereza skupne ojačitve (površina prereza in vztrajnostni moment) so vsota karakteristik posameznih ojačitev;
- lega skupne ojačitve je v točki delovanja rezultante notranjih sil v posameznih ojačitvah.

S tem dobimo tretjo vrednost elastične kritične napetosti izbočenja, $\sigma_{cr,sl,I+II}$.

Kritična napetost $\sigma_{cr,sl}$ je napetost na mestu ojačitve, zato jo je pri določitvi napetosti $\sigma_{cr,p}$, ki se nanaša na najbolj tlačeno vlakno prereza, potrebno ekstrapolirati na rob, kjer so tlačne napetosti največje:

$$\sigma_{cr,p} = \sigma_{cr,sl} \frac{b_c}{b} \quad (2.28)$$

kjer je b_c širina tlačene cone in b oddaljenost ojačitve od vlakna, kjer so tlačne napetosti enake 0 (nevtralna os pri čistem upogibu).

V primeru dveh vzdolžnih ojačitev po enačbi (2.28) izračunamo tri vrednosti $\sigma_{cr,p,i}$ ($i = I, II, I+II$) z naslednjimi vrednostmi: $\sigma_{cr,sl,I}$ in $\bar{b} = \bar{b}_I$; $\sigma_{cr,sl,II}$ in $\bar{b} = \bar{b}_{II}$; $\sigma_{cr,sl,I+II}$ in $\bar{b} = \bar{b}_{I+II}$ (Slika

13). Končna vrednost elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$ je najnižja izmed treh vrednosti.

2.1.3.2 Izbočenje pločevine, podobno uklonu tlačene palice

V primeru majhnega razmerja med dolžino in širino pločevine a/b (<1 pri neojačanih pločevinah) in/ali pri veliki ortotropnosti vzdolžno ojačane pločevine lahko pride do nestabilnosti pri kateri ni postkritične rezerve nosilnosti. Za upoštevanje uklona zato potrebujemo redukcijski koeficient uklona χ_c , ki je strožji od koeficienta ρ .

Računski model za račun elastičnih kritičnih napetosti uklona dobimo tako, da odstranimo vzdolžne podpore pločevine. Kritično napetost $\sigma_{cr,c}$ izračunamo po naslednjih izrazih:

- za neojačano pločevino:

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 E t^2}{12(1-\nu^2)a^2} \quad (2.29)$$

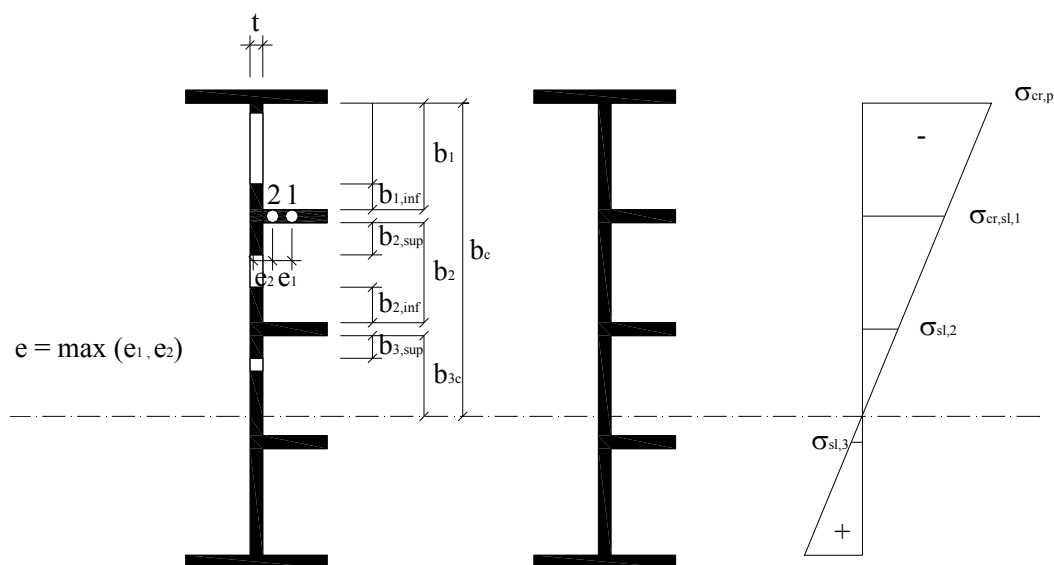
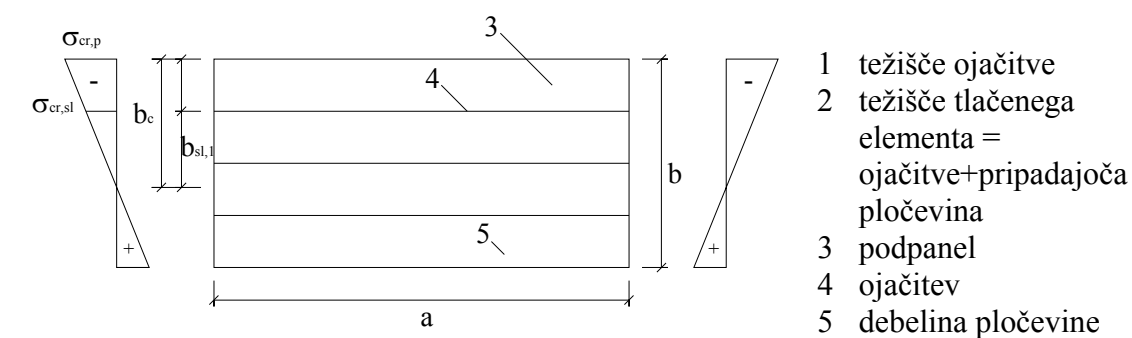
- za ojačano pločevino:

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 E I_{sl,1}}{A_{sl,1} a^2} \quad (2.30)$$

kjer je:

$I_{sl,1}$ vztrajnostni moment polnega prereza ojačitve in pripadajočih delov pločevine glede na upogib izven ravnine;

$A_{sl,1}$ poln prerez ojačitve in pripadajočih delov pločevine, ki jih določimo po Slika 14.



	širine za poln prerez	širine za sodelujoč prerez	Pogoj za ψ_i
$b_{1,inf}$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_1$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_{1,eff}$	$\psi_1 = \frac{\sigma_{cr,sl,1}}{\sigma_{cr,p}} > 0$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$	$\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,sl,1}} > 0$
$b_{2,inf}$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$	$\psi_2 > 0$
$b_{3,sup}$	$0,4 b_{3c}$	$0,4 b_{3c,eff}$	$\psi_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$

Slika 14: Določitev pripadajočih delov pločevine

Kritično napetost $\sigma_{cr,c}$, ki se nanaša na rob, kjer so tlačne napetosti največje, dobimo z ekstrapolacijo napetosti $\sigma_{cr,sl}$ na ta rob:

$$\sigma_{cr,c} = \sigma_{cr,sl} \frac{b_c}{\bar{b}} \quad (2.31)$$

kjer sta b_c in \bar{b} ustrezni širini glede na razporeditev napetosti (Slika 14).

Relativna vitkost tlačene palice je definirana kot kvadratni koren razmerja med porušno obtežbo in elastično kritično obtežbo pri uklonu:

- v primeru neojačane pločevine upoštevamo pas pločevine z enotsko širino:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad (2.32)$$

- v primeru ojačane pločevine upoštevamo ojačitev s pripadajočimi deli pločevine

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{A_{sl,1,eff} f_y}{A_{sl,1} \sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad (2.33)$$

Kjer je:

$$\beta_{A,c} = \frac{A_{sl,1,eff}}{A_{sl,1}} \quad (2.34)$$

Površina prereza $A_{sl,1,eff}$ je reduciran prerez zgoraj definiranega dela ojačane pločevine $A_{sl,1}$ zaradi upoštevanja lokalnega izbočenja pločevine in/ali elementov ojačitve (Slika 14).

Izraz za redukcijski koeficient χ_c je enak kot pri običajnem uklonu tlačnih palic:

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} \quad (2.35)$$

kjer je:

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha_e (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2 \right] \quad (2.36)$$

α_e je modificiran koeficient nepopolnosti:

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} \quad (2.37)$$

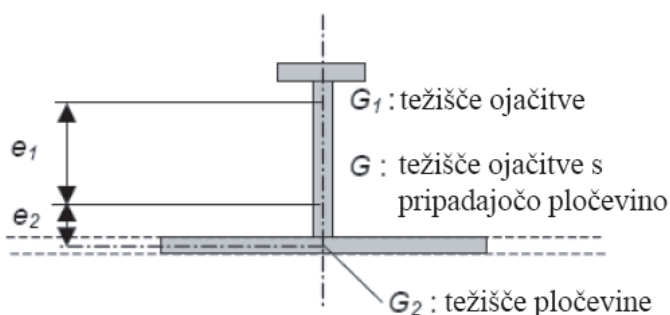
kjer je:

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl,1}}{A_{sl,1}}} \quad (2.38)$$

$e = \max(e_1, e_2)$ največja razdalja od težišča pločevine in enostranske ojačitve do nevtralne osi ojačitve s pripadajočo pločevino (Slika 15)

$\alpha = 0,34$ za ojačitve zaprtega prereza (uklonska krivulja b)

= 0,49 za ojačitve odprtega prereza (uklonska krivulja c)



Slika 15: Ekscentričnost ojačitve

2.1.3.3 Interakcija med izbočenjem panela in uklonom ojačitev

Ojačana pločevina se v večini primerov dejansko izboči na način, ki je nekje vmes med obema skrajnima primeroma izbočenja. Pri določanju mejne nosilnosti zato upoštevamo interakcijo med izbočenjem panela in uklonom ojačitev, in sicer z redukcijskim koeficientom ρ_c ($\chi_c \leq \rho_c \leq \rho$), ki ga določimo z enostavno interakcijsko enačbo (Slika 16):

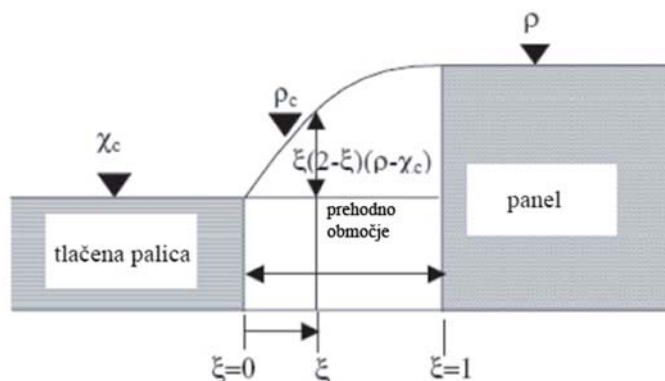
$$\rho_c = \xi(2 - \xi)(\rho - \chi_c) + \chi_c \quad (2.39)$$

kjer je:

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 \quad \text{toda } 0 \leq \xi \leq 1 \quad (2.40)$$

Omejitev parametra ξ lahko fizikalno utemeljimo na sledeč način:

- Izbočenje panela ne more biti bolj neugodno kot uklon tlačene palice, zato je $\sigma_{cr,p} \geq \sigma_{cr,c}$ in s tem vrednost ξ vedno pozitivna.
- Uklon je nepomemben, ko je $\sigma_{cr,p}$ znatno večja od $\sigma_{cr,c}$, n.pr. $\sigma_{cr,p} \geq 2\sigma_{cr,c}$. Takrat naj bi bil koeficient $\rho_c = \rho$, zato je $\xi \leq 1$.



Slika 16: Interakcija med izbočenjem panela in uklonom ojačitev

2.1.4 Kontrola nosilnosti prereza

Maksimalne tlačne projektne napetosti σ_{xEd} ne smejo biti večje od napetosti tečenja:

$$\eta = \frac{\sigma_{xEd}}{f_y / \gamma_{M0}} \leq 1,0, \quad (2.41)$$

kjer je:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} e_N}{W_{eff}} \quad (2.42)$$

in: A_{eff} sodelujoči prerez;

W_{eff} sodelujoči odpornostni moment;

e_N sprememba lege težiščne osi;

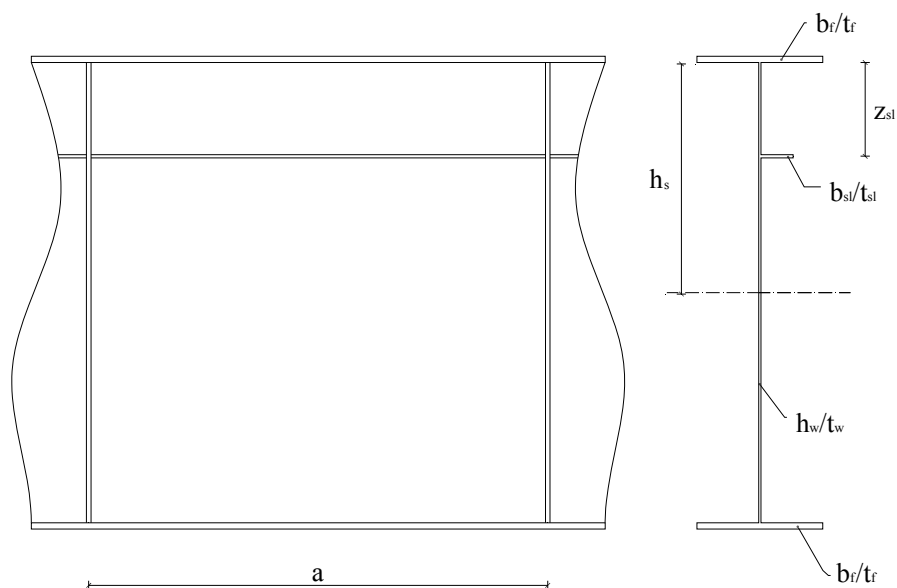
N_{Ed} projektna osna sila;

M_{Ed} projektni upogibni moment;

γ_{M0} parcialni varnostni faktor (glej dele EN 1993-2 do 6)

3 RAČUNSKI PRIMER

3.1 Polnostenski nosilec z eno vzdolžno ojačitvijo – čisti upogib



Slika 17: Vzdolžni in prečni prerez

$$S355 \Rightarrow f_y = 355 \text{ Mpa}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y [\text{N/mm}^2]}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

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

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

$$b_f/t_f = 548/27 \text{ mm}$$

$$h_w/t_w = 2000/10 \text{ mm}$$

$$b_{sl}/t_{sl} = 140/14 \text{ mm}$$

$$h_s = 1000 \text{ mm}$$

$$z_{sl} = 400 \text{ mm}$$

$$a = 2000 \text{ mm}$$

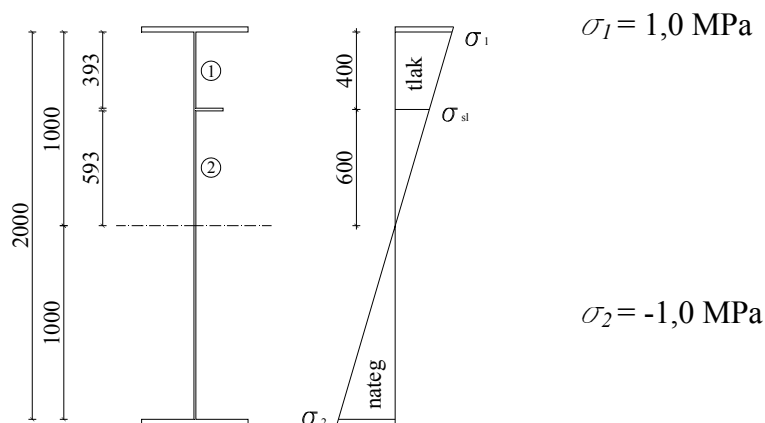
$$b_f/t_f = 20$$

$$h_w/t_w = 200$$

$$b_{sl}/t_{sl} = 12\varepsilon$$

$$a/h_w = 1$$

$$z_{sl} = 0,2 h_w$$



Slika 18: Prečni prerez in razporeditev normalnih napetosti

3.2 Lokalno izbočenje posameznih panelov

3.2.1 Panel 1

$$\bar{b}_1 = z_{sl} - \frac{t_{sl}}{2} = 0,400 - \frac{0,014}{2} = 0,393 \text{ m}$$

$$\psi_1 = \frac{h_s - z_{sl}}{h_s} = \frac{1,000 - 0,400}{1000} = 0,6$$

$$k_{\sigma 1} = \frac{8,2}{(1,05 + \psi)} = \frac{8,2}{(1,05 + 0,6)} = 4,97$$

$$\bar{\lambda}_{p1} = \frac{b_1 / t_w}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma 1}}} = \frac{0,393 / 0,010}{28,4 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{4,97}} = 0,76 > 0,673$$

$$\rho_1 = \frac{\bar{\lambda}_{p1} - 0,055(3 + \psi_1)}{\bar{\lambda}_{p1}^2} = \frac{0,76 - 0,055(3 + 0,6)}{0,76^2} = 0,97$$

Polne širine:

$$b_{1,rob} = \frac{2}{5 - \psi_1} \cdot \bar{b}_1 = \frac{2}{5 - 0,6} \cdot 0,393 = 0,179 \text{ m}$$

$$b_{1,inf} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot \bar{b}_1 = \frac{3 - 0,6}{5 - 0,6} \cdot 0,393 = 0,214 \text{ m}$$

Sodelujoče širine:

$$b_{1,eff} = \rho_1 \cdot \bar{b}_1 = 0,97 \cdot 0,393 = 0,381 m$$

$$b_{1,rob,eff} = \frac{2}{5 - \psi_1} \cdot b_{1,eff} = \frac{2}{5 - 0,6} \cdot 0,381 = 0,173 m$$

$$b_{1,inf,eff} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot b_{1,eff} = \frac{3 - 0,6}{5 - 0,6} \cdot 0,381 = 0,208 m$$

3.2.2 Panel 2

$$\bar{b}_2 = h_w - z_{sl} - \frac{t_{sl}}{2} = 2,000 - 0,400 - \frac{0,014}{2} = 1,593 m$$

$$\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{sl}} = \frac{-1,0}{0,6} = -1,67$$

$$k_{\sigma_2} = 5,98 \cdot (1 - \psi_2^2) = 5,98 \cdot (1 - (-1,67)^2) = 42,63$$

$$\bar{\lambda}_{p2} = \frac{b_1 / t_w}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma_1}}} = \frac{1,593 / 0,010}{28,4 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{42,63}} = 1,06 > 0,673$$

$$\rho_2 = \frac{\bar{\lambda}_{p2} - 0,055(3 + \psi_2)}{\bar{\lambda}_{p2}^2} = \frac{1,06 - 0,055(3 - 1,67)}{1,06^2} = 0,878$$

Polne širine:

$$b_{2,sup} = 0,4 \cdot \bar{b}_{2c} = 0,4 \cdot 0,593 = 0,237 m$$

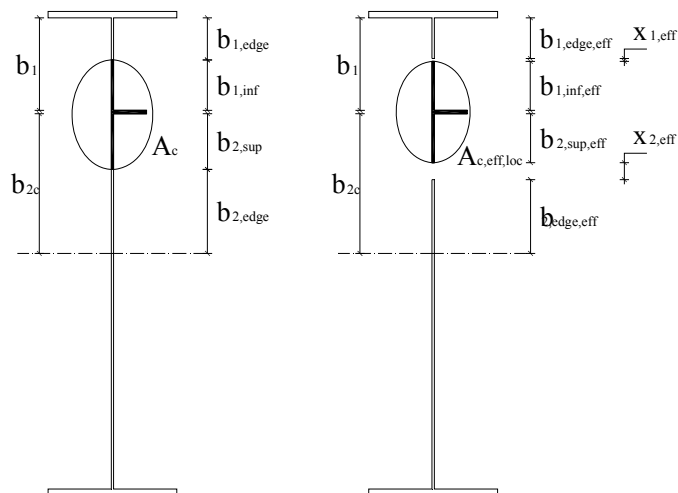
$$b_{2,rob} = 0,6 \cdot \bar{b}_{2c} = 0,6 \cdot 0,593 = 0,356 m$$

Sodelujoče širine:

$$b_{2,eff} = \rho_2 \cdot \bar{b}_{2c} = 0,878 \cdot 0,593 = 0,521 m$$

$$b_{2,sup,eff} = 0,4 \cdot b_{2,eff} = 0,4 \cdot 0,521 = 0,208 m$$

$$b_{1,inf,eff} = \frac{3 - \psi_1}{5 - \psi_1} \cdot b_{1,eff} = 0,6 \cdot 0,521 = 0,313 m$$



Slika 19: Polni in sodelujoči prerez

3.3 Elastična kritična napetost izbočenja pločevine $\sigma_{cr,p}$

$$A_{sl} = (b_{1,inf} + b_{2,sup} + t_{sl}) \cdot t_w + b_{sl} \cdot t_{sl}$$

$$A_{sl} = (0,214 + 0,237 + 0,014) \cdot 0,010 + 0,140 \cdot 0,014 = 6,610 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$x_{sl} = \frac{b_{sl} t_{sl} \left(\frac{t_w}{2} + \frac{b_{sl}}{2} \right)}{A_{sl}}$$

$$x_{sl} = \frac{0,140 \cdot 0,014 \cdot \left(\frac{0,010}{2} + \frac{0,010}{2} \right)}{6,610 \cdot 10^{-3}} = 0,022 \text{ m}$$

$$I_{sl} = \frac{(b_{1,inf} + b_{2,sup} + t_{sl}) t_w^3}{12} + \frac{b_{sl}^3 t_{sl}}{12} + (b_{1,inf} + b_{2,sup} + t_{sl}) t_w x_{sl}^2 + b_{sl} t_{sl} \left(\frac{t_w + b_{sl}}{2} - x_{sl} \right)^2$$

$$I_{sl} = \frac{(0,214 + 0,237 + 0,014) \cdot 0,010^3}{12} + \frac{0,140^3 \cdot 0,014}{12} +$$

$$+ (0,214 + 0,237 + 0,014) 0,010 \cdot 0,022^2 +$$

$$+ 0,140 \cdot 0,014 \left(\frac{0,010 + 0,140}{2} - 0,022 \right)^2 = 10,996 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$a_c = 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{I_{sl} \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{(b_1 + b_2) \cdot t_w^3}} = 4,33 \cdot \sqrt[4]{\frac{10,996 \cdot 10^{-6} \cdot 0,407^2 \cdot 1,593^2}{2,000 \cdot 0,010^3}} = 5,339 \text{ m} > a = 2 \text{ m}$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 EI_{sl}}{A_{sl} a^2} + \frac{Et_w^3 (b_1 + b_2) a^2}{4\pi^2 (1 - \nu^2) A_{sl} b_1^2 b_2^2}$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 10,996 \cdot 10^{-6}}{6,610 \cdot 10^{-3} \cdot 2,000^2} + \frac{210 \cdot 10^9 \cdot 0,010^3 \cdot 2,000 \cdot 2,000^2}{4\pi^2 (1 - 0,3^2) \cdot 6,610 \cdot 10^{-3} \cdot 0,407^2 \cdot 1,593^2}$$

$$\sigma_{cr,sl} = 878 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_{cr,p} = \frac{h_s}{h_s - z_{sl}} \sigma_{cr,sl} = \frac{1,000}{1,000 - 0,400} \cdot 878 \cdot 10^6 = 1463 \text{ N/m}^2$$

A_c je polni prerez tlačene cone ojačane pločevine brez delov podpanelov, ki jih podpirajo sosednje pločevine (Slika 19);

Σ_c se nanaša na del ojačane pločevine, ki je v tlaku, brez delov $b_{rob,eff}$, glej (Slika 19);

$A_{c,eff,loc}$ so površine sodelujočih prerezov vseh ojačitev in podpanelov, ki so v celoti ali delno v tlačeni coni, brez sodelujočih delov širine $b_{rob,eff}$, ki jih podpirajo sosednji pločevinasti elementi (Slika 19);

$A_{sl,eff}$ je vsota sodelujočih prerezov vseh vzdolžnih ojačitev s polno površino A_{sl} , ki so v tlačeni coni

$b_{c,loc}$ je širina tlačene delu vsakega podpanela

ρ_{loc} je redukcijski koeficient po za vsak podpanel

$$A_c = (h_s - b_{1,rob} - b_{2,rob}) t_w + b_{sl} t_{sl} = (1,000 - 0,179 - 0,356) \cdot 0,010 + 0,140 \cdot 0,014$$

$$A_c = 6,610 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + \sum_c \rho_{loc} b_{c,loc} t$$

$$A_{c,eff,loc} = b_{sl} t_{sl} + (b_{1,inf,eff} + b_{2,sup,eff} + t_{sl}) t_w = 0,140 \cdot 0,014 + (0,208 + 0,208 + 0,014) \cdot 0,010$$

$$A_{c,eff,loc} = 6,260 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\beta_{A,c}^p = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c} = \frac{6,260}{6,610} = 0,947$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c}^p \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} = \sqrt{\frac{0,947 \cdot 355}{1463}} = 0,479 < 0,673 \Rightarrow \rho = 1$$

3.4 Izbočenje vzdolžnih ojačitev

$$A_{sl,1} = (b_{1,inf} + b_{2,sup} + t_{sl})t_w + A_{sl}$$

$$A_{sl,1} = (0,214 + 0,237 + 0,014) \cdot 0,010 + 0,140 \cdot 0,014 = 6,610 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$A_{sl,1,eff} = (b_{1,inf,eff} + b_{2,sup,eff} + t_{sl})t_w + A_{sl,eff}$$

$$A_{sl,1,eff} = (0,208 + 0,208 + 0,014) \cdot 0,010 + 0,140 \cdot 0,014 = 6,260 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$I_{sl,1} = 10,996 \cdot 10^{-6} N / m^2$$

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 EI_{sl}}{A_{sl,1} a^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 10,996 \cdot 10^{-6}}{6,610 \cdot 10^{-3} \cdot 2,000^2} = 861 \cdot 10^6 N / m^2$$

$A_{sl,1}$ je polna površina prereza ojačitve in sosednjih delov pločevine, skladno s Slika 19

$I_{sl,1}$ je vztrajnostni moment ojačitve glede na upogib izven ravnine pločevine

$A_{sl,1,eff}$ je sodelujoča površina prereza ojačitve z upoštevanjem izbočenja pločevine

Ekstrapolacija elastične kritične napetosti na najbolj tlačni rob stojine:

$$\sigma_{cr,c} = \frac{h_s}{h_s - z_{sl}} \sigma_{cr,sl} = \frac{1,000}{1,000 - 0,400} \cdot 861 \cdot 10^6 = 1435 N / m^2$$

$$\beta_{A,c}^c = \frac{A_{sl,1,eff}}{A_{sl,1}} = \frac{6,260}{6,610} = 0,947$$

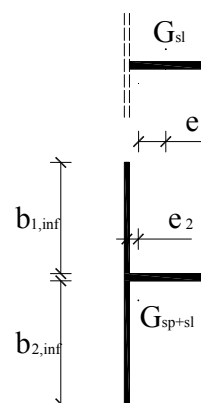
$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c}^c \cdot f_y}{\sigma_{cr,c}}} = \sqrt{\frac{0,947 \cdot 355}{1435}} = 0,484$$

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl,1}}{A_{sl,1}}} = \sqrt{\frac{10,996 \cdot 10^{-6}}{6,610 \cdot 10^{-3}}} = 41 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$e_2 = x_{sl} = 22 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$e_1 = \frac{b_{sl}}{2} + \frac{t_{sl}}{2} - e_2 = \frac{0,140}{2} + \frac{0,014}{2} - 0,022 = 53 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$e = \max(e_1; e_2) = \max(22; 53) \cdot 10^{-3} = 53 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$



Slika 20: Ekscentričnost ojačitve

$\alpha = 0,49$ - krivulja c) (ojačitev odprtega prereza)

$$\alpha_E = \alpha + \frac{0,09}{i/e} = 0,49 + \frac{0,09}{41 \cdot 10^{-3}} \cdot 53 \cdot 10^{-3} = 0,607$$

$$\phi = 0,5 \left(1 + \alpha_E (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2 \right) = 0,5 \cdot \left(1 + 0,607 \cdot (0,484 - 0,2) + 0,484^2 \right) = 0,703$$

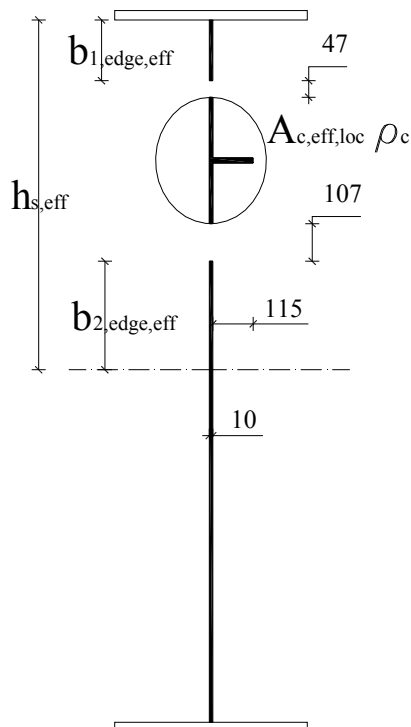
$$\chi_c = \left[\phi + \left(\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2 \right)^{0,5} \right]^{-1} = \left[0,703 + \left(0,703^2 - 0,484^2 \right)^{0,5} \right]^{-1} = 0,825$$

3.5 Interakcija med izbočenjem pločevine in ojačitve

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 = \frac{1463}{1435} - 1 = 0,020$$

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c = (1 - 0,825) \cdot 0,020 \cdot (2 - 0,020) + 0,825 = 0,832$$

3.6 Geometrijske karakteristike sodelujočega prereza



Slika 21: Geometrija sodelujočega prereza

$A_{c,eff}$ je sodelujoča površina tlačene cone ojačane pločevine

$x_{i,eff}$ je razlika med polno in sodelujočo širino

$$A_{c,eff} = \rho_c A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} t =$$

$$= 0,832 \cdot 6,260 \cdot 10^{-3} + (0,173 + 0,313) \cdot 0,010 = 10,068 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$x_{1,eff} = \bar{b}_{1c} - \rho_c \cdot b_{1,inf,eff} - b_{1,edge,eff} = 0,393 - 0,832 \cdot 0,208 - 0,173 = 47 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$x_{2,eff} = \bar{b}_{2c} - \rho_c \cdot b_{2,sup,eff} - b_{2,edge,eff} = 0,593 - 0,832 \cdot 0,208 - 0,313 = 107 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$x_{sl,eff} = (t_w + b_{sl}) \cdot (1 - \rho_c) = (0,010 + 0,140) \cdot (1 - 0,832) = 25 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Spremenjeno težišče:

$$x_{T,eff} = \frac{(b_{sl} - x_{sl,eff}) t_{sl} (h_s - z_{sl}) - x_{1,eff} t_w \left(h_s - b_{1,edge,eff} - \frac{x_{1,eff}}{2} \right) - x_{2,eff} t_w \left(b_{2,edge,eff} + \frac{x_{2,eff}}{2} \right)}{(A - (x_{1,eff} + x_{2,eff}) t_w - x_{sl,eff} t_{sl})}$$

$$x_{T,eff} = \frac{(0,140 - 0,025) \cdot 0,014 \cdot 0,600 - 0,047 \cdot 0,010 \left(1,000 - 0,137 - \frac{0,047}{2}\right) -}{(51,552 \cdot 10^{-3} - (0,047 + 0,107)0,010 - 0,025 \cdot 0,014)} -$$

$$- \frac{0,107 \cdot 0,010 \left(0,313 + \frac{0,107}{2}\right)}{49,662 \cdot 10^{-3}}$$

$$x_{T,eff} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$h_{s,eff} = h_s - x_{T,eff} = 1,000 - 0,004 = 0,996 \text{ m}$$

$$I_{eff} = \frac{h_w^3 t_w}{12} + h_w t_w x_{T,eff}^2 + 2 \cdot \frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left(h_s + \frac{t_f}{2} - x_{T,eff}\right)^2 + b_f t_f \left(h_s + \frac{t_f}{2} + x_{T,eff}\right)^2 +$$

$$+ \frac{b_{sl} t_{sl}^3}{12} + b_{sl} t_{sl} (h_s - z_{sl} - x_{T,eff})^2 - \frac{x_{1,eff}^3 t_w}{12} - x_{1,eff} t_w \left(h_s - b_{1,edge,eff} - \frac{x_{1,eff}}{2} - x_{T,eff}\right)^2 -$$

$$- \frac{x_{2,eff}^3 t_w}{12} - x_{2,eff} t_w \left(b_{2,edge,eff} + \frac{x_{2,eff}}{2} - x_{T,eff}\right)^2 - \frac{x_{sl,eff}^3 t_{sl}}{12} - x_{sl,eff} t_{sl} (h_s - z_{sl} - x_{T,eff})^2$$

$$I_{eff} = \frac{2,0^3 \cdot 0,010}{12} + 2,0 \cdot 0,010 \cdot 0,004^2 + 2 \cdot \frac{0,548 \cdot 0,027^3}{12} +$$

$$+ 0,548 \cdot 0,027 \left(1,0 + \frac{0,027}{2} - 0,004\right)^2 +$$

$$+ 0,548 \cdot 0,027 \left(1,0 + \frac{0,027}{2} + 0,004\right)^2 +$$

$$+ \frac{0,140 \cdot 0,014^3}{12} + 0,140 \cdot 0,014 (1,0 - 0,400 - 0,004)^2 -$$

$$- \frac{0,047^3 \cdot 0,010}{12} - 0,047 \cdot 0,010 \left(1,0 - 0,173 - \frac{0,047}{2} - 0,004\right)^2 -$$

$$- \frac{0,107^3 \cdot 0,010}{12} -$$

$$- 0,107 \cdot 0,010 \left(0,313 + \frac{0,107}{2} - 0,004\right)^2 -$$

$$- \frac{0,025 \cdot 0,014^3}{12} - 0,025 \cdot 0,014 (1,0 - 0,400 - 0,004)^2$$

$$I_{eff} = 37195,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$W_{eff} = \frac{I_{eff}}{h_{s,eff} + \frac{t_f}{2}} = \frac{37195,42 \cdot 10^{-6}}{0,996 + \frac{0,027}{2}} = 36845 \cdot 10^{-6} m^3$$

Kontrola povprečne napetosti v ojačitvi

$$\rho_c \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} > \sigma_{com,Ed}$$
$$\frac{\rho_c \cdot f_y}{\gamma_{M1} \cdot \sigma_{com,Ed}} = \frac{0,832 \cdot 1,0}{1,1 \cdot 0,6} = 1,26 > 1,0$$

⇒ Dodatna redukcija sodelujočega prereza $A_{c,eff,loc}$ ni potrebna

3.7 Upogibna nosilnost prereza

$$M_{Rd} = W_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 36845 \cdot 10^{-6} \cdot 355 \cdot 10^6 / 1,1 = 11890 \cdot 10^3 Nm$$

3.8 Izbočenje stojine zaradi uklona pasnice

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{2,00}{0,01} = 200 \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = 0,55 \cdot \frac{219 \cdot 10^9}{355 \cdot 10^6} \sqrt{\frac{20 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-3}}} = 392$$

A_w je površina prereza stojine

A_{fc} je površina prereza tlačene pasnice

Vrednost koeficienta k se vzame $k=0,55$ (izkoriščena je elastična upogibna odpornost)

4 PARAMETRIČNA ANALIZA

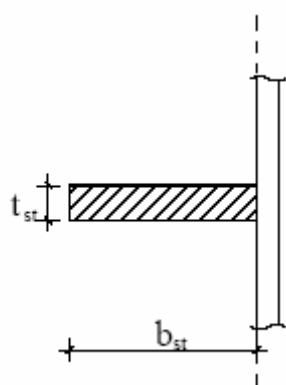
Po računskih postopkih za določanje tlačne in upogibne nosilnosti vzdolžno ojačanih pločevin, ki jih predpisuje standard EN 1993-1-5, smo izvedli parametrično analizo za tri različne primere, glede na število vzdolžnih ojačitev in obtežbo: a) I-profil z eno vzdolžno ojačitvijo – čisti upogib; b) I-profil z dvema vzdolžnima ojačitvama – čisti upogib in c) Pločevina z eno, dvema ali več vzdolžnimi ojačitvami ojačitev – čisti tlak. Račun smo izvedli z računalniškim programom EXCEL. Parametri, ki smo jih spreminjali, so: vitkost pločevine h/t , razmerje med dolžino in višino panela $\alpha=a/h$, razmerje med površinama prerezov ojačitve in stojine A_{sl}/A_w , lega ojačitev z_{sl} ali število ojačitev n ter višina pločevine h (glej Preglednica 6). Pri tem nas je zanimal vpliv parametrov na elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$, redukcijski koeficient ρ_c in na upogibno ali tlačno nosilnost, M_{Rd} oziroma N_{Rd} . V drugem delu analize smo elastično kritično napetost izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ v računu po standardu nadomestili z elastično kritično napetostjo izbočenja panela $\sigma_{cr,EBPlate}$, ki smo jo dobili z računom s pomočjo računalniškega programa EBPlate (glej 4.1). Ker se je pri rezultatih prvega dela analize izkazalo, da višina nosilcev nima bistvenega vpliva na izbočenje ojačane pločevine ter zaradi časovne omejenosti, smo račun s programom EBPlate izvedli le za eno višino nosilcev, $h=2000\text{mm}$. Tudi geometrijska parametra α in A_{sl}/A_w smo spreminjali v manjšem obsegu kot v prvem delu (glej Preglednica 2). Na koncu smo rezultate obeh načinov računa primerjali. Zaradi velikega obsega rezultatov smo si za izhodišče primerjave izbrali vodilne parametre: $h=2000\text{mm}$; $h/t=200$; $a/h=1,0$; $A_{sl}/A_w=0,1$; $A_f/A_w=0,75$; S355. V okviru teh smo rezultate tudi podrobneje analizirali.

Dimenzije vzdolžnih ojačitev smo izbrali skladno z minimalnimi zahtevami za preprečitev torzijskega uklona ojačitev (EN 1993-1-5, Poglavje 9.2.2):

$$\frac{I_T}{I_p} \geq 5,3 \frac{f_y}{E}, \quad (4.1)$$

kjer je: I_p polarni vztrajnostni moment ojačitve okoli robu, ki je priključen na pločevino;
 I_T St. Venantova konstanta same ojačitve.

Za pravokotno ojačitev velja:



$$\begin{aligned}
 I_p &= \frac{b_{st}^3 t_{st}}{3} + \frac{t_{st}^3 b_{st}}{12} \approx \frac{b_{st}^3 t_{st}}{3} \\
 I_T &= \frac{b_{st} t_{st}^3}{3} \\
 \frac{I_T}{I_p} &= \left(\frac{t_{st}}{b_{st}} \right)^3 \geq \frac{5,3 f_y}{E} \\
 \frac{b_{st}}{t_{st}} &\leq \sqrt{\frac{E}{5,3 f_y}} = \{13,0 (S235)
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Slika 22: Preprečitev torzijskega uklona pravokotne ojačitve

Skladno z zahtevami standarda smo izvedli kontrolo izbočenja zaradi uklona pasnice v smeri stojine (EN 1993-1-5, Poglavje 8):

Da preprečimo uklon tlačene pasnice v ravnino stojine, mora biti izpolnjen naslednji kriterij:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \frac{E}{f_{yf}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}}
 \tag{4.3}$$

Kjer je: A_w površina prereza stojine;

A_{fc} površina sodelujočega prereza tlačene pasnice

h_w višina stojine;

t_w debelina stojine.

$k = 0,55$ izkoriščen je elastični odpornostni moment

Za prereze, kjer je prišlo do izbočenja, upogibne nosilnosti nismo računali (Preglednica 1).

Preglednica 1: Kontrola izbočenja zaradi vpliva pasnic pri različnih vrednostih parametrov

$\frac{h_w}{t_w} \backslash \frac{A_f}{A_w}$	S235			S355			S690		
	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00	0,50	0,75	1,00
150	/	/	/	/	/	/	/	/	/
200	/	/	/	/	/	/	/	/ *	/ *
250	/	/	/	/	/	/	/	izbočenje	izbočenje
300	/	/	/	/	/	/	izbočenje	izbočenje	izbočenje
400	/	/	/	/	/ *	/ *	izbočenje	izbočenje	izbočenje

/ ... ni izbočenja / * ... ni izbočenja v primeru blažjega kriterija, kjer smo desno stran neenačbe (4.3)

pomnožili z vrednostjo 1,25

4.1 Račun z računalniškim programom EBPlate

Del parametrične analize smo izvedli z računalniškim programom EBPlate (Elastic Buckling of Plates) (CTICM, 2006), ki računa elastične kritične napetosti (ojačanih) pločevin. Program smo izbrali zaradi zelo dobrega ujemanja rezultatov z rezultati računa po metodi končnih elementov ter zaradi enostavnosti uporabe, ki nam je omogočila hiter račun velikega števila primerov (glej 4.1.2).

4.1.1 Metoda računa kritičnih napetosti

Program računa minimalni kritični faktor ϕ_{cr} , ki v povezavi z delujočimi napetostmi v pločevini (σ_x , σ_y , τ) določa elastični kritično napetost izbočenja:

$$\sigma_{x,cr} = \phi_{cr} \cdot \sigma_x \qquad \sigma_{y,cr} = \phi_{cr} \cdot \sigma_y \qquad \tau_{cr} = \phi_{cr} \cdot \tau \qquad (4.4)$$

Kritični faktor se računa z Rayleigh-Ritz metodo (energijska metoda). Ob izbočenju se oblika izbočenja pločevine izrazi s Fourierjevo vrsto:

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{m_{max}} \sum_{n=1}^{n_{max}} \left(a_{mn} \sin\left(\frac{m \pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n \pi y}{b}\right) \right) \qquad (4.5)$$

kjer je: m_{max} maksimalno število pol valov v x smeri;
 n_{max} maksimalno število pol valov v y smeri;
 a_{mn} parametri pomika oziroma prostostne stopnje sistema (komponente lastnega vektorja)

Računajo se spremembe energije in ob pojavu nestabilnosti velja:

$$\Delta U - \Delta W_{int}(S_{cr}) = 0 = \text{minimum}, \qquad (4.6)$$

kjer je: ΔU sprememba deformacijske energije pločevine;
 $\Delta W_{int}(S_{cr})$ sprememba notranjega dela kritičnih napetosti;
 $S_{cr} = \phi_{cr} S$ kritična napetost.

Rešuje se problem lastnih vrednosti:

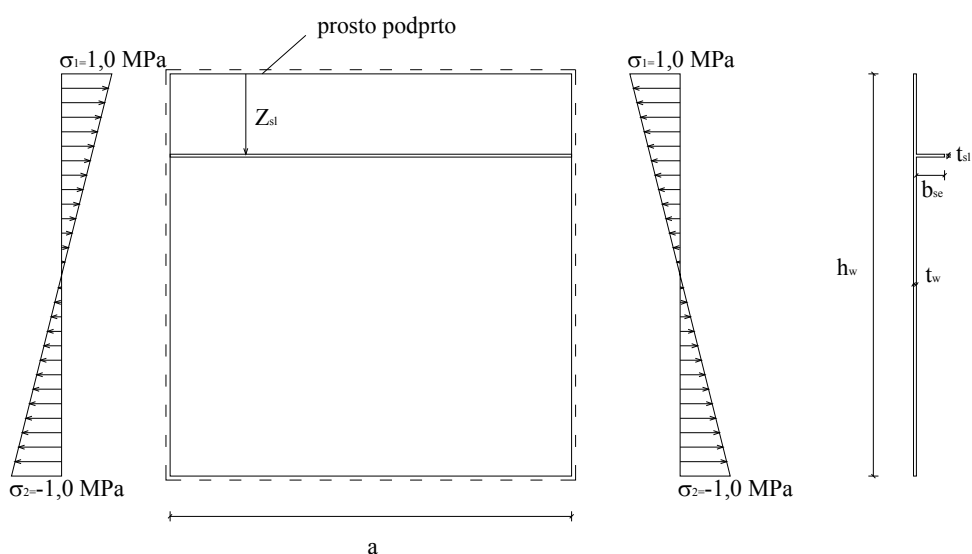
$$\det[R_0 - \phi_{cr} \cdot R_G(S)] = 0, \qquad (4.7)$$

Kjer je: R_0 začetna togostna matrika (iz deformacijske energije);
 R_G geometrijska togostna matrika (iz notranjega dela napetosti).

4.1.2 Vhodni podatki

Pri definiciji računskega modela ojačanega panela stojine smo določili:

- geometrijske karakteristike pločevine: širina a , višina h_w , debelina t ;
- geometrijo enostranskih ojačitev v vzdolžni smeri: pravokotni prečni prerez $b \cdot t$, položaj ojačitev y ;
- karakteristike jekla: $E=210000\text{MPa}$, $\nu=0,3$;
- podpore: vsi štirje robovi so prosto podprti;
- obtežba: razporeditev in velikost normalnih napetosti σ_x (Slika 23).



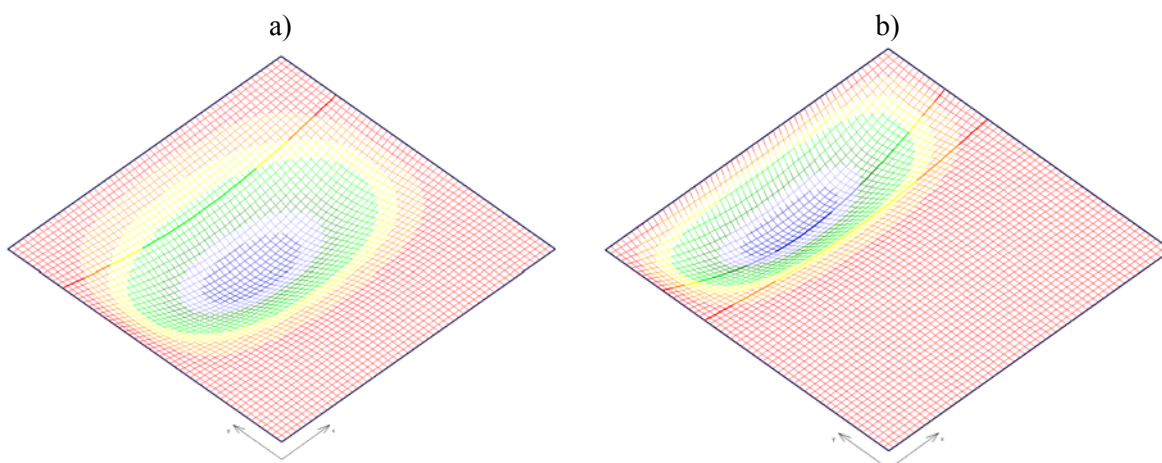
Slika 23: Računski model

Preglednica 2: Velikosti parametrov pri računu s programom EBPlate

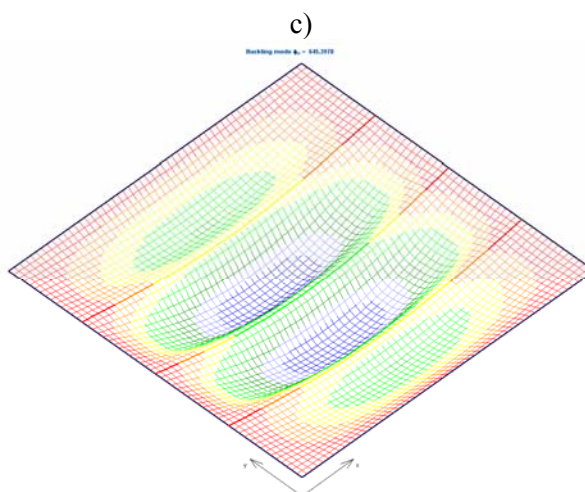
Stojina			Vzdolžna ojačitev					
$h_w(\text{mm})$	a/h_w	h_w/t_w	A_{sl}/A_w	b_{sl}/t_{sl}	z_{s1}/h_w	z_{s1l}/h_w	z_{s2}/h_w	$n_{\text{ojačitev}} (h/t)$
2000	0,7	150	0,05	12ε	0,050	0,050	0,200	1 - 4 (150)
	1,0	200	0,10		0,100	0,100	0,250	2 - 5 (200)
	1,5	250	0,15		0,133	0,133	0,283	2 - 7 (250)
	2,0	300	0,20		0,166	0,166	0,316	3 - 8 (300)
		400			0,200	0,200	0,350	4 - 11 (400)
	Pri $A_{sl}/A_w=0,10$		Pri $a/h_w=1,0$		0,250	0,250	0,400	
				0,300	0,300	0,450		
				0,400	0,349	0,499		
				0,490				
					čisti upogib (1 ali 2 ojačitvi)			čisti tlak

4.1.3 Rezultati

Upoštevali smo kritični faktor ϕ_{cr} uklonske oblike, ki ustreza izbočitvi panela (Slika 24 Slika 25), in določili elastične kritične napetosti $\sigma_{x,cr}$ (te smo v računu nosilnosti po standardu upoštevali kot $\sigma_{cr,p}$). Rezultati so prikazani v spodnjih Preglednicah (Preglednica 3-5) ter v diagramih (Poglavje 4.2).



Slika 24: Izbočenje panela ($h_w=2000\text{mm}$; $a/h_w=1,0$; $h_w/t_w=200$; $A_{sl}/A_w=0,10$; $z_{sl}/h_w=0,20$) v primeru: a) ene vzdolžne ojačitve ($\sigma_{cr}=1014\text{MPa}$); b) dveh vzdolžnih ojačitev ($\sigma_{cr}=1659\text{MPa}$) – čisti upogib



Slika 25: Izbočenje panela ($h_w=2000\text{mm}$; $a/h_w=1,0$; $h_w/t_w=200$; $A_{sl}/A_w=0,10$; $n=3$) v primeru treh vzdolžnih ojačitev ($\sigma_{cr}=645\text{MPa}$) – čisti tlak

Rezultati računa s programom EBPlate kažejo, da se v primeru upogiba stojine z eno vzdolžno ojačitvijo elastične kritične napetosti bistveno povečajo le v primeru, ko je ojačitev v sredini tlačnega dela stojine. Za to lego ojačitve se vrednosti kritičnih napetosti tudi najbolj ujemajo z rezultati računa po standardu, medtem ko so v primeru lege ojačitve blizu pasnice in blizu sredine stojine razlike zelo velike. Majhne vrednosti kritičnih napetosti pri računu s programom EBPlate si lahko razlagamo na sledeč način:

- Ko je ojačitev blizu sredine višine stojine (nevtralna os), pride do uklona ojačitve in s tem do izbočenja panela predvsem zaradi lokalnega izbočenja stojine in ne zaradi osne sile v ojačitvi.
- Tudi ko je ojačitev blizu pasnice, ima lokalno izbočenje stojine velik vpliv na globalno izbočenje panela in pri tem povzroča tudi torzijske deformacije ojačitve.

Podrobna primerjava z rezultati računa po standardu je opisana v poglavju 4.2.

Preglednica 3: Kritične napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ – ena vzdolžna ojačitev (čisti upogib)

$h_w=2000\text{mm}$												
$A_{sl}/A_w=0,10$	$h_w/t_w=150$				$h_w/t_w=200$				$h_w/t_w=250$			
σ_{cr} [Mpa]	a/h_w				a/h_w				a/h_w			
z_{sl}/h_w	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0
0,050	382	379	417	531	231	233	254	320	154	160	174	215
0,100	612	639	563	586	370	402	358	365	245	277	251	250
0,133	836	884	693	642	504	553	442	403	333	382	313	279
0,166	1168	1190	823	700	704	753	532	445	469	527	380	310
0,200	1703	1570	956	763	1028	1014	623	489	687	725	449	343
0,250	1947	1915	1121	858	1170	1245	734	554	780	893	530	391
0,300	1219	1566	1203	945	731	972	779	609	484	665	557	429
0,400	582	833	1030	1015	347	502	640	637	227	332	439	441
0,490	369	520	758	913	219	311	460	558	142	203	307	377
b_{sl}/t_{sl} (mm)	161/17				140/14				125/13			
t_w (mm)	13				10				8			

$h_w=2000\text{mm}$								
$A_{s1}/A_w=0,10$	$h_w/t_w=300$				$h_w/t_w=400$			
σ_{cr} [Mpa]	a/h_w				a/h_w			
z_{s1}/h_w	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0
0,050	119	124	135	167	64	70	77	92
0,100	188	214	195	194	100	120	115	111
0,133	256	296	243	217	136	168	148	127
0,166	361	408	296	241	193	237	184	145
0,200	530	563	350	268	285	339	221	163
0,250	602	694	414	305	323	421	263	187
0,300	372	513	434	334	198	286	268	204
0,400	174	255	338	341	91	136	192	199
0,490	109	156	236	290	57	82	128	161
b_{s1}/t_{s1} (mm)	114/12				99/10			
t_w (mm)	7				5			

$h_w=2000\text{mm}$												
$a/h_w=1,0$	$h_w/t_w=150$				$h_w/t_w=200$				$h_w/t_w=250$			
σ_{cr} [Mpa]	A_{s1}/A_w				A_{s1}/A_w				A_{s1}/A_w			
z_{s1}/h_w	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
0,050	276	379	469	544	168	233	297	339	112	160	201	228
0,100	396	639	811	930	249	402	513	578	170	277	344	386
0,133	504	884	1142	1317	319	553	719	816	221	382	483	546
0,166	623	1190	1600	1883	400	753	1016	1173	280	527	689	791
0,200	749	1570	2264	2772	486	1014	1465	1751	345	725	1009	1195
0,250	881	1915	2812	3432	575	1245	1812	2158	411	893	1249	1467
0,300	874	1566	1943	2188	560	972	1210	1347	391	665	807	899
0,400	622	833	926	993	382	502	566	603	255	332	371	396
0,490	437	520	557	585	264	311	337	352	173	203	219	230
b_{s1}/t_{s1} (mm)	114/12	161/17	198/20	228/23	99/10	140/14	171/18	198/20	88/9	125/13	153/16	177/18
t_w (mm)	13				10				8			

$h_w=2000\text{mm}$								
$a/h_w=1,0$	$h_w/t_w=300$				$h_w/t_w=400$			
σ_{cr} [Mpa]	A_{s1}/A_w				A_{s1}/A_w			
z_{s1}/h_w	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
0,050	86	124	153	178	48	70	86	97
0,100	131	214	262	299	77	120	145	161
0,133	171	296	367	425	102	168	204	231
0,166	217	408	524	617	134	237	295	339
0,200	269	563	770	935	170	339	444	522
0,250	320	694	955	1147	205	421	547	639
0,300	303	513	613	700	183	286	338	380
0,400	196	255	282	307	109	136	151	163
0,490	133	156	167	178	71	82	88	93
b_{s1}/t_{s1} (mm)	81/8	114/12	140/14	161/17	70/7	99/10	121/12	140/14
t_w (mm)	7				5			

Preglednica 4: Kritične napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ – dve vzdolžni ojačitvi (čisti upogib)

$h_w=2000\text{mm}$		$h_w/t_w=150$				$h_w/t_w=200$				$h_w/t_w=250$			
$A_{s1}/A_w=0,10$		a/h_w				a/h_w				a/h_w			
σ_{cr} [Mpa]		a/h_w				a/h_w				a/h_w			
z_{s1}/h	z_{s2}/h	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0
0,050	0,200	1725	1611	1002	796	1049	1037	655	513	705	738	475	364
0,100	0,250	3276	2284	1224	898	2028	1527	815	589	1387	1122	595	420
0,133	0,283	4599	2578	1362	973	3065	1728	905	638	2212	1269	660	456
0,166	0,316	4244	2644	1464	1042	2775	1757	972	685	1987	1278	706	489
0,200	0,350	3352	2534	1532	1110	2109	1659	1013	729	1458	1193	732	520
0,250	0,400	2038	2110	1552	1195	1242	1342	1010	778	833	939	721	553
0,300	0,450	1265	1576	1459	1243	761	975	931	800	504	666	655	563
0,349	0,499	849	1147	1285	1237	508	699	804	782	334	469	556	544
b_{s1}/t_{s1} (mm)		161/17				140/14				125/13			
t_w (mm)		13				10				8			

$h_w=2000\text{mm}$		$h_w/t_w=300$				$h_w/t_w=400$			
$A_{s1}/A_w=0,10$		a/h_w				a/h_w			
σ_{cr} [Mpa]		a/h_w				a/h_w			
z_{s1}/h	z_{s2}/h	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0
0,050	0,200	543	663	372	285	295	342	236	176
0,100	0,250	1072	1032	467	330	599	562	301	206
0,133	0,283	1728	1087	518	358	1007	649	334	224
0,166	0,316	1551	1044	554	384	949	641	356	241
0,200	0,350	1129	947	573	407	642	580	363	255
0,250	0,400	641	730	595	432	349	427	348	267
0,300	0,450	388	514	508	438	207	288	303	265
0,349	0,499	256	362	430	421	135	197	247	248
b_{s1}/t_{s1} (mm)		114/12				99/10			
t_w (mm)		7				5			

$h_w=2000\text{mm}$		$h_w/t_w=150$				$h_w/t_w=200$				$h_w/t_w=250$			
$a/h_w=1,0$		A_{s1}/A_w				A_{s1}/A_w				A_{s1}/A_w			
σ_{cr} [Mpa]		A_{s1}/A_w				A_{s1}/A_w				A_{s1}/A_w			
z_{s1}/h	z_{s2}/h	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
0,050	0,200	782	1611	2277	2772	509	1037	1468	1753	361	738	1010	1179
0,100	0,250	1018	2284	3550	4707	675	1527	2392	3138	487	1122	1722	2228
0,133	0,283	1153	2578	3940	5142	765	1728	2656	3486	553	1269	1932	2537
0,166	0,316	1232	2644	3935	5084	816	1757	2627	3421	588	1278	1896	2472
0,200	0,350	1247	2534	3673	4706	819	1659	2427	3103	584	1193	1726	2206
0,250	0,400	1154	2110	2851	3439	742	1342	1825	2172	520	939	1252	1483
0,300	0,450	976	1576	1957	2228	615	975	1222	1375	422	666	818	918
0,349	0,499	791	1147	1345	1482	490	699	829	904	331	469	548	597
b_{s1}/t_{s1} (mm)		114/12	161/17	198/20	228/23	99/10	140/14	171/18	198/20	88/9	125/13	153/16	177/18
t_w (mm)		13				10				8			

$h_w=2000\text{mm}$		$h_w/t_w=300$				$h_w/t_w=400$			
$a/h_w=1,0$		A_{sl}/A_w				A_{sl}/A_w			
σ_{cr} [Mpa]		0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
z_{s1}/h	z_{s2}/h								
0,050	0,200	281	663	770	936	178	342	445	526
0,100	0,250	381	1032	1332	1750	250	562	826	1047
0,133	0,283	434	1087	1519	2001	286	649	985	1312
0,166	0,316	461	1044	1486	1948	300	641	950	1259
0,200	0,350	457	947	1339	1732	291	580	828	1062
0,250	0,400	404	730	956	1157	247	427	552	651
0,300	0,450	326	514	622	713	190	288	344	387
0,349	0,499	254	362	417	463	144	197	226	247
b_{sl}/t_{sl} (mm)		81/8	114/12	140/14	161/17	70/7	99/10	121/12	140/14
t_w (mm)		7				5			

Preglednica 5: Kritične napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ – n vzdolžnih ojačitev (čisti tlak)

$b=2000\text{mm}$		$b/t=150$				$b/t=200$				$b/t=250$			
$A_{sl}/A_w=0,10$		a/b				a/b				a/b			
σ_{cr} [Mpa]	$n_{ojačitev}$	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0
1	1	227	294	250	180	/				/			
2	2	901	712	378	239	557	462	249	157	255	328	184	115
3	3	1454	971	467	286	1074	645	311	189	577	477	231	139
4	4	2183	1158	541	325	1444	776	362	217	1052	576	269	160
5	5	/				1719	883	406	241	1270	657	302	178
6	6	/				/				1433	724	330	194
7	7	/				/				1565	783	356	208
b_{sl}/t_{sl} (mm)		161/17				140/14				125/13			
t (mm)		13				10				8			

$b=2000\text{mm}$		$b/t=300$				$b/t=400$			
$A_{sl}/A_w=0,10$		a/b				a/b			
σ_{cr} [Mpa]	$n_{ojačitev}$	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0
3	3	446	372	180	109	/			
4	4	819	451	211	125	493	298	140	82
5	5	996	515	237	140	651	342	157	92
6	6	1126	569	260	152	744	379	172	100
7	7	1232	616	280	163	817	410	186	108
8	8	1322	658	298	174	880	438	198	115
9	9	/				933	463	209	121
10	10	/				981	486	219	126
11	11	/				1029	507	228	132
b_{sl}/t_{sl} (mm)		114/12				99/10			
t (mm)		7				5			

b=2000mm												
a/b=1,0	b/t=150				b/t=200				b/t=250			
σ_{cr} [Mpa]	A_{sl}/A_w				A_{sl}/A_w				A_{sl}/A_w			
$n_{ojačitev}$	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0
1	177	294	228	246	/				/			
2	296	712	928	1013	195	462	574	625	141	328	380	420
3	382	971	1584	2167	254	645	1066	1443	186	477	771	1020
4	457	1158	1895	2611	306	776	1285	1771	224	576	941	1298
5	/				352	883	1445	1984	258	657	1062	1460
6	/				/				289	724	1157	1579
7	/				/				318	783	1237	1674
b_{sl}/t_{sl} (mm)	114/12	161/17	198/20	228/23	99/10	140/14	171/18	198/20	88/9	125/13	153/16	177/18
t (mm)	13				10				8			

b=2000mm									
a/b=1,0	b/t=300				b/t=400				
σ_{cr} [Mpa]	A_{sl}/A_w				A_{sl}/A_w				
$n_{ojačitev}$	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0	
3	145	372	596	797	/				
4	175	451	733	1021	118	298	482	672	
5	203	515	832	1152	137	342	551	769	
6	228	569	910	1247	154	379	604	837	
7	251	616	975	1324	170	410	648	890	
8	272	658	1031	1387	185	438	685	933	
9	/				198	463	717	970	
10	/				211	486	746	1004	
11	/				224	507	772	1033	
b_{sl}/t_{sl} (mm)	81/8	114/12	140/14	161/17	70/7	99/10	121/12	140/14	
t (mm)	7				5				

4.2 Račun po standardu EN-1993-1-5

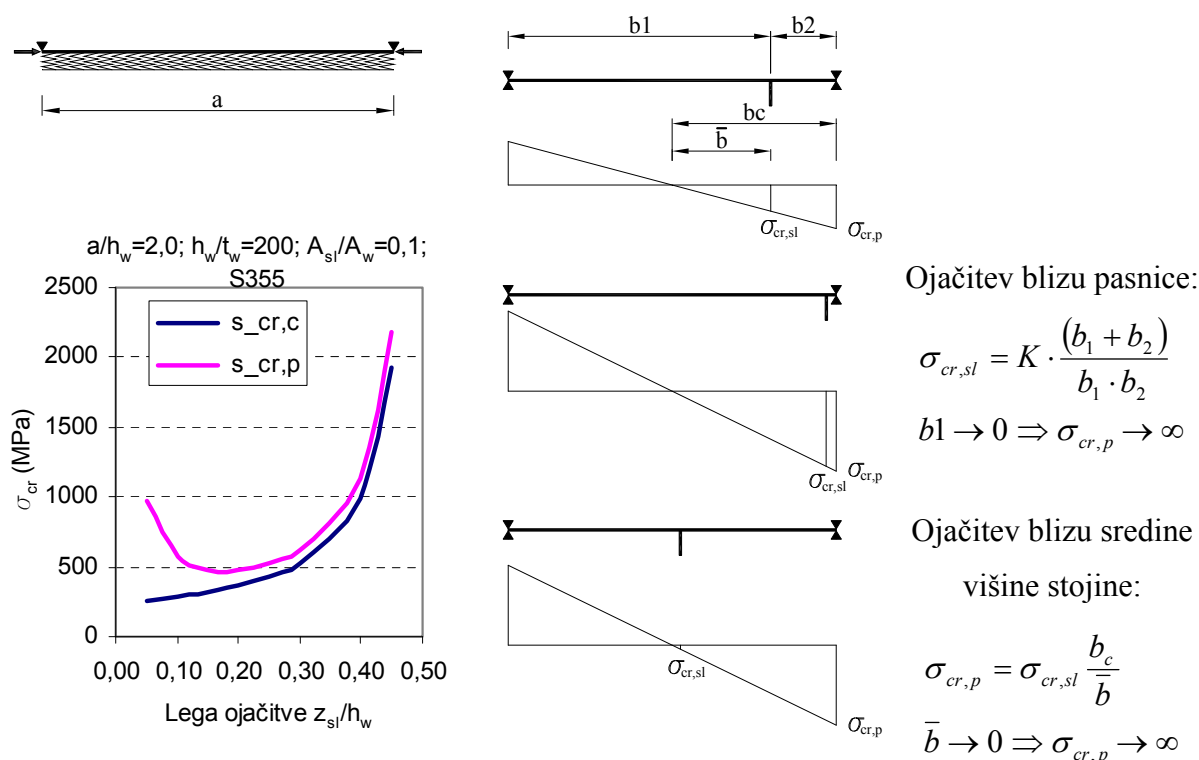
Opomba: Pri računu upogibne nosilnosti smo prvotni razpored napetosti pri polnem prerezu, kjer je nevtralna os na sredini višine nosilca, ohranili tudi pri sodelujočem prerezu. Za to poenostavitev smo se odločili, ker so bile razlike v rezultatih pri računu z novim razporedom napetosti, ko je nevtralna os v težišču sodelujočega prereza, zanemarljive.

Preglednica 6: Velikosti parametrov pri računu po standardu

Stojina			Vzdolžna ojačitev						Pasnica		Material
h_w (mm)	a/h_w	h_w/t_w	A_{sl}/A_w	b_{sl}/t_{sl}	z_{sl}/h_w	z_{sl1}/h_w	z_{sl2}/h_w	$n_{ojačitev}(h/t)$	A_f/A_w	b_f/t_f	Jeklo
1000	0,7	150	0,05	12ε	0,050	0,050	0,200	1 - 4 (150)	0,50	20	S235
2000	1,0	200	0,10		0,100	0,100	0,250	2 - 5 (200)	0,75		S355
3000	1,5	250	0,15		0,133	0,133	0,283	2 - 7 (250)	1,00		S690
	2,0	300	0,20		0,166	0,166	0,316	3 - 8 (300)			
		400			0,200	0,200	0,350	4 - 11 (400)			
					0,250	0,250	0,400	lokalna vitkost pločevine: 40ε - 100ε			
					0,300	0,300	0,450				
					0,400	0,349	0,499				
					0,490						
								čisti upogib(1 ali 2 ojačitvi)	čisti tlak	samo upogib	

4.2.1 I-profil z eno vzdolžno ojačitvijo – čisti upogib

Rezultati računa po standardu pokažejo, da kritične napetosti pri vseh vrednostih različnih parametrov v primeru lege ojačitve blizu sredine višine stojine naraščajo v neskončnost. To je posledica računa $\sigma_{cr,p}$ z ekstrapolacijo napetosti na mestu ojačitve $\sigma_{cr,sl}$ na rob stojine (2.28) (Slika 26). V primeru lege ojačitve blizu pasnice kritične napetosti močno naraščajo le pri določenih vrednostih parametrov α in A_{sl}/A_w (glej 4.2.1.2 in 4.2.1.3).

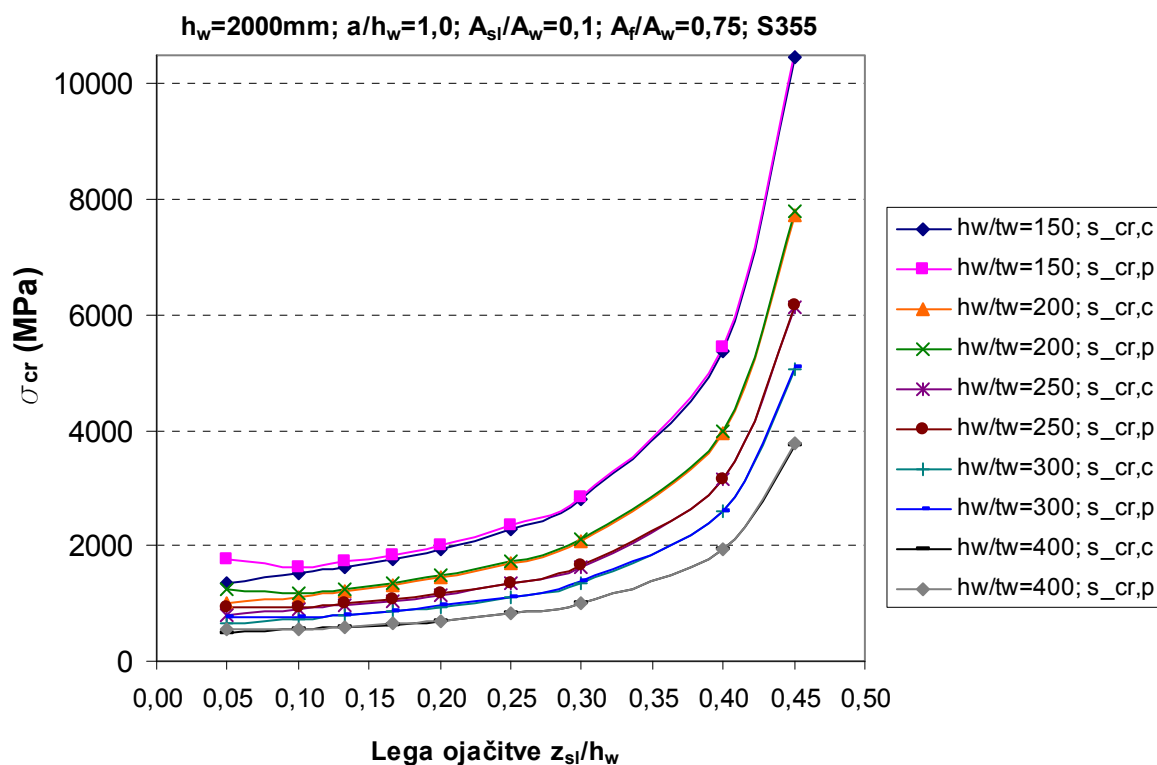


Slika 26: Lega ojačitve blizu pasnice in blizu sredine višine stojine (računski model ojačitve na elastični podlagi)

4.2.1.1 Vpliv vitkosti stojine nosilca h_w/t_w

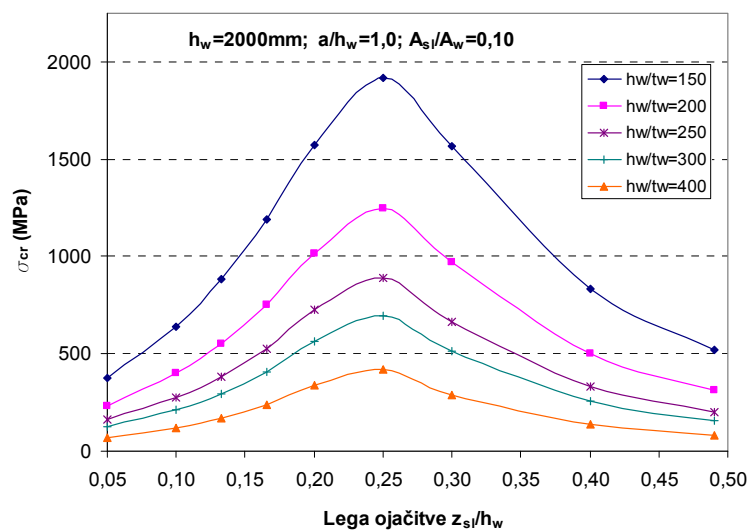
Na Slika 27 vidimo, da se z večanjem vitkosti stojine h_w/t_w kritične napetosti $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ zmanjšujejo. S premikanjem ojačitve proti sredini višine stojine in nevtralni osi kritične napetosti naraščajo proti neskončnosti, hkrati se večajo razlike med vrednostmi za posamezne vitkosti. Vrednosti kritične napetosti uklona $\sigma_{cr,c}$ in kritične napetosti izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ za

posamezne vitkosti stojine so si zelo blizu, odstopanja so večja le pri legi ojačitve blizu roba stojine in pri manjših vitkosti stojine ($h_w/t_w=150$ in 200). Pri tem je vrednost kritične napetosti izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ malo večja od vrednosti kritične napetosti uklona ojačitve $\sigma_{cr,c}$.



Slika 27: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od lege ojačitve za različne vitkosti stojine h_w/t_w (račun po standardu EN 1993-1-5)

Rezultati računa z računalniškim programom EBPlate kažejo, da se kritične napetosti σ_{cr} z večanjem vitkosti stojine h_w/t_w zmanjšujejo (Slika 28). Oblike krivulj odvisnosti od lege ojačitve so za različne vitkosti zelo podobne. Kritične napetosti naraščajo z večanjem oddaljenosti ojačitve od roba stojine do razdalje $z_{sl}=0,25$ (sredina tlačne cone), nato pa s približevanjem ojačitve sredini višine stojine s podobnim naklonom padajo. Razlike med vrednostmi za posamezne vitkosti se zmanjšujejo z večanjem vitkosti stojine ter s premikanjem ojačitve proti robu in proti sredini stojine.

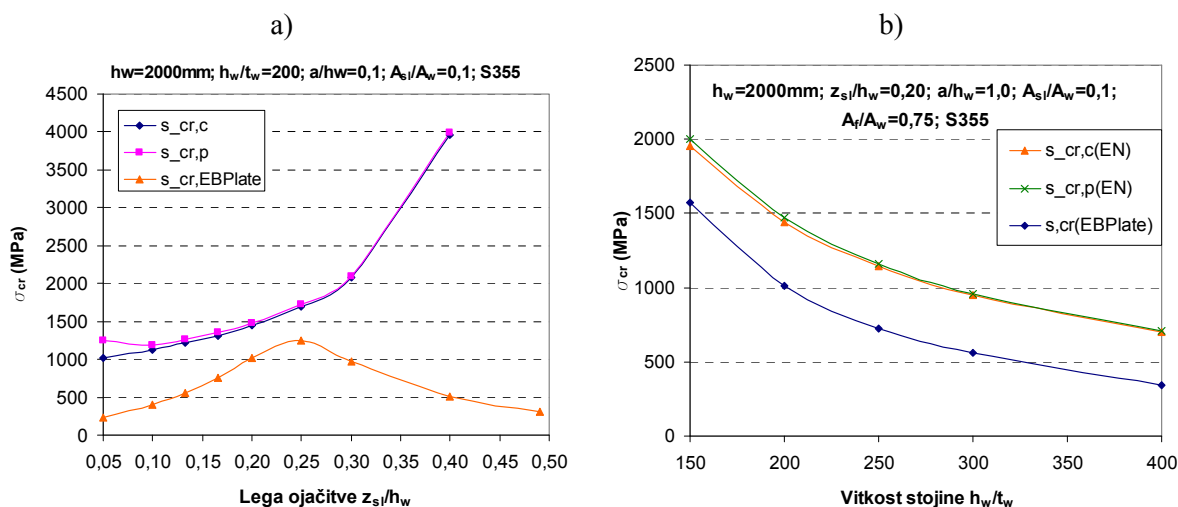


Slika 28: Elastične kritične napetosti izbočenja panela σ_{cr} v odvisnosti od lege ojačitve za različne vitkosti stojine h_w/t_w (račun s programom EBPlate)

Pri primerjavi kritičnih napetosti obeh načinov računa (Slika 29a) vidimo, da so odstopanja med rezultati računa po standardu in s programom EBPlate velika. Razlike naraščajo s premikanjem ojačitve v bližino pasnice ter s premikanjem ojačitve v bližino nevtralne osi na sredini stojine nosilca, ko kritične napetosti, izračunane po standardu, naraščajo v neskončnost, kritične napetosti, izračunane s programom EBPlate, pa se zmanjšujejo. Odstopanja so najmanjša v območju na sredini tlačene cone prereza, pri $z_{sl}/h_w=0,20$ do $0,25$.

Razlogi za taka odstopanja so v poenostavljenem načinu računa kritične napetosti izbočenja panela po standardu EN 1993-1-5 (Dodatek A) z računskim modelom ojačitve s pripadajočo pločevino, ki je podprta z elastično podlago.

V primeru, ko se ojačitev približuje sredini stojine in nevtralni osi, narašča kritična napetost izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ proti neskončnosti zaradi ekstrapolacije kritične napetosti $\sigma_{cr,sl}$ na rob stojine (enačba (2.25)).



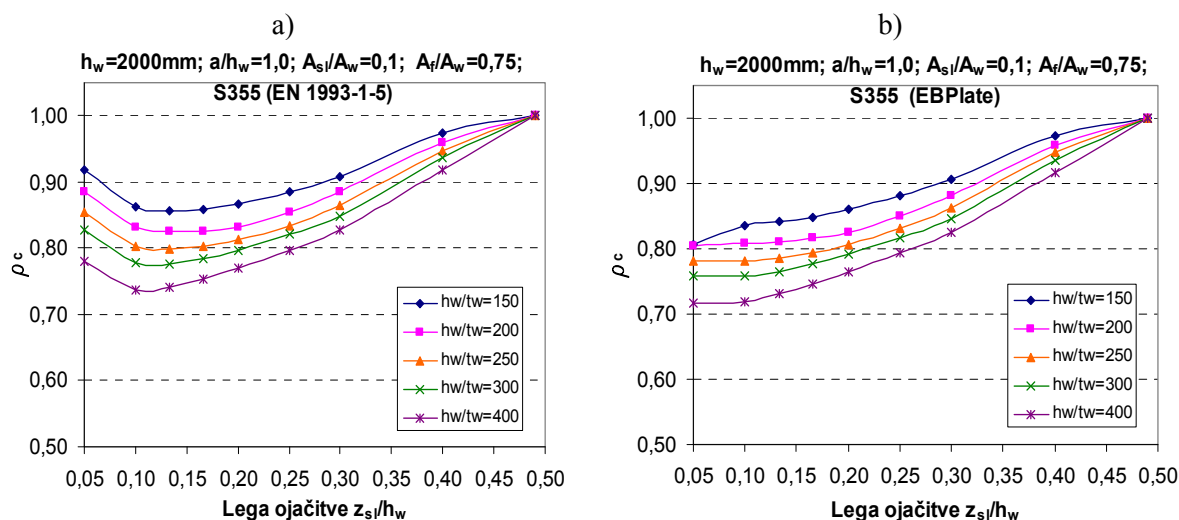
Slika 29: Primerjava elastičnih kritičnih napetosti izbočenja σ_{cr} v odvisnosti od: a) lege ojačitve z_{sl}/h_w , za vitkost stojine $h_w/t_w=200$ in b) vitkosti stojine h_w/t_w , za lego ojačitve $z_{sl}/h_w=0,20$

Odvisnost kritičnih napetosti od vitkosti je pri obeh načinih računa zelo podobna (Slika 29b). Znatne razlike pa so v velikosti kritičnih napetosti, in sicer so vrednosti kritičnih napetosti, izračunanih s programom EBPlate za lego ojačitve $z_{sl}=0,2h_w$ (območje, kjer so razlike najmanjše) za približno 400MPa manjše pri vseh vitkosti pločevine. To pomeni da delež odstopanja narašča z večanjem vitkosti pločevine, ko so vrednosti kritičnih napetosti nižje (od 30% za vitkost $h_w/t_w=150$ do 110% za vitkost $h_w/t_w=400$).

Redukcijski koeficient ρ_c se v obeh primerih računa zmanjšuje z večanjem vitkosti pločevine h_w/t_w (Slika 30). Krivulje, ki opisujejo odvisnost redukcijskega koeficienta od lege ojačitve, so si za različne vitkosti pločevine med seboj podobne po obliki.

Standard (Slika 30a): Ko je ojačitev blizu pasnice nosilca (od $z_{sl}/h_w=0,05$ do 0,10) redukcijski koeficient pada, potem pa s premikanjem ojačitve proti sredini stojine narašča, kjer pri legi $z_{sl}=0,5$ doseže vrednost 1 (ni redukcije).

EBPlate (Slika 30b) : Redukcijski faktor je najnižji, ko je ojačitev najbližje stojini ($z_{sl}=0,05h_w$) in se povečuje s premikanjem ojačitve proti sredini stojine, kjer doseže vrednost 1.

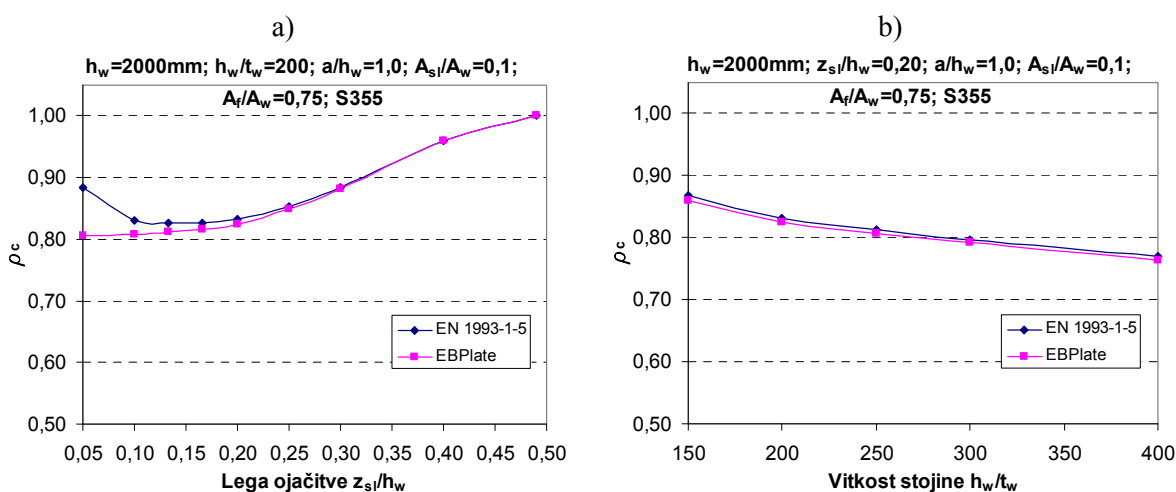


Slika 30: Redukcijski koeficient ρ_c v odvisnosti od lege ojačitve za različne vitkosti stojine h_w/t_w

Primerjava: Vrednosti redukcijskega koeficienta so pri računu po standardu malo večje (nevarna stran). Odstopanja so največja pri legi ojačitve blizu pasnice ($z_{si}/h_w=0,05$) in se s premikanjem ojačitve proti sredini stojine manjšajo (Slika 31), čeprav so tu razlike med kritičnimi napetostmi največje. Razlog je v omejitvi koeficienta ξ v interakcijski enačbi za ρ_c (2.39), ki je v primeru, ko je $\sigma_{cr,p} < \sigma_{cr,c}$ (ne glede na velikost razlike), vedno enak vrednosti 0. Za lege ojačitve v bližini sredine stojine tako dobimo:

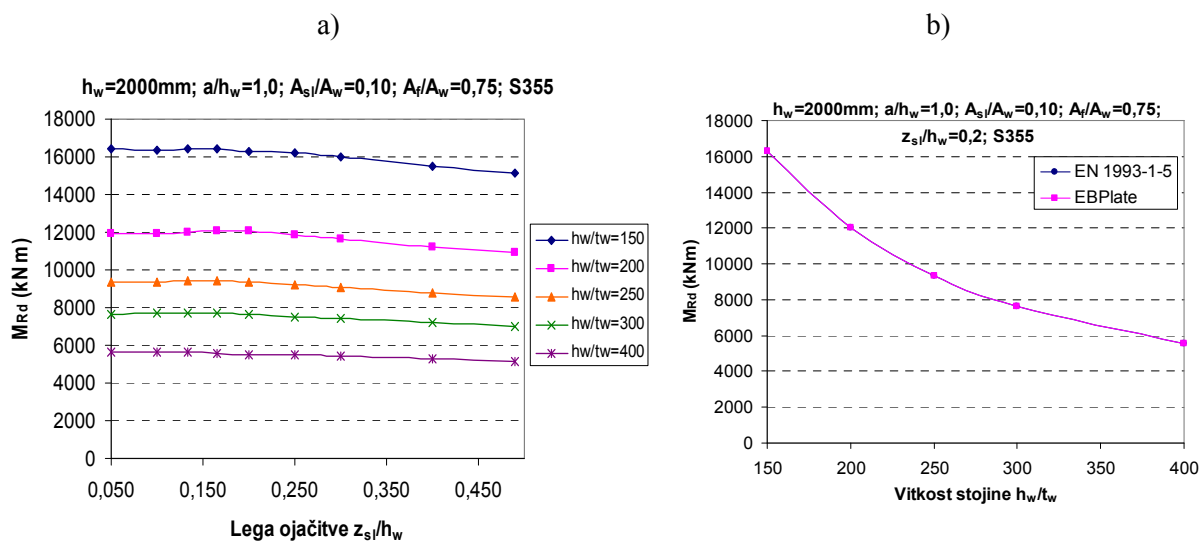
$$\sigma_{cr,p} \approx \sigma_{cr,c} \Rightarrow \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} \approx 1 \Rightarrow \xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 \approx 0 \Rightarrow \rho_c \approx \chi_c \quad (4.8)$$

$$\sigma_{cr,EBPlate} < \sigma_{cr,c} \Rightarrow \frac{\sigma_{cr,EBPlate}}{\sigma_{cr,c}} < 1 \Rightarrow \xi = \frac{\sigma_{cr,EBPlate}}{\sigma_{cr,c}} - 1 < 0 \Rightarrow \xi = 0 \Rightarrow \rho_c = \chi_c$$

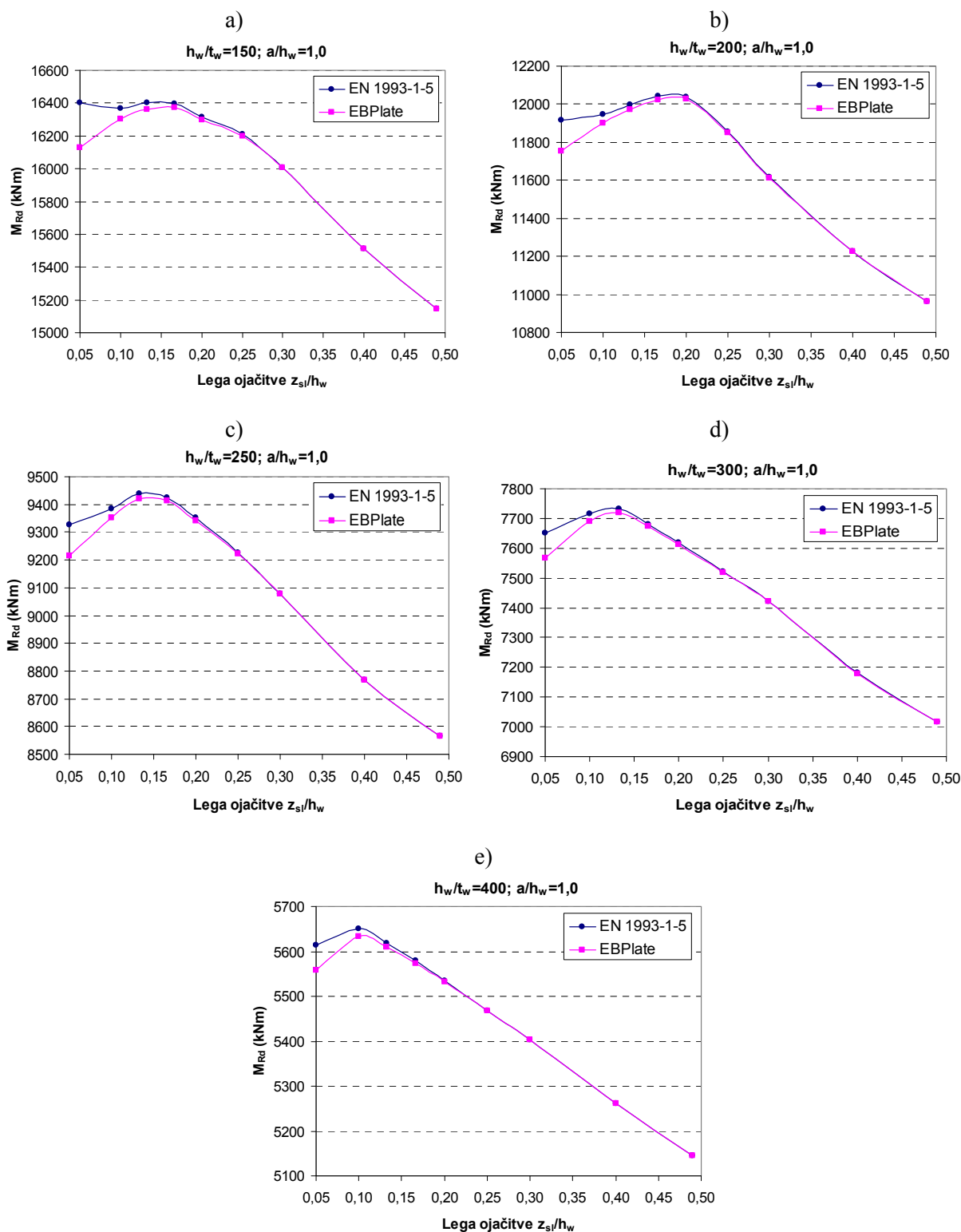


Slika 31: Primerjava koeficientov ρ_c v odvisnosti od: a) lege ojačitve; b) vitkosti stojine

Upogibna nosilnost prereza z večanjem vitkosti pada (Slika 32). V odvisnosti od lege ojačitve se spreminja skladno z redukcijskimi faktorji. Tako so vrednosti, izračunane po standardu in s pomočjo programa EBPlate, za vse vitkosti zelo blizu skupaj (Slika 32b). Odstopanja so le, ko je ojačitev najbližje pasnici, pri $z_{sl}=0,05h_w$, in se z zmanjševanjem vitkosti večajo (Slika 33). Najbolj učinkovita lega ojačitve se s spreminjanjem vitkosti spreminja. Za vitkost $h_w/t_w=150$ je ta pri $z_{sl}=0,166h_w$, za vitkost $h_w/t_w=200$ pri $z_{sl}=0,20h_w$, od tu pa se z večanjem vitkosti premika proti pasnici. Z najbolj učinkovito lego ojačitve se upogibna nosilnost vzdolžno ojačanega I-profila z vitkostjo stojine $h_w/t_w=200$ poveča za od 8% ($h_w/t_w=150$) do 10% (glej Preglednica 8).



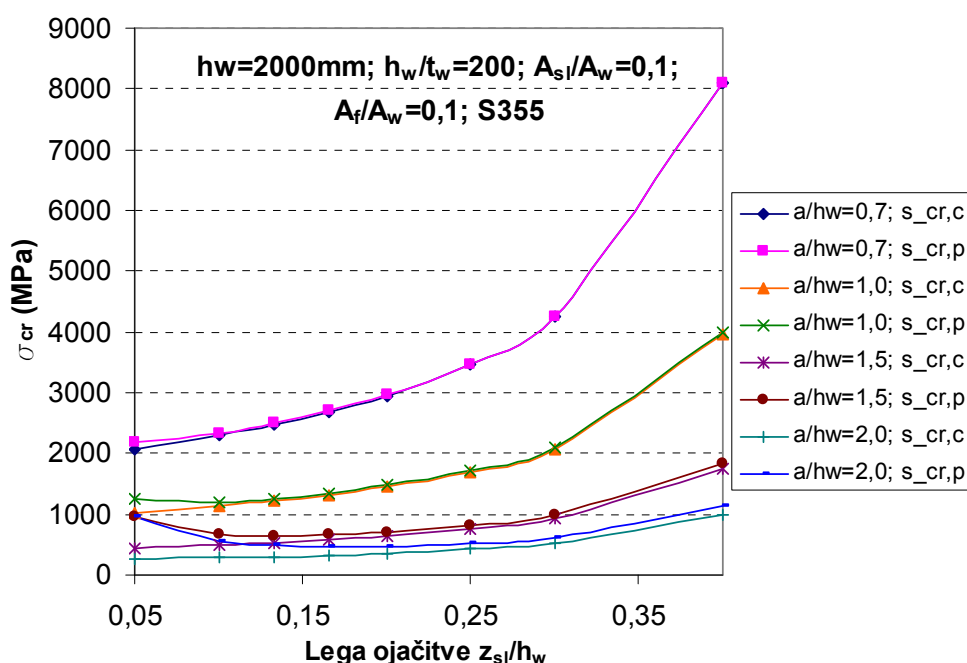
Slika 32: M_{Rd} v odvisnosti od: a) lege ojačitve (EN); b) vitkosti stojine (primerjava)



Slika 33: Upogibna nosilnost v odvisnosti od lege ojačitve za posamezne vitkosti h_w/t_w , za primer $h=2000\text{mm}$; $A_{sl}/A_w=0,1$; $A_f/A_w=0,75$; S355

4.2.1.2 Vpliv razmerja med dolžino in višino panela $\alpha=a/h_w$

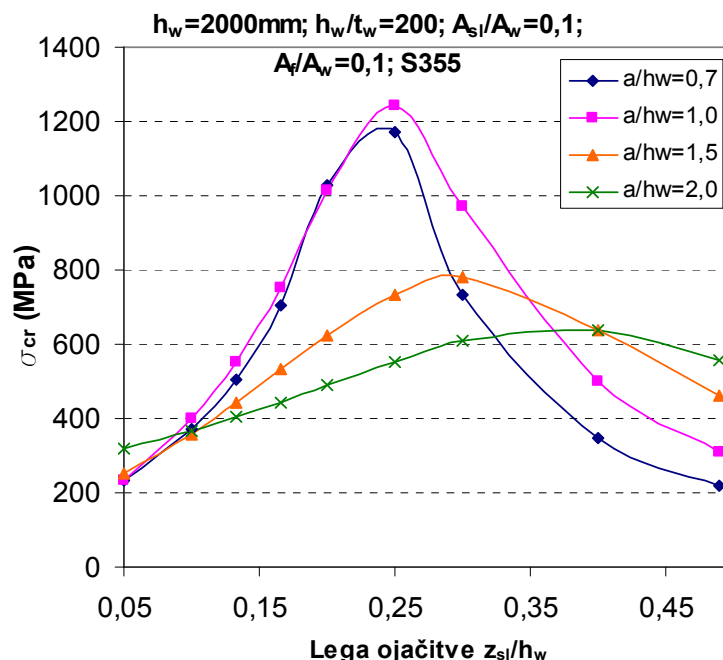
Geometrijsko razmerje $\alpha=a/h_w$ smo spreminjali z večanjem dolžine panela a . Rezultati kažejo, da se v primeru računa po standardu kritične napetosti večajo z zmanjševanjem razmerja α (Slika 34). Odvisnost kritičnih napetosti od lege ojačitve je za različna razmerja α zelo podobna. Razlike se pojavijo le pri kritičnih napetostih izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$, in sicer pri legah ojačitve blizu pasnice ($z_{sl}/h_w=0,05$ in $0,1$). V tem območju kritične napetosti z večanjem razmerja α strmo naraščajo. Razlog za to izhaja iz enačbe (2.20) (A.4 v standardu), kjer za prereze z velikim razmerjem α in ojačitvijo zelo blizu pasnice velja (zlasti pri manjših vitkostih), da je $a \geq a_c$, s tem pa vrednost $\sigma_{cr,sl}$ z manjšanjem vrednosti b_1 , to je s približevanje ojačitve pasnici, narašča v neskončnost. Z večanjem razmerja α narašča tudi razlika med kritičnimi napetostmi izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ in kritičnimi napetostmi uklona $\sigma_{cr,c}$. Pri tem so napetosti $\sigma_{cr,p}$ večje od napetosti $\sigma_{cr,c}$.



Slika 34: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w (račun po standardu)

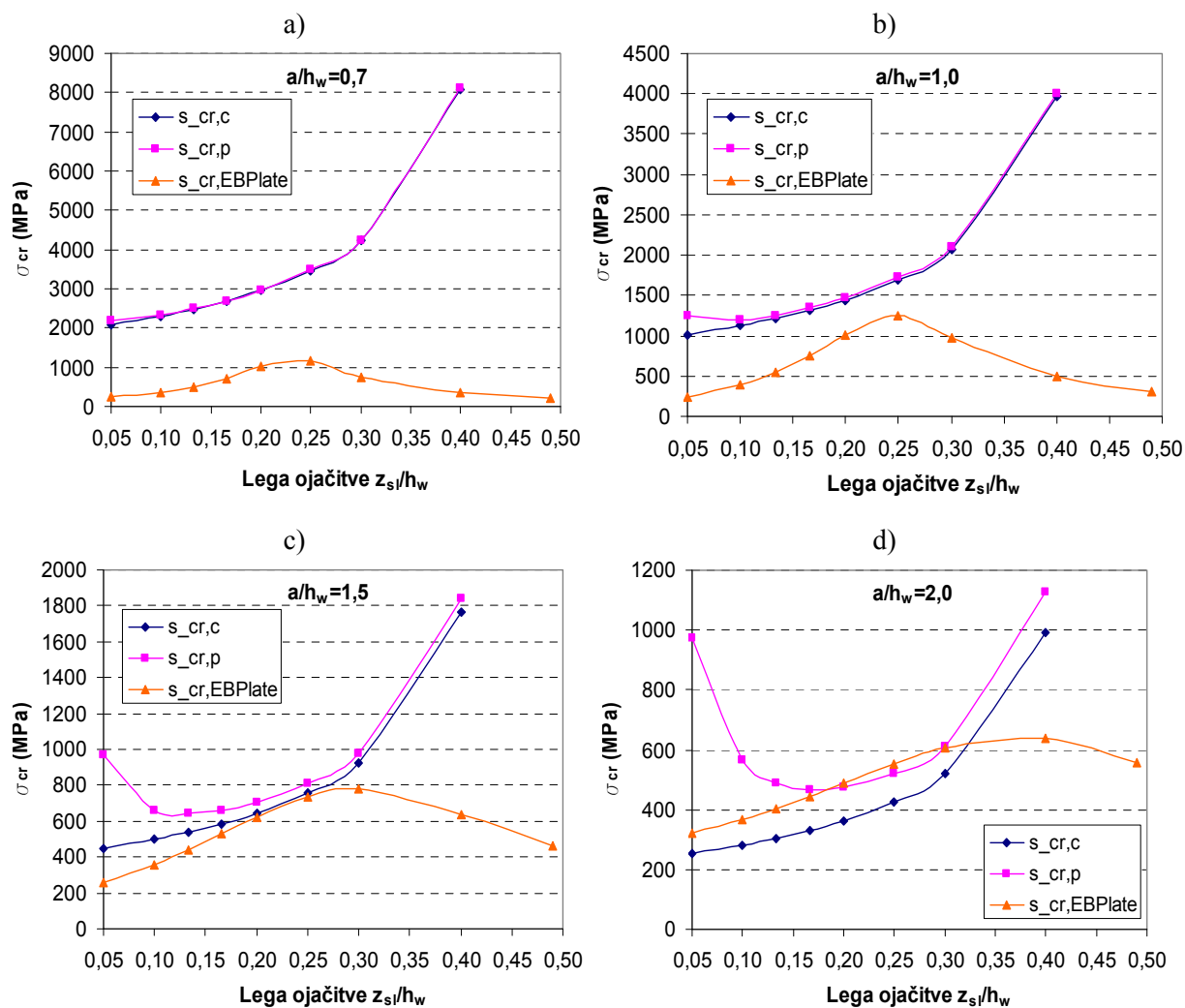
Račun s programom EBPlate da zelo drugačne rezultate (Slika 35). Tu so vrednosti kritičnih napetosti za razmerji $\alpha=0,7$ in $\alpha=1,0$ zelo blizu skupaj. S premikanjem ojačitve proti sredini stojine so kritične napetosti za razmerje $\alpha=1,0$ malo večje. Z večanjem razmerja α od $\alpha=1,0$

do 2,0 tudi tu kritične napetosti padajo. Pri tem se lega ojačitve, kjer so kritične napetosti največje, pomika proti sredini stojine (od $z_{sl}=0,25h_w$ do $z_{sl}=0,30h_w$ in $z_{sl}=0,40h_w$).



Slika 35: Elastične kritične napetosti izbočenja σ_{cr} , v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w (račun s programom EBPlate)

Pri primerjavi kritičnih napetosti σ_{cr} (EN) in σ_{cr} (EBPlate) za posamezna razmerja α vidimo, da se razlika v vrednostih manjša z večanjem razmerja α in je vedno najmanjša pri legah ojačitve v sredini tlačene cone ($z_{sl}=0,20$ do $0,25h_w$). Rezultati se najbolj ujemajo pri razmerju $\alpha=2,0$ za lege ojačitve $z_{sl}/h_w = 0,166$ do $0,30$ (Slika 36). Ko je ojačitev zelo blizu pasnice, je tam pripadajoča širina pločevine b_1 zelo majhna. Če je pri tem razmerje α veliko ($\alpha=1,5$ in $2,0$), se ta del pločevine z ojačitvijo izboči v več kot enem pol sinusnem valu, saj je $a > a_c$. Zato napetosti računamo po enačbi (A.4) (2.20), kjer majhne vrednosti b_1 močno povečajo kritično napetost $\sigma_{cr,sl}$ (ko se b_1 približuje vrednosti 0, narašča $\sigma_{cr,sl}$ proti neskončnosti) (Slika 36d).



Slika 36: Primerjava kritičnih napetosti izbočenja $\sigma_{cr,EN}$ in $\sigma_{cr}(EBPlate)$ v odvisnosti od lege ojačitve pri posameznih geometrijskih razmerjih a/h_w , za primer: $h_w=2000\text{mm}$, $h_w/t_w=200$, $A_s/A_w=0,1$, $A_f/A_w=0,75$; S355

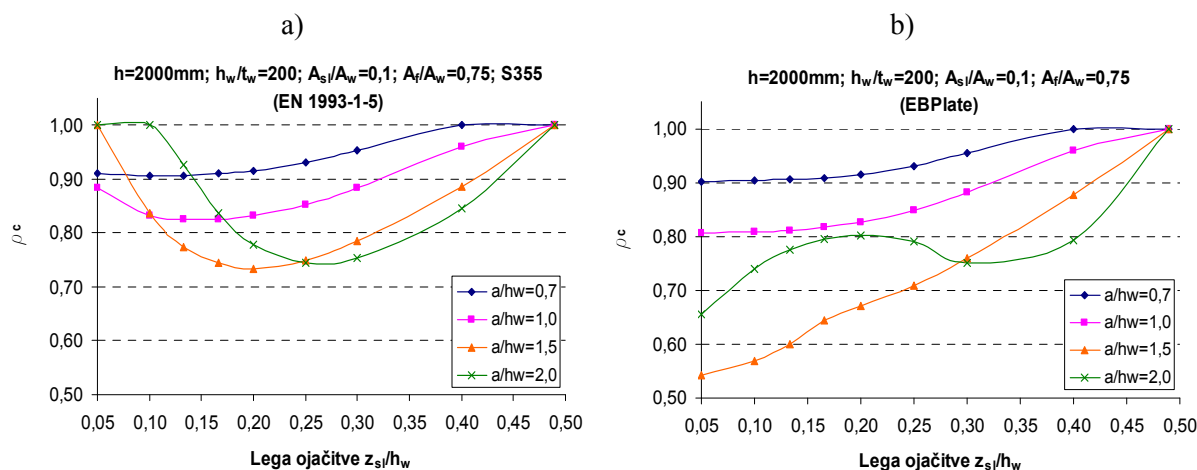
Analiza rezultatov za redukcijske koeficiente ρ_c pokaže, da ima velika razlika v vrednostih kritičnih napetosti pri razmerjih $\alpha=0,7$ in $1,0$ zelo majhen vpliv na razliko v vrednosti redukcijskih koeficientov ρ_c (Slika 37). Razlog za to je zopet v enačbi za račun koeficienta ρ_c , pri kateri je pomembna vrednost koeficienta ξ , ki je odvisen od razmerja $\frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}}$ in je navzdol in navzgor omejen z vrednostma 0 in 1. Za primer $\alpha=0,7$ ponovno velja izraz (4.8).

Ko se razlike med napetostmi $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ z razmerjem α večajo in je kritična napetost $\sigma_{cr,p}$ veliko večja od kritične napetosti $\sigma_{cr,c}$, kritične napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ pa še vedno manjše od napetosti $\sigma_{cr,c}$, so razlike med koeficienti največje (Slika 37). To je v primeru $\alpha=1,5$, ko velja:

$$\sigma_{cr,p} \gg \sigma_{cr,c} \Rightarrow \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} \gg 1 \Rightarrow \xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 > 1 \Rightarrow \xi = 1 \Rightarrow \rho_c = \rho \quad (4.9)$$

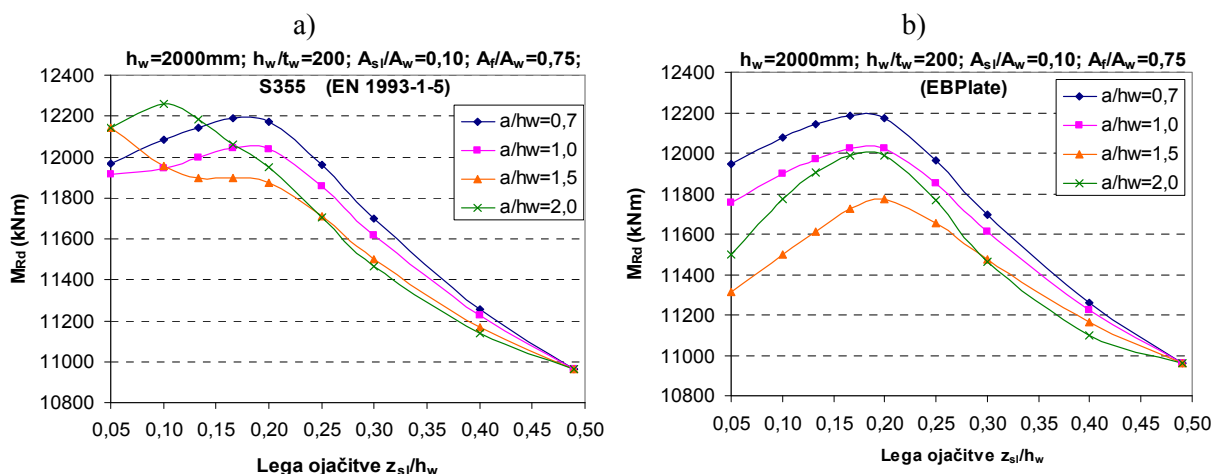
$$\sigma_{cr,EBPlate} < \sigma_{cr,c} \Rightarrow \frac{\sigma_{cr,EBPlate}}{\sigma_{cr,c}} < 1 \Rightarrow \xi = \frac{\sigma_{cr,EBPlate}}{\sigma_{cr,c}} - 1 < 1 \Rightarrow \xi = 0 \Rightarrow \rho_c = \chi_c$$

Pri razmerju $\alpha=2,0$ pa so kritične napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ večje od napetosti $\sigma_{cr,c}$, zato je tudi $\rho_{c(EBPlate)} > \chi_c$ in so razlike v redukcijskih koeficientih zopet manjše (Slika 37).



Slika 37: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w

Skladno z redukcijskimi koeficienti se spreminja tudi upogibna nosilnost I-profila (Slika 38). V obeh primerih je za razmerji $\alpha = 0,7$ in $1,0$ je najbolj učinkovita lega ojačitve pri $z_{sl}=0,2h_w$, ki poveča nosilnost profila za približno 10% v primerjavi z nosilnostjo neojačanega profila (ojačitev je na nevtralni osi, $z_{sl}=0,2h_w$) (glej Preglednica 8). Z večanjem razmerja α od $0,7$ do $1,5$ se nosilnost stojine manjša. Pri razmerju $2,0$ je nosilnost zopet večja. Rezultati obeh računov se najbolj razlikujejo pri $\alpha=1,5$ in $2,0$. Rezultati računa po standardu kažejo, da je za razmerji $\alpha = 1,5$ in $2,0$ najbolj učinkovita lega ojačitve tik ob pasnici ($z_{sl}/h_w = 0,05$ in $0,1$), medtem ko je pri rezultatih računa s programom EBPlate ta še vedno na petini višine stojine, pri $z_{sl}=0,2h_w$.



Slika 38: Primerjava upogibnih nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w

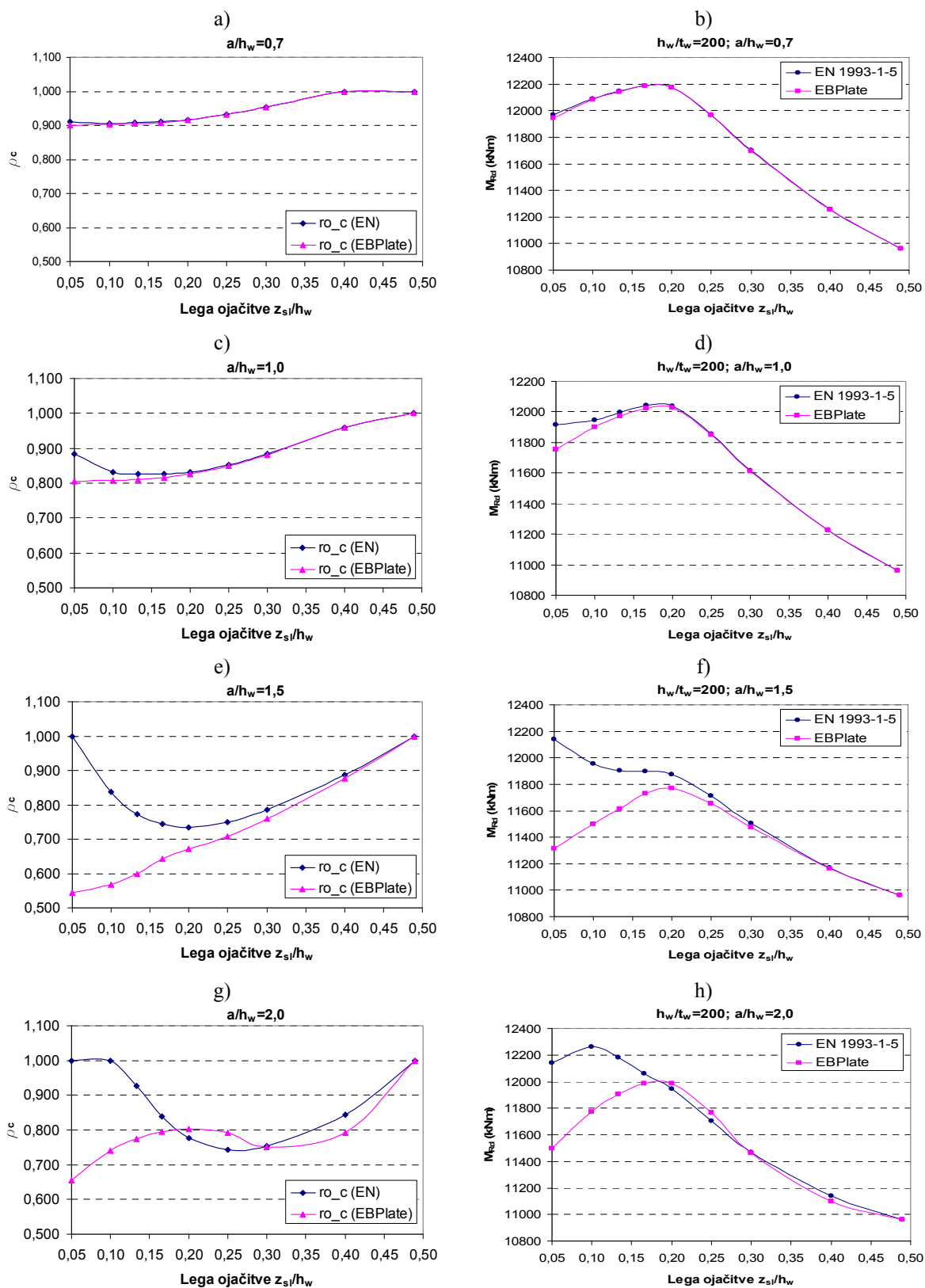
Razlike v nosilnosti med $M_{Rd}(EN)$ in $M_{Rd}(EBPlate)$ pri legah ojačitve $z_{sl}=0,05h_w$ in $z_{sl}=0,10h_w$ so prikazane v preglednici 7. Vrednosti, izračunane po standardu, so za vse vitkosti in razmerja α večje in s tem na nevarni strani. Največja odstopanja so pri velikem razmerju α . Če primerjamo odstotke povečanja nosilnosti pri najbolj učinkoviti legi ojačitve glede na nosilnost pri najmanj učinkoviti legi ojačitve na sredini višine stojine za različna razmerja α in vitkosti stojine h_w/t_w (Preglednica 8), vidimo, da je pri majhnih razmerjih α ($=0,7$ in $1,0$) ujemanje rezultatov zelo dobro. Povečanje nosilnosti je večje pri manjšem α ($=0,7$) in večjih vitkostih. Za manjše vitkosti ($h/t=150$ in 200) so odstopanja največja pri razmerju $=1,5$, za večje vitkosti pa pri razmerju $\alpha=2,0$, kjer je povečanje nosilnosti večje pri računu po standardu (nevarna stran).

Preglednica 7: Razlike v nosilnosti med $M_{Rd}(EN)$ in $M_{Rd}(EBPlate)$ glede na vrednosti $M_{Rd}(EBPlate)$ pri legah ojačitve $z_{sl}=0,05h_w$ in $z_{sl}=0,10h_w$

h_w/t_w	[%]		MRd(EN) - MRd(EBPlate)			
	z_{sl}/h	a/h_w	0,7	1,0	1,5	2,0
150	0,05		0,19	1,7	6,7	1,5
	0,10		0,05	0,4	4,4	1,4
200	0,05		0,18	1,3	6,8	5,3
	0,10		0,05	0,4	3,8	4,0
250	0,05		0,16	1,2	7,0	9,3
	0,10		0,04	0,3	3,4	7,7
300	0,05		0,15	1,1	7,0	10,4
	0,10		0,04	0,3	3,2	8,2
400	0,05		0,14	1,0	6,7	10,7
	0,10		0,04	0,3	2,5	6,7

Preglednica 8: Povečanje upogibne nosilnosti pri najbolj učinkoviti legi ojačitve glede na nosilnost pri najmanj učinkoviti legi ojačitve na sredini višine stojine za različna razmerja $\alpha=a/h_w$ in vitkosti stojine h_w/t_w (ena vzdolžna ojačitev)

	[%]	EN 1993 - 1 - 5				EBPlate			
		a/h_w	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5
h_w/t_w	150	9,4	8,3	9,8	10,4	9,4	8,1	6,4	9,3
	200	11,2	9,9	10,8	11,9	11,2	9,7	7,4	9,4
	250	11,7	10,2	11,5	12,6	11,7	10,0	7,2	7,2
	300	11,8	10,2	11,7	12,1	11,8	10,0	6,7	5,6
	400	11,6	9,8	11,5	12,9	11,6	9,5	6,1	3,4

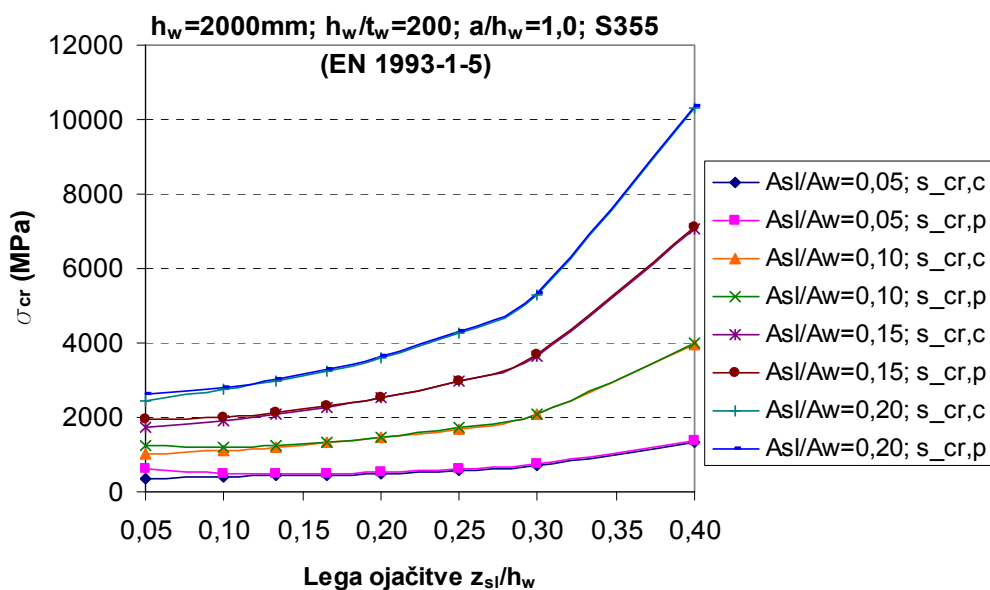


Slika 39: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c in upogibnih nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja α

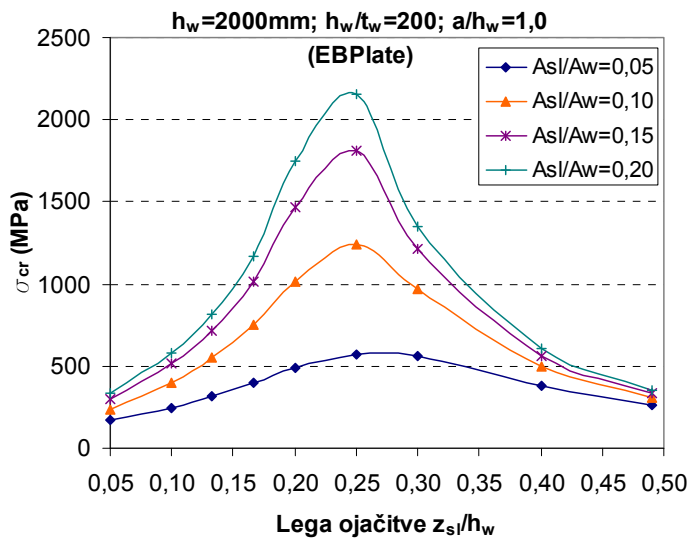
4.2.1.3 Vpliv površine prečnega prereza ojačitve A_{sl}/A_w

Z večanjem razmerja med površino ojačitve in stojine kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$, izračunane po standardu, enakomerno naraščajo (Slika 40 in Slika 42). Kritične napetosti izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ so vedno malo večje od kritičnih napetosti uklona ojačitve. Razlika med njimi se poveča z zmanjšanjem razmerja prerezov A_{sl}/A_w ter s približevanjem ojačitve pasnici (Slika 43). Ko je ojačitev zelo blizu pasnice in je razmerje A_{sl}/A_w zelo majhno, pride do izbočenja z več pol sinusnimi valovi ($a_c < a$), zaradi majhnega b_l v enačbi (2.20) pa so napetosti zelo velike. V tem območju lege ojačitve ($z_{sl}/h_w = 0,05$ do $0,10$) so tudi največja odstopanja redukcijskih koeficientov in upogibnih nosilnosti, izračunanih s pomočjo kritičnih napetosti, ki smo jih dobili s programom EBPlate (Slika 44). Razlog je enak kot pri spreminjanju parametra α , torej v zgornjih enačbah (4.8) in (4.9).

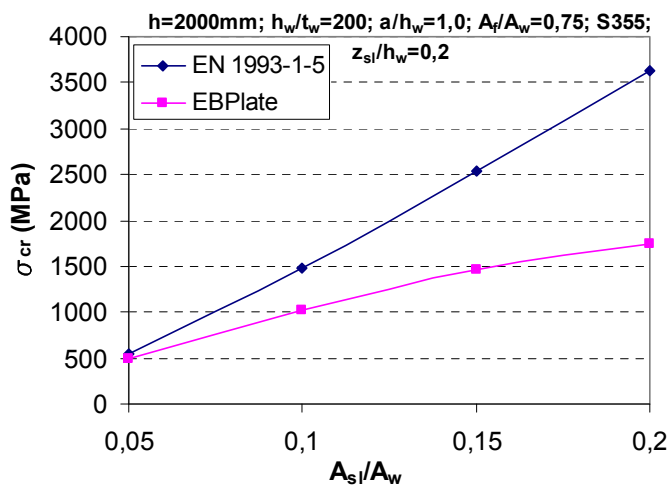
Tudi kritične napetosti, izračunane s programom EBPlate, se povečujejo z večanjem razmerja površin A_{sl}/A_w , vendar njihov prirastek z večanjem razmerja A_{sl}/A_w pada (Slika 41 in Slika 42). Kritične napetosti so največje pri legi ojačitve na četrtini višine stojine, $z_{sl} = 0,25h_w$.



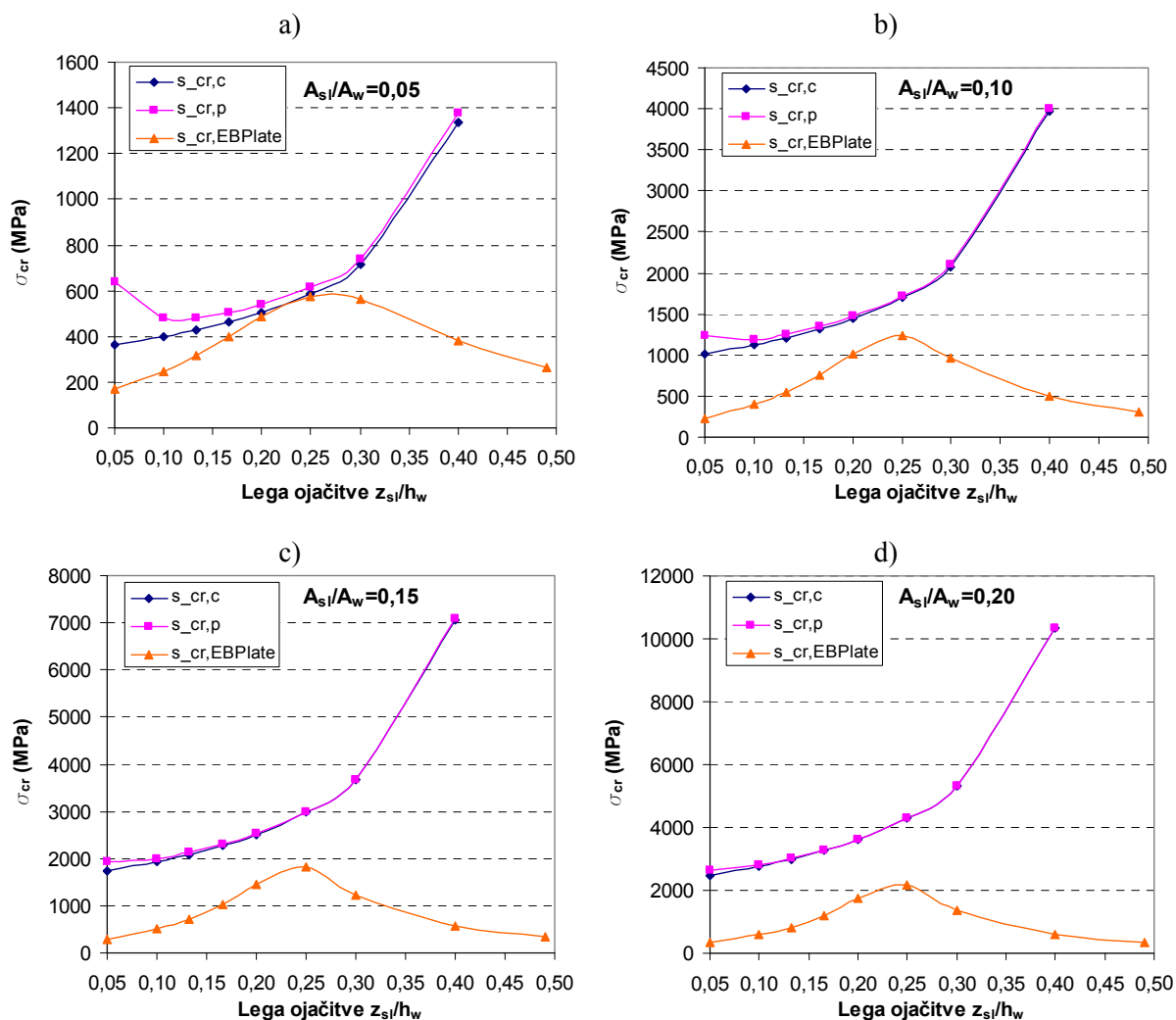
Slika 40: Kritične napetosti $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,p}$ v odvisnosti od lege ojačitve za različna razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w



Slika 41: Kritične napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ (desno) v odvisnosti od lege ojačitve za različna razmerja površin prerezov A_{si}/A_w

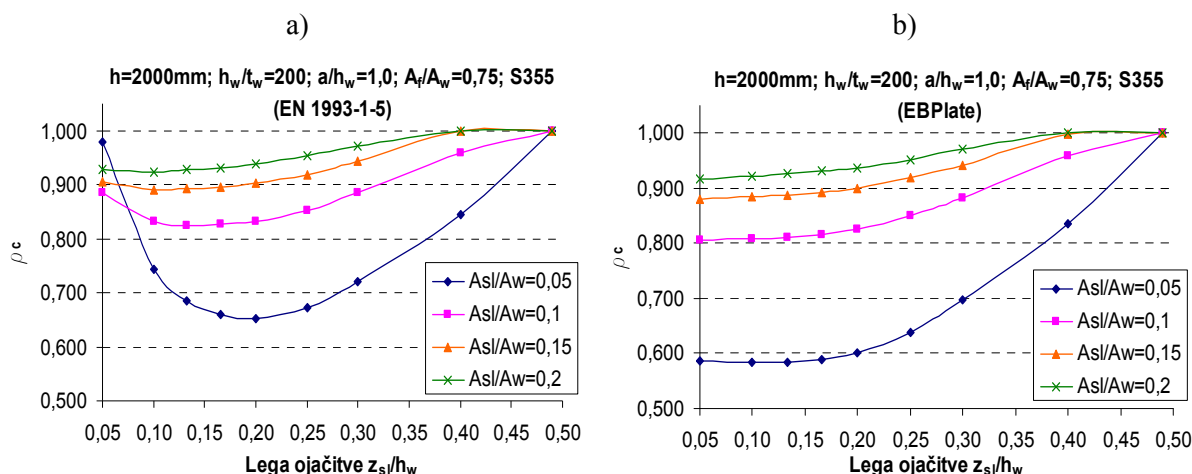


Slika 42: Primerjava $\sigma_{cr,p}$ ter $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od razmerja površin prerezov A_{si}/A_w



Slika 43: Primerjava kritičnih napetosti $\sigma_{cr,c}$, $\sigma_{cr,p}$ ter $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od lege ojačitve pri posameznih razmerjih površin prečnih prerezov A_{sl}/A_w

Vrednosti redukcijskih koeficientov se z zmanjševanjem razmerja A_{sl}/A_w zmanjšujejo. Zmanjšanje je največje pri spremembi razmerja z $A_{sl}/A_w = 0,1$ na $A_{sl}/A_w = 0,05$, kjer je najmanjša vrednost, izračunana po standardu, enaka $\rho_c = 0,65$ pri legi ojačitve $z_{sl} = 0,20h_w$ in najmanjša vrednost, izračunana s pomočjo programa EBPlate, enaka $\rho_c = 0,58$ pri legah ojačitve v bližini pasnice, to je pri $z_{sl} = 0,05$ do $1,66h_w$ (Slika 44).

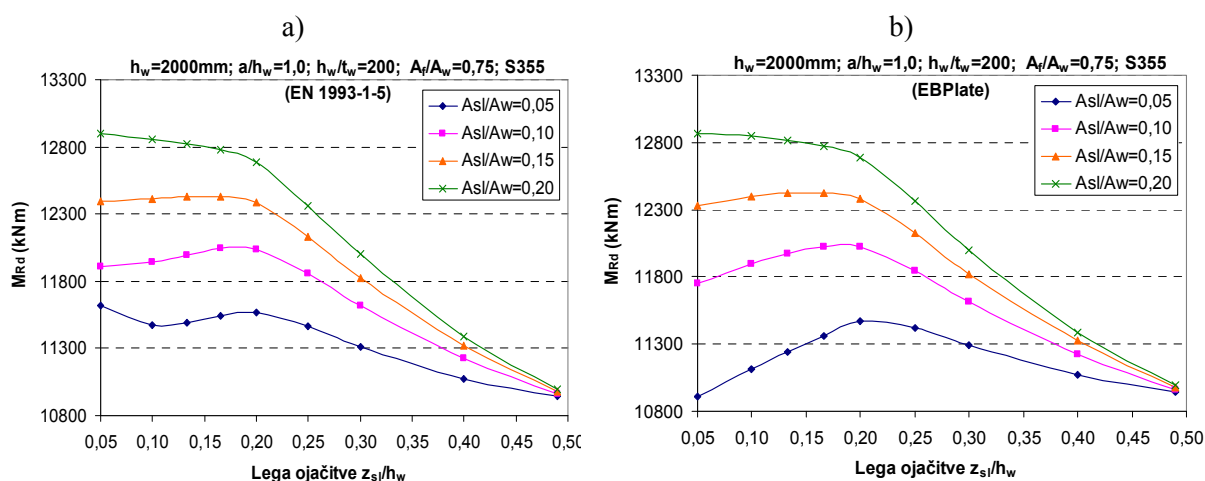


Slika 44: Primerjava koeficientov ρ_c v odvisnosti od lege ojačitve za različna razmerja prerezov A_{sl}/A_w

Skladno s spremembo redukcijskih koeficientov se spreminja tudi upogibna nosilnost (Slika 41). Najbolj učinkovita lega ojačitve je pri večjih razmerjih A_{sl}/A_w ($=0,15$ in $0,2$), v območju blizu pasnice ($z_{sl}=0,05$ do $1,66h_w$), kjer se nosilnost poveča za približno 18% pri $A_{sl}/A_w=0,20$ in za 14% pri $A_{sl}/A_w=0,15$. Za razmerje $A_{sl}/A_w=0,10$ je najbolj učinkovita lega ojačitve pri $z_{sl}\approx 0,166 h_w$ v obeh načinih računa. Tu se nosilnost poveča za približno 10%. Za $A_{sl}/A_w=0,05$ je najbolj učinkovita lega ojačitve v primeru računa po standardu tik ob pasnici, pri $z_{sl}\approx 0,05h_w$, čeprav se z oddaljevanjem ojačitve do lege $z_{sl}=0,20h_w$ upogibna nosilnost le malo zmanjša. V primeru računa s pomočjo programa EBPlate pa je najbolj učinkovita lega ojačitve veliko bolj izrazita, in sicer pri $z_{sl}=0,20h_w$. Nosilnost se tu poveča le za približno 5%. Upogibna nosilnost je pri vseh razmerjih A_{sl}/A_w malo večja, če jo računamo po standardu (nevarna stran), vendar so razlike zelo majhne (Preglednici 9 in 10).

Tabela 9: Razlike v nosilnosti med $M_{Rd}(EN)$ in $M_{Rd}(EBPlate)$ glede na $M_{Rd}(EN)$ pri legah ojačitve $z_{sl}=0,05h_w$ in $z_{sl}=0,10h_w$

h_w/t_w	[%]		$M_{Rd}(EN) - M_{Rd}(EBPlate)$			
	z_{sl}/h	A_{sl}/A_w	0,05	0,10	0,15	0,20
150	0,05		6,7	1,67	0,54	0,26
	0,10		3,9	0,42	0,14	0,06
200	0,05		6,2	1,34	0,52	0,26
	0,10		3,2	0,38	0,13	0,06
250	0,05		5,5	1,22	0,49	0,25
	0,10		2,6	0,35	0,13	0,06
300	0,05		5,0	1,13	0,47	0,25
	0,10		2,2	0,32	0,12	0,06
400	0,05		4,2	0,99	0,42	0,23
	0,10		1,4	0,27	0,11	0,06



Slika 41: Primerjava upogibnih nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitve za različna razmerja površin prečnih prerezov A_{sl}/A_w

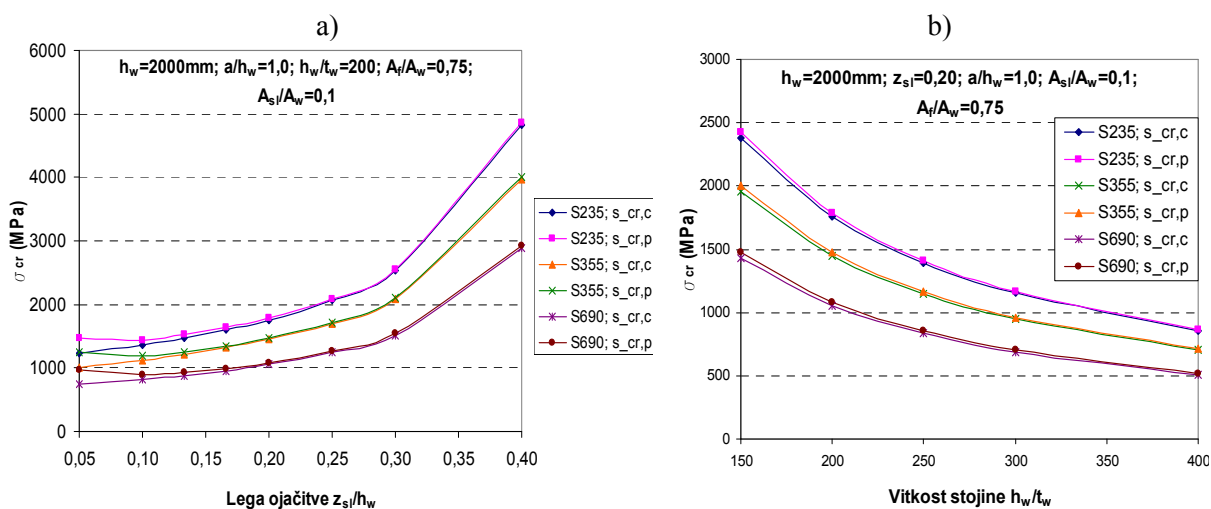
Iz tabele 10 vidimo, da je odstotek povečanja upogibne nosilnosti M_{Rd} glede na nosilnost pri najmanj učinkoviti legi ojačitve na sredini višine stojine najmanjši pri majhni vitkosti stojine $h_w/t_w=150$ in majhnem razmerju A_{sl}/A_w . in se z večanjem vitkosti do $h_w/t_w=300$ rahlo povečuje. Največja odstopanja med rezultati obeh načinov računa so pri majhnem razmerju $A_{sl}/A_w=0,05$ in znašajo približno 2%.

Preglednica 10: Povečanje upogibne nosilnosti pri najbolj učinkoviti legi ojačitve glede na nosilnost pri najmanj učinkoviti legi ojačitve na sredini višine stojine za različna razmerja A_{s1}/A_w in vitkosti stojine h_w/t_w (ena vzdolžna ojačitev)

	[%]	EN 1993 - 1 - 5				EBPlate			
	A_{s1}/A_w	0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
h_w/t_w	150	5,7	8,3	12,3	16,5	4,0	8,1	11,8	16,2
	200	6,2	9,9	13,2	17,3	4,8	9,7	13,2	17,0
	250	6,3	10,2	14,1	17,8	4,5	10,0	14,0	17,7
	300	6,2	10,2	14,3	18,1	4,3	10,0	14,1	18,2
	400	6,0	9,8	14,2	18,3	3,8	9,5	14,1	18,2

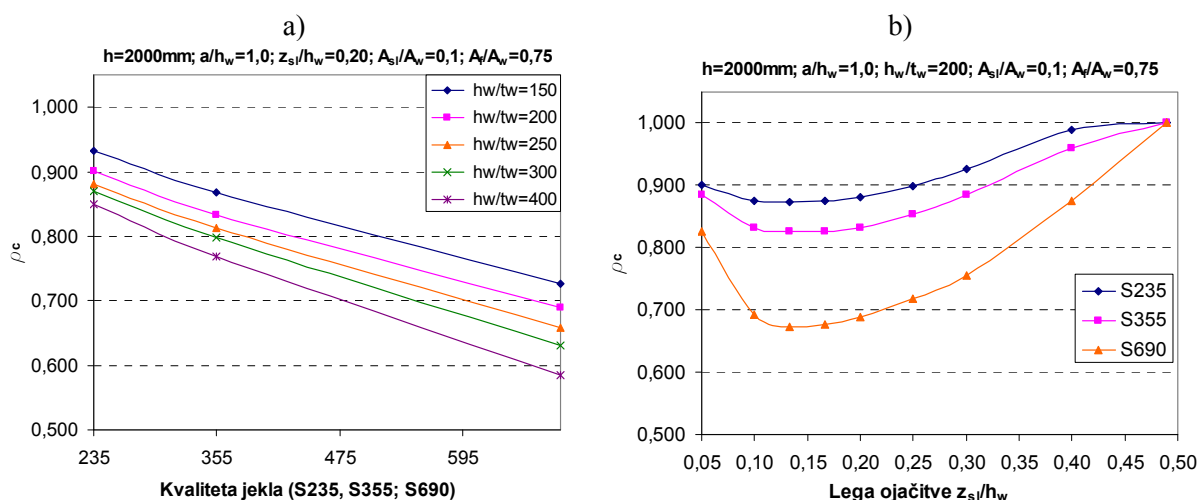
4.2.1.4 Vpliv kvalitete jekla (S235, S355, S690)

Z večanjem trdnosti jekla se elastične kritične napetosti izbočenja zmanjšujejo, saj se relativna vitkost $\bar{\lambda}_p$ pločevine povečuje (enačba 4.3, EN 1993-1-5) (Slika 45).



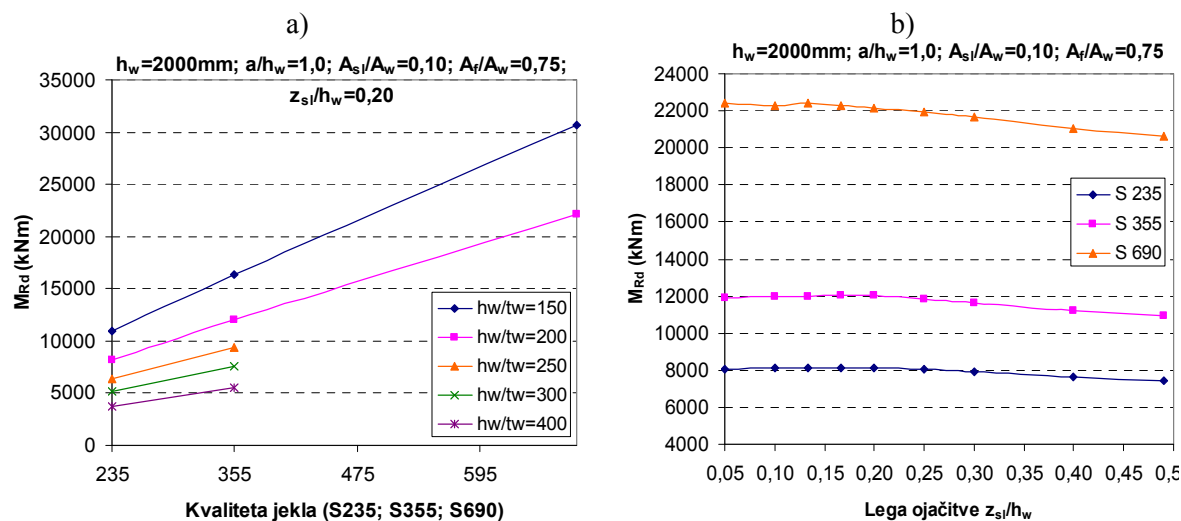
Slika 45: Kritične napetosti $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,p}$ v odvisnosti od: a) lege ojačitve; b) vitkosti stojine, za različne kvalitete jekla (S235, S355 in S690)

Redukcijski koeficienti ρ_c se z večanjem kvalitete jekla linearno zmanjšujejo (Slika 46a). Odvisnosti redukcijskih koeficientov od lege ojačitve so si za posamezne kvalitete jekla podobne. Najmanjše vrednosti ρ_c so pri legi ojačitve $z_{s1} \approx 0,133h_w$ (Slika 46b).



Slika 46: Redukcijski koeficienti ρ_c v odvisnosti od: a) kvalitete jekla (S235, S355 in S690) za $z_{sl}=0,20h_w$; b) lege ojačitve za različne kvalitete jekla

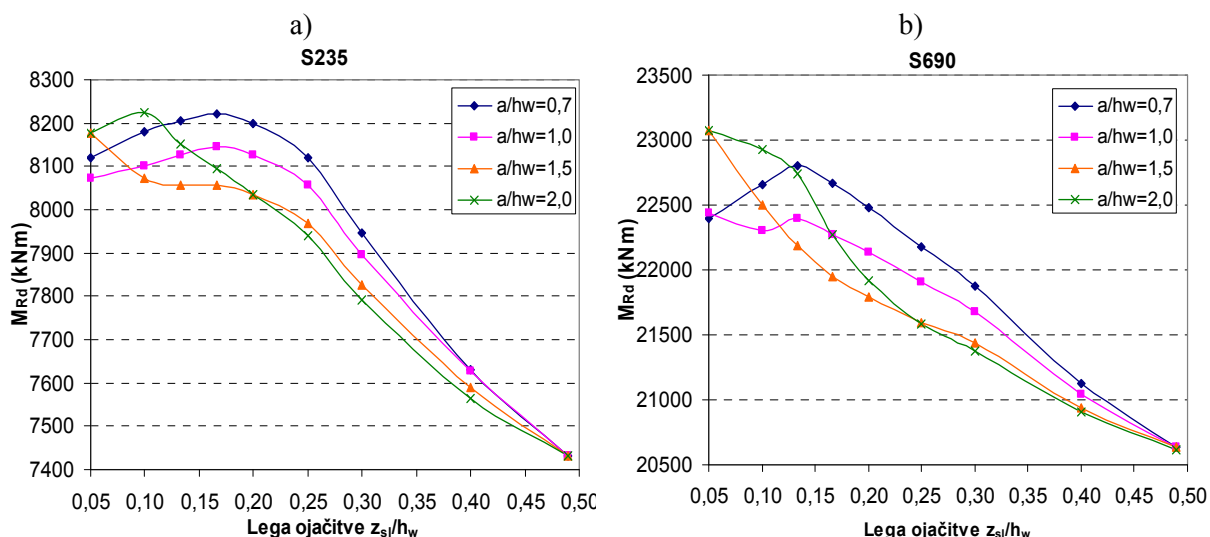
Čeprav so redukcijski koeficienti pri jeklih visokih trdnosti bistveno nižji kot pri jeklih nizkih trdnosti, končna nosilnost prečnih prerezov z večanjem trdnosti jekla linearno narašča, saj pri upogibu velik del obtežbe prevzamejo pasnice (polni prerezi) (Slika 47). Vendar pa se z večanjem vitkosti pločevine vpliv kvalitete jekla na nosilnost prereza zmanjšuje (Slika 47). Opomba: Pri zelo velikih vitkosti stojine $h_w/t_w = 250, 300, 400$ in jeklu visoke trdnosti S690 pride do izbočenja stojine zaradi vpliva pasnice, zato v teh primerih nosilnosti nismo računali (glej (4.3)).



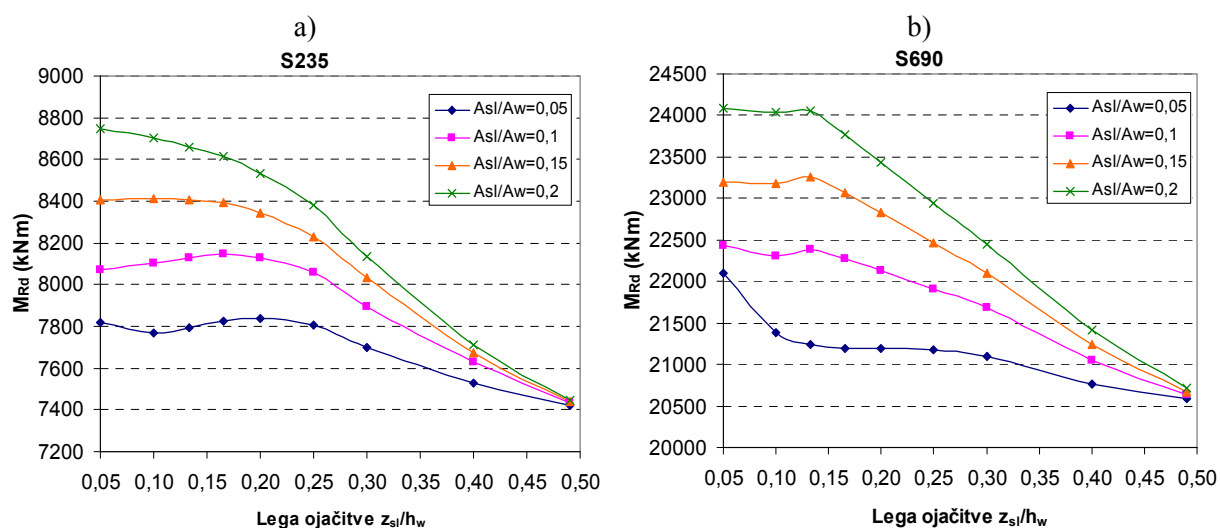
Slika 47: Upogibna nosilnost M_{Rd} v odvisnosti od: a) kvalitete jekla za različne vitkosti stojine, b) lege ojačitve za različne kvalitete jekla (S235, S355 in S690)

Če primerjamo vpliv spremembe parametra α pri jeklih nizke in visoke trdnosti, S235 in S690, vidimo, da je v obeh primerih podoben, z razliko, da se najbolj učinkovita lega ojačitve pri jeklu S690 premakne bližje pasnici (Slika 48).

Tudi vpliv parametra A_{sl}/A_w je pri obeh kvalitetah jekla podoben ((Slika 49).



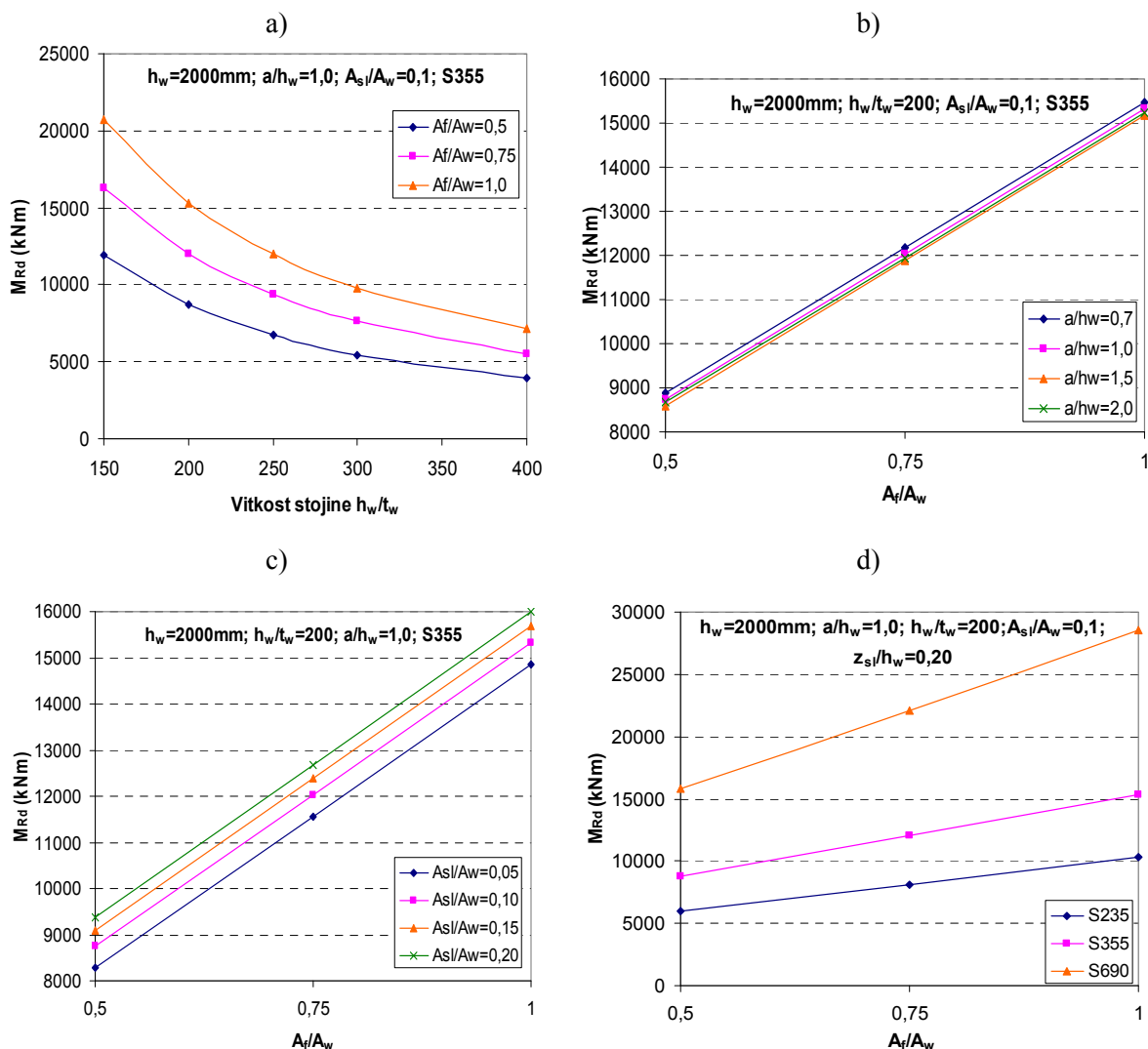
Slika 48: Vpliv parametra α na upogibno nosilnost M_{Rd} pri jeklu kvalitete a) S235 in b) S355 za primer: $h_w=2000\text{mm}$, $h_w/t_w=200$, $A_{sl}/A_w=0,1$, $A_f/A_w=0,75$



Slika 49: Vpliv parametra A_{sl}/A_w na upogibno nosilnost M_{Rd} pri jeklu kvalitete a) S235 in b) S355 za primer: $h_w=2000\text{mm}$, $h_w/t_w=200$, $A_{sl}/A_w=0,1$, $A_f/A_w=0,75$

4.2.1.5 Vpliv površine prereza pasnice A_f/A_w

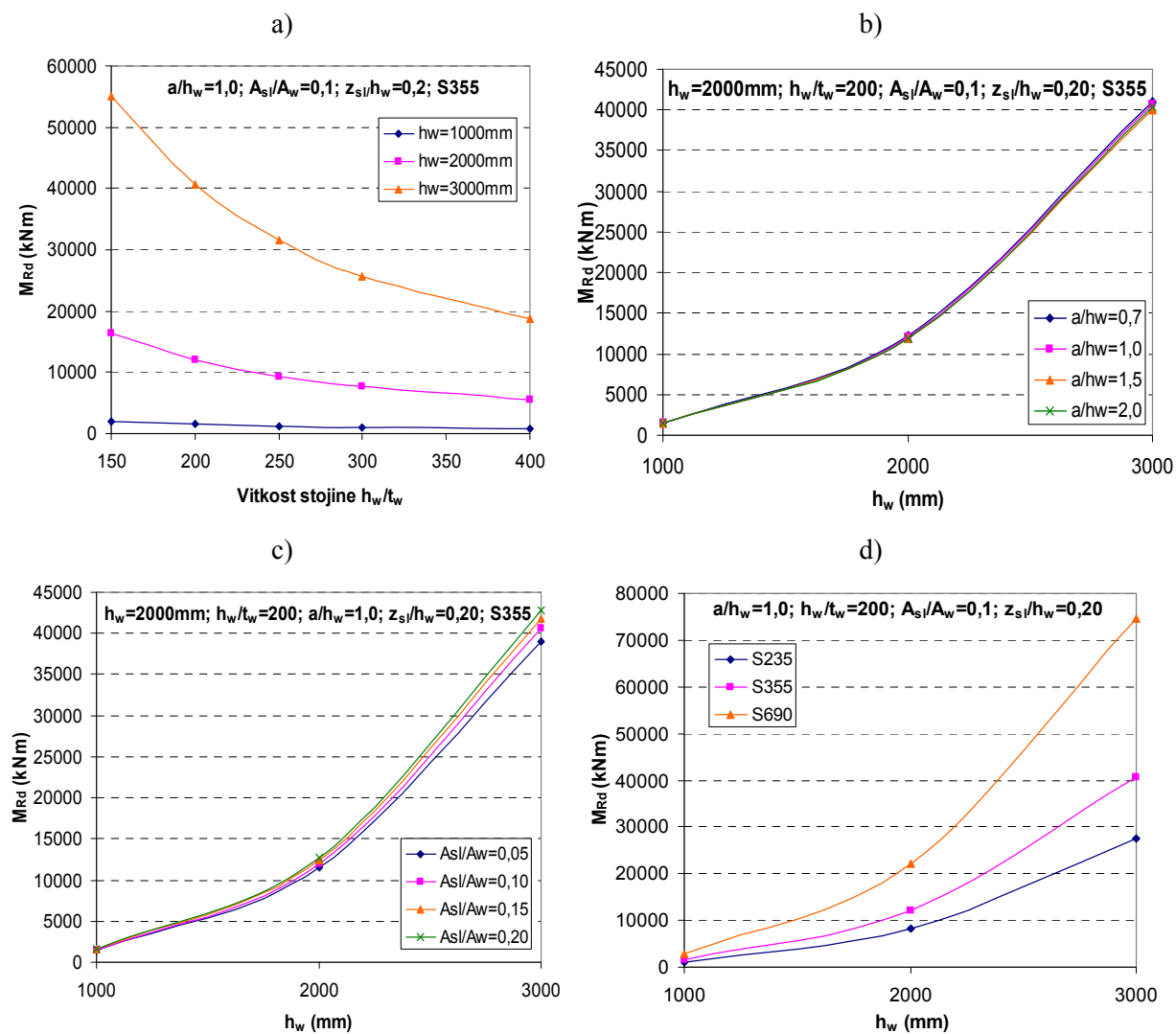
Pasnice I-profilov vplivajo le na upogibno nosilnost, saj pri računu kritičnih napetosti stojine nismo upoštevali vpetja vzdolžnih robov zaradi stika s pasnico. Nosilnost tako z večanjem razmerja površin prečnih prerezov med pasnico in stojino A_f/A_w linearno narašča za vse vitkosti h_w/t_w , geometrijska razmerja α , razmerja prerezov A_{s1}/A_w in trdnosti jekla (Slika 50).



Slika 50: a) Upogibna nosilnost prečnega prereza v odvisnosti od vitkosti stojine za različna razmerja A_f/A_w ; b) Upogibna nosilnost prečnega prereza v odvisnosti od razmerja A_f/A_w za: b) različna geometrijska razmerja α ; c) različna razmerja površin prerezov A_{s1}/A_w ; d) različne kvalitete jekla

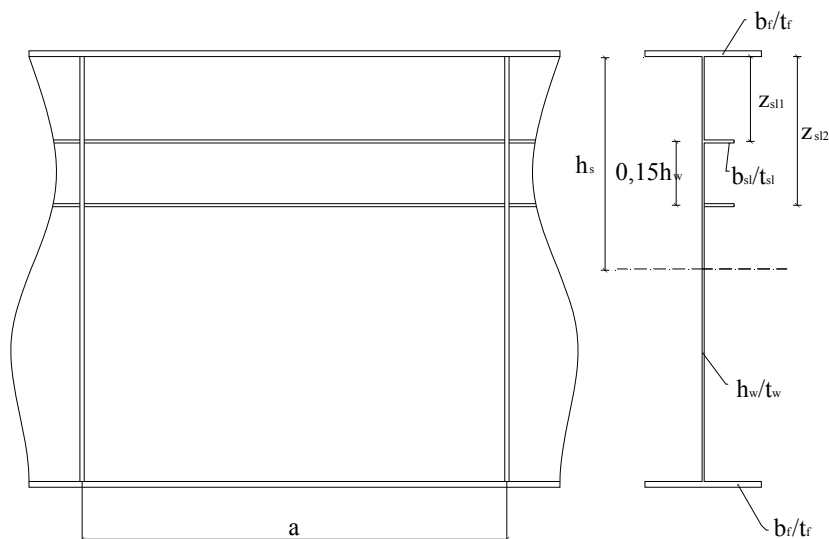
4.2.1.6 Vpliv višine stojine h_w

Z večanjem višine stojine se upogibna nosilnost strmo povečuje. Pri tem se vplivi parametrov bistveno ne spreminjajo.



Slika 51: a) Upogibna nosilnost prečnega prereza v odvisnosti od vitkosti stojine za različne višine stojin h_w ; upogibna nosilnost prečnega prereza v odvisnosti od višine stojine h_w za: b) različna razmerja ; c) različna razmerja prerezov in d) različne kvalitete jekla

4.2.2 I-profil z dvema vzdolžnima ojačitvama – čisti upogib

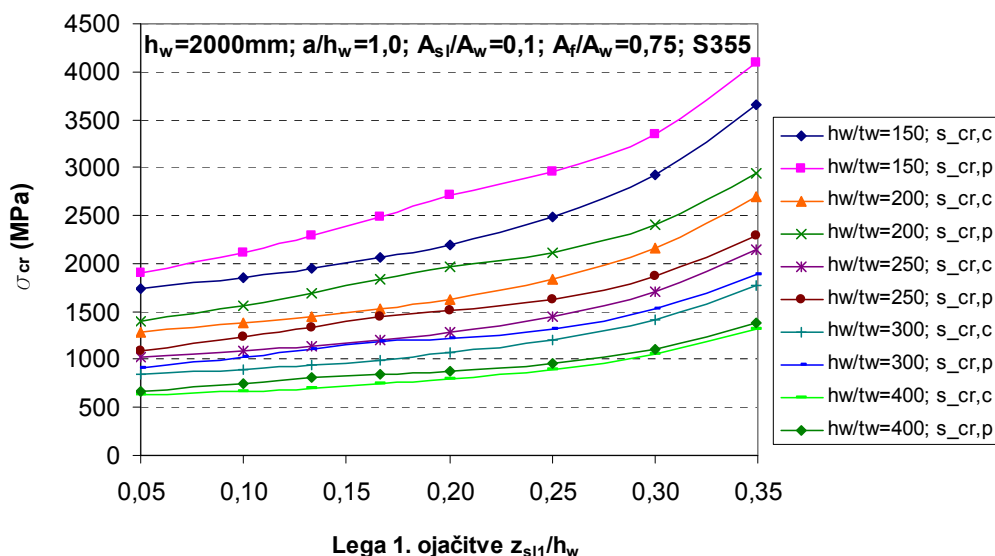


Slika 52: Parametri pri primeru dveh vzdolžnih ojačitev

Lege ojačitev smo spreminjali tako, da smo ohranili enak razmak med ojačitvama, ki znaša $0,15 h_w$. Vrednosti ostalih parametrov so podane v Preglednica 6.

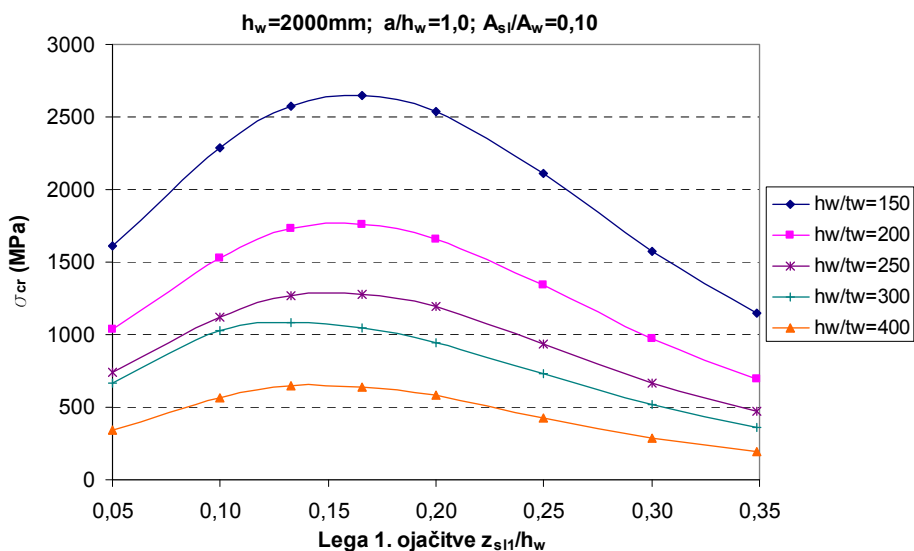
4.2.2.1 Vpliv vitkosti stojine nosilca h_w/t_w

V primeru upogibno obremenjenega I-profila, ki je ojačan z dvema vzdolžnima ojačitvama, se kritične napetosti izbočenja z večanjem vitkosti pločevine zmanjšujejo. Ko se ojačitvi približujeta sredini stojine se kritične napetosti povečujejo, vendar ne tako strmo kot v primeru ene ojačitve (Slika 53). V računu kritičnih napetosti izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ z računskim modelom ojačitve in pripadajoče pločevine, podprte z elastično podlago, je namreč merodajna najnižja od treh izračunanih napetosti za prvo ojačitev, drugo ojačitev in namišljeno skupno ojačitev (2.28). Razlika med kritično napetostjo izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ in uklonske izbočenja $\sigma_{cr,c}$ je v primeru dveh ojačitev večja.



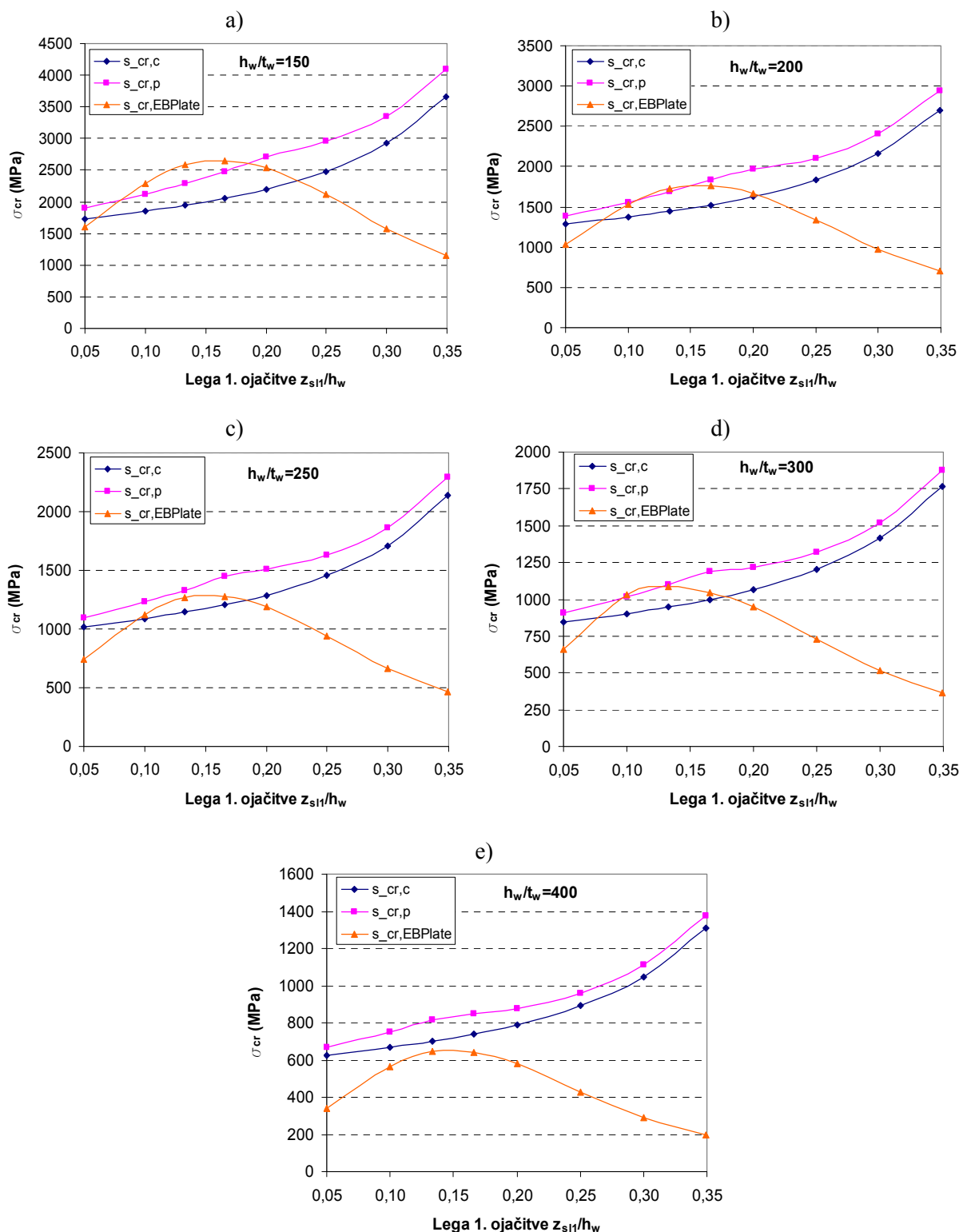
Slika 53: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od lege ojačitev za različne vitkosti stojine h_w/t_w (račun po standardu EN 1993-1-5)

Tudi rezultati računa s programom EBPlate kažejo, da je krivulja odvisnosti kritičnih napetosti od lege obeh ojačitev bolj položna kot pri eni ojačivi. Najvišje kritične napetosti so pri legi prve ojačitve od $z_{sl,1}=0,133$ do $0,166h_w$, ko je prijemališče rezultante sil v obeh ojačitvah na razdalji $z_{sl,skupna} \approx 0,20h_w$ (Slika 54).

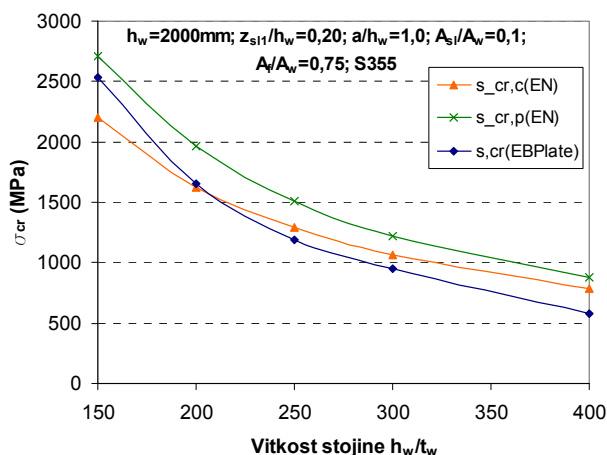


Slika 54: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od lege ojačitev za različne vitkosti stojine h_w/t_w (račun s programom EBPlate)

Pri primerjavi rezultatov obeh načinov računa za posamezne vitkosti stojine h_w/t_w vidimo, da so odstopanja največja, ko sta ojačitvi blizu sredine stojine. Razlog je zopet v večanju kritičnih napetosti $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ pri računu po standardu zaradi ekstrapolacije kritičnih napetosti $\sigma_{cr,sl}$ na rob stojine. Ko sta ojačitvi blizu pasnice, so odstopanja manjša. Rezultati se najbolj ujemajo pri legi prve ojačitve v območju $z_{sl,1}=0,10$ do $0,166h_w$ in pri vitkosti $h_w/t_w=150$ in 200 . Z večanjem vitkosti stojine se odstopanja povečujejo (Slika 55).



Slika 55: Primerjava kritičnih napetosti izbočenja σ_{cr} , v odvisnosti od lege ojačitve pri posameznih vitkosti stojine h_w/t_w , za primer: $h_w=2000\text{mm}$, $a/h_w=1,0$, $A_{s1}/A_w=0,1$, $A_f/A_w=0,75$; S355



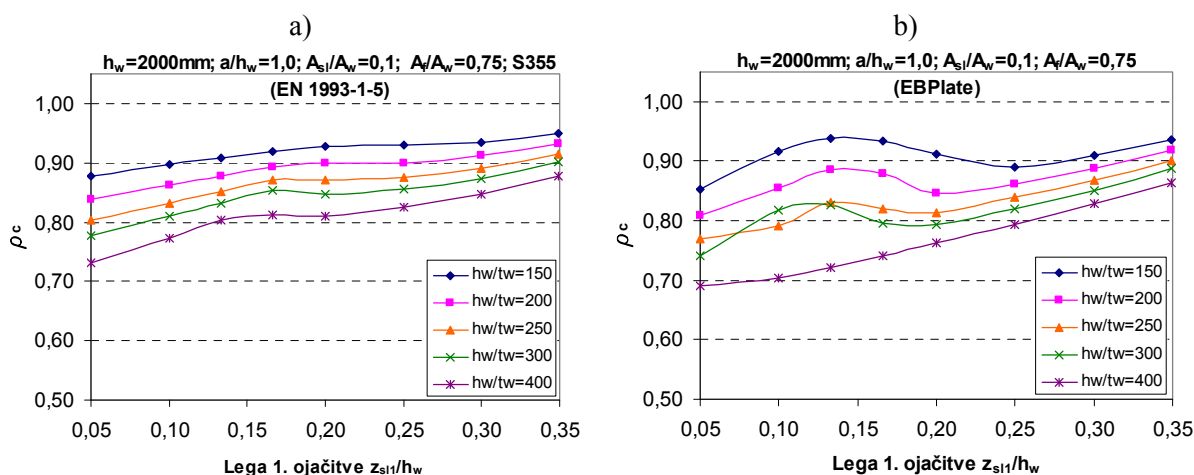
Slika 56: Primerjava kritičnih napetosti izbočenja σ_{cr} , v odvisnosti vitkosti stojine h_w/t_w ,

Redukcijski koeficienti, izračunani s pomočjo programa EBPlate so v glavnem manjši od tistih, izračunanih po standardu (Slika 57). Skladno z vrednostmi kritičnih napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ in $\sigma_{cr,p}$ so razlike najmanjše pri manjših vitkosti stojine $h_w/t_w = 150$ in 200 , ter pri legi ojačitev od $z_{sl,1} = 0,10$ do $0,166h_w$ (Slika 57).

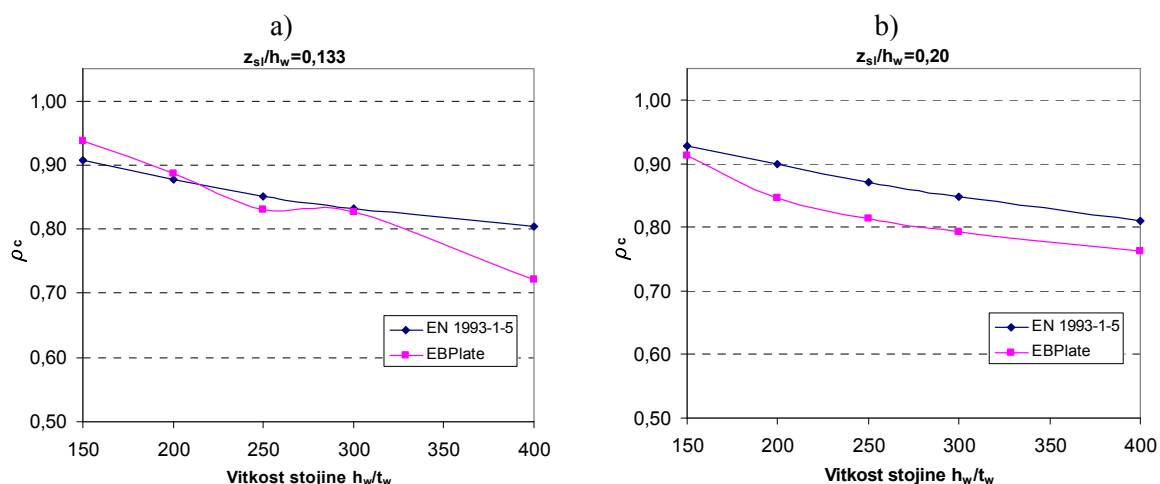
V enačbi (4.13) standarda EN1993-1-5 velja za skrajni legi, ko je prva ojačitev je tik ob pasnici ($z_{sl,1} = 0,05 h_w$) in ko sta ojačitvi blizu sredine stojine ($z_{sl,1} = 0,25$ do $0,35 h_w$):

$$\sigma_{cr,p} > \sigma_{cr,c} \Rightarrow \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} > 1 \Rightarrow \xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 > 0 \Rightarrow \rho_c > \chi_c \quad (4.10)$$

$$\sigma_{cr,EBPlate} < \sigma_{cr,c} \Rightarrow \frac{\sigma_{cr,EBPlate}}{\sigma_{cr,c}} < 1 \Rightarrow \xi = \frac{\sigma_{cr,EBPlate}}{\sigma_{cr,c}} - 1 < 0 \Rightarrow \xi = 0 \Rightarrow \rho_c = \chi_c$$



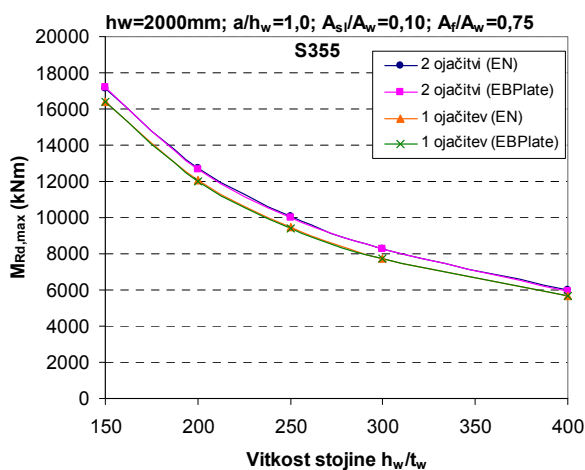
Slika 57: Primerjava koeficientov ρ_c v odvisnosti od lege ojačitve za različne vitkosti stojine h_w/t_w



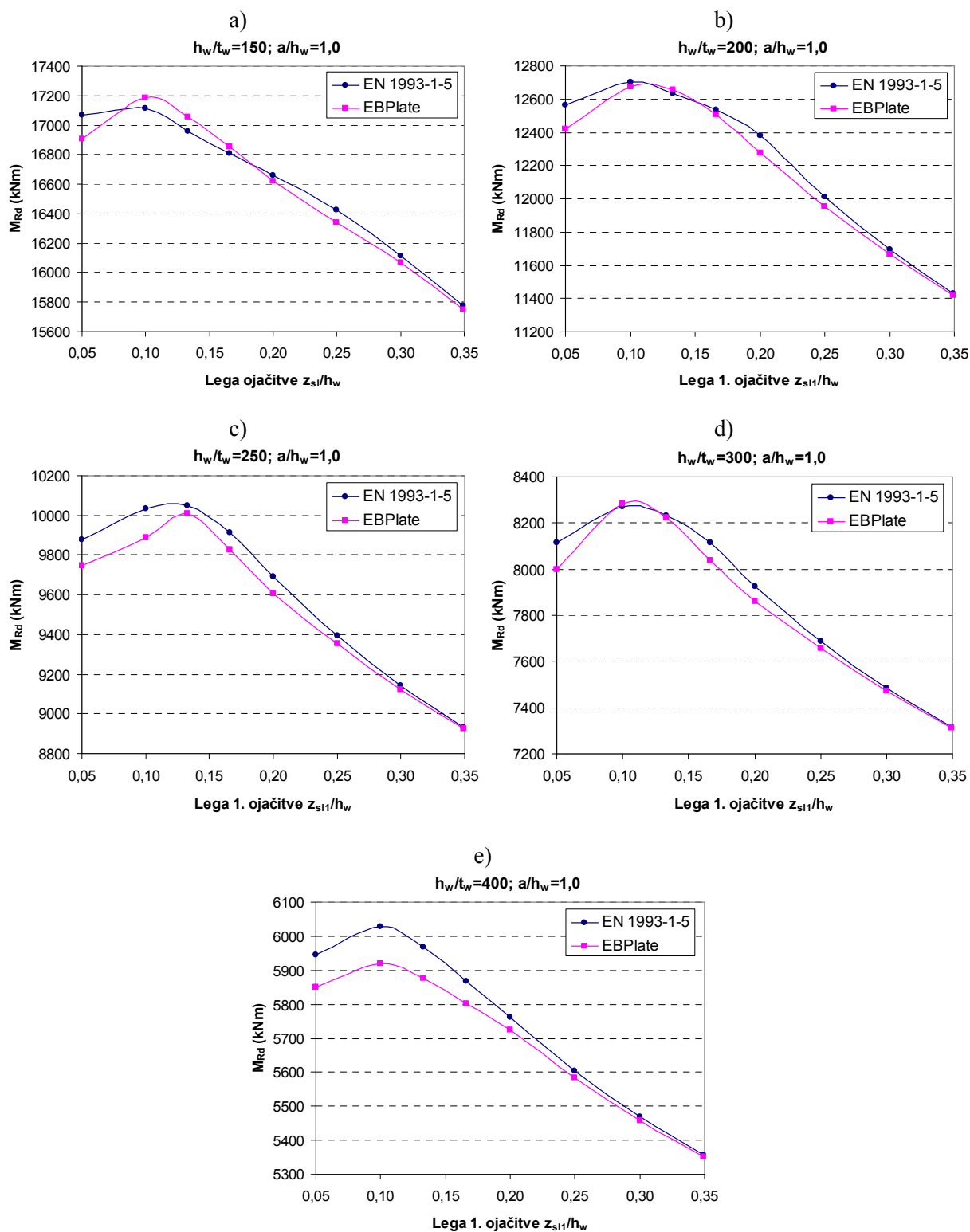
Slika 58: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c v odvisnosti vitkosti stojine h_w/t_w za legi ojačitev

$$z_{sl}/h_w=0,133 \text{ in } z_{sl}/h_w=0,20$$

Upogibna nosilnost se z večanjem vitkosti zmanjšuje podobno kot v primeru ene vzdolžne ojačitve (Slika 59). Oba načina računa dasta podobne rezultate. Največje razlike so pri legi ojačitev, ki je najbližje pasnici $z_{sl}=0,05h_w$ in pri vitkosti stojine $h_w/t_w = 400$ (Slika 60). Najbolj učinkovita lega ojačitev je na razdalji $z_{sl,1}=0,10h_w$, kar poveča upogibno nosilnost za od 14% ($h_w/t_w = 150$) do 17%.



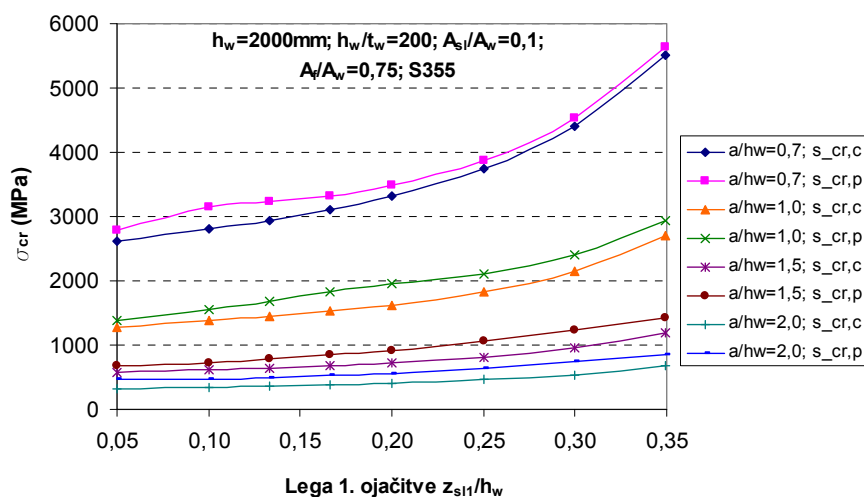
Slika 59: Maksimalna upogibna nosilnost $M_{Rd,max}$ I-profila z eno in dvema vzdolžnima ojačitvama v odvisnosti od vitkosti stojine



Slika 60: Primerjava upogibne nosilnosti M_{Rd} I-profila z dvema vzdolžnima ojačitvama v odvisnosti od lege ojačitev

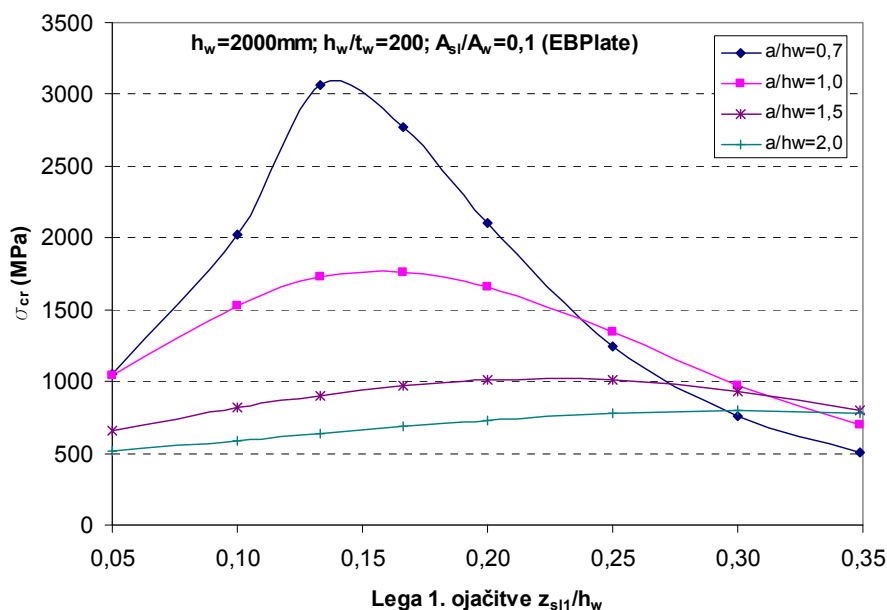
4.2.2.2 Vpliv razmerja med dolžino in višino panela $\alpha=a/h_w$

Z večanjem geometrijskega razmerja α se kritične napetosti zmanjšujejo (Slika 61). Pri tem se oblika krivulje, ki opisuje odvisnost napetosti od lege ojačitev ne spreminja. Spreminja pa se razlika med kritično napetostjo izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ in kritično napetostjo uklona $\sigma_{cr,c}$, ki je z večanjem razmerja α vedno večja (pri tem je $\sigma_{cr,p} > \sigma_{cr,c}$) (Slika 61).

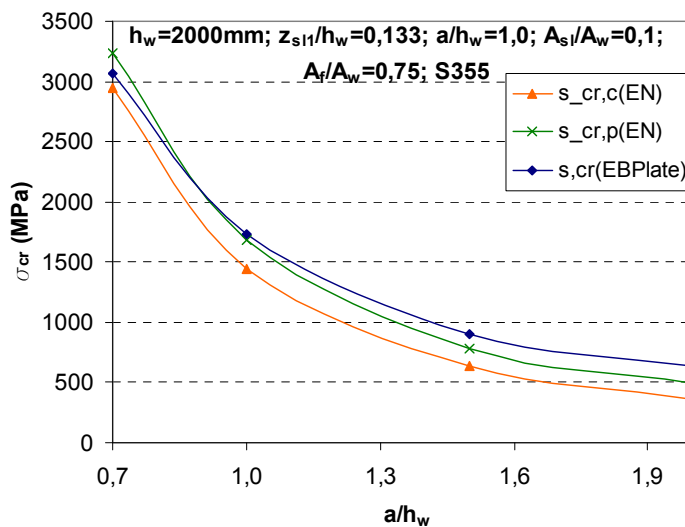


Slika 61: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od lege ojačitev za različna geometrijska razmerja a/h_w (račun po standardu)

Rezultati računa kritičnih napetosti s programom EBPlate kažejo, da so spremembe kritičnih napetosti zaradi spreminjanja lege ojačitev veliko večje pri majhnih razmerjih α (Slika 62). Lega, kjer je vrednost kritičnih napetosti največja, se z večanjem razmerja α pomika proti sredini višine stojine. Z večanjem razmerja α se kritične napetosti zmanjšujejo podobno kot tiste, izračunane po standardu (Slika 63), vendar pa to ne velja, ko so ojačitve blizu sredine višine stojine ($z_{sl,1}/h_w=0,25; 0,30$ in $0,35$), kjer so vrednosti kritičnih napetosti za različna razmerja α zelo blizu skupaj (Slika 62).



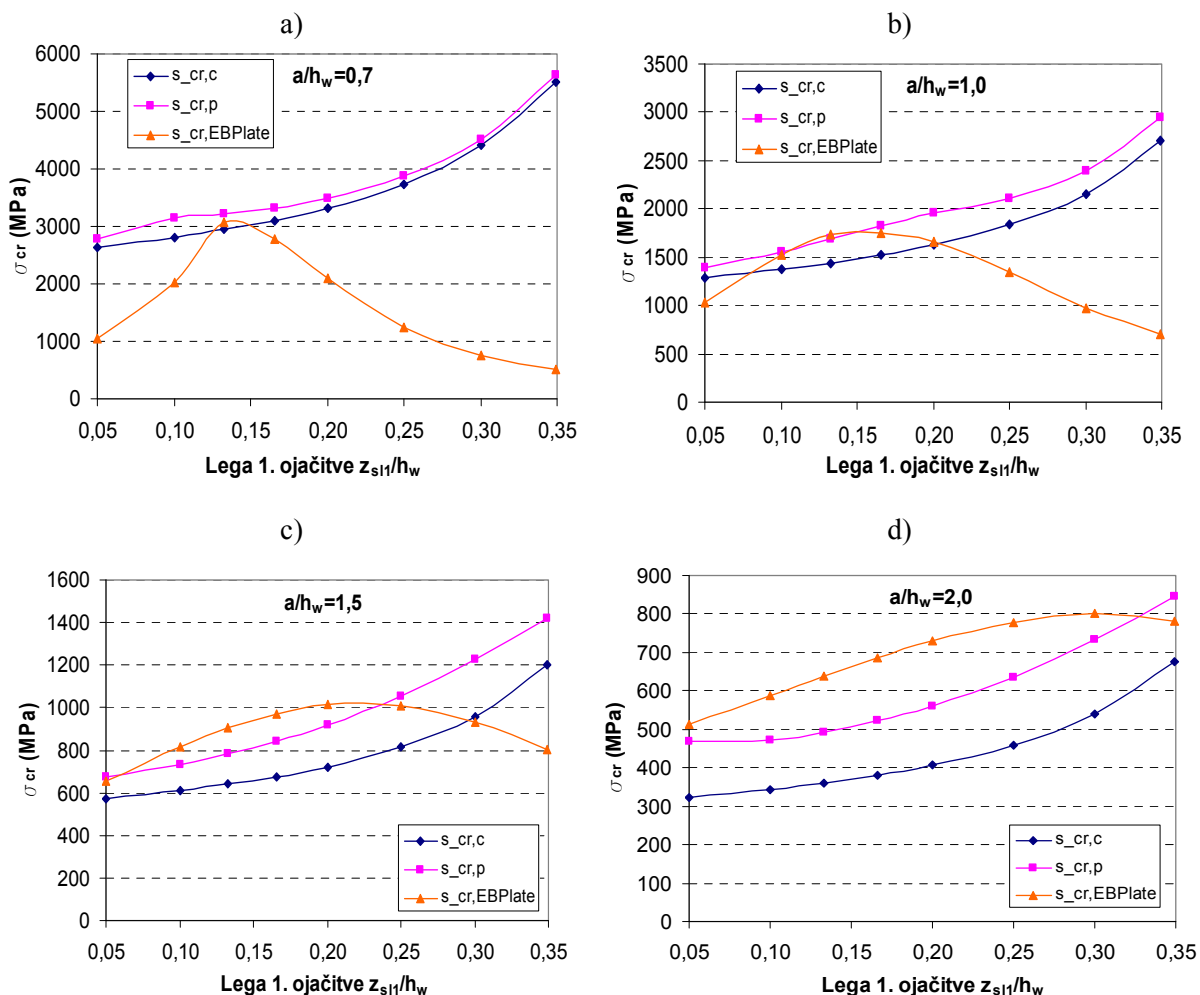
Slika 62: Elastične kritične napetosti izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ v odvisnosti od lege ojačitev za različna geometrijska razmerja a/h_w (račun s programom EBPlate)



Slika 63: Primerjava elastičnih kritičnih napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$, $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od razmerja a/h_w

Iz primerjave rezultatov za posamezna geometrijska razmerja vidimo, da se pri majhnem razmerju $\alpha=0,7$ rezultati najbolj ujemajo le v eni točki, to je pri legi ojačitev: $z_{s1,1}/h_w=0,133$ (Slika 64a). Sicer so kritične napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ manjše od kritičnih napetosti $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,p}$. Pri razmerju $\alpha=1,0$ je ujemanje boljše, in sicer pri treh položajih ojačitev $z_{s1,1}/h_w=0,10; 0,133$ in

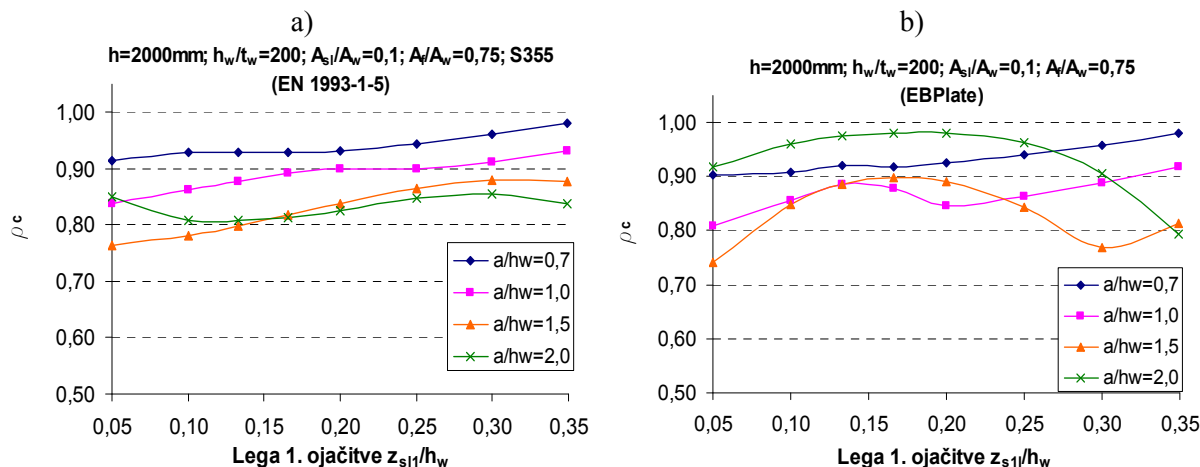
0,166 (Slika 64b). S povečanjem razmerja na $\alpha=1,5$ sta točki ujemanja pri $z_{sl,1}/h_w=0,05$ in 0,25. Za vmesne lege ojačitev pa so napetosti, izračunane s programom EBPlate, večje od napetosti, izračunanih po standardu (Slika 64c), kar je še bolj izrazito pri razmerju $\alpha=2,0$. Tu so odstopanja med rezultati obeh načinov računa največja (Slika 64d).



Slika 64: Primerjava elastičnih kritičnih napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$, $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od lege ojačitev za posamezna geometrijska razmerja a/h_w

V točkah ujemanja kritičnih napetosti se ujemajo tudi vrednosti redukcijskih koeficientov (Slika 65). Sicer pa velike razlike v vrednostih kritičnih napetosti pri majhnem razmerju $\alpha=0,7$, ne povzročajo bistvenih odstopanj v redukcijskih faktorjih, saj velja enak izraz kot v primeru ene ojačitve (enačba(4.8)). Odstopanja so malo večja pri razmerju $\alpha=1,0$, ker so tu večje razlike med kritično napetostjo izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ in uklona $\sigma_{cr,c}$ in velja enačba (4.10).

Pri razmerjih $\alpha=1,5$ in $2,0$, kjer so kritične napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ večje od kritičnih napetosti uklona $\sigma_{cr,c}$ in kritičnih napetosti izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$, pride do večjih odstopanj v vrednostih redukcijskih faktorjev, saj sta vrednosti razmerji $\frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}}$ ter $\frac{\sigma_{cr,EBPlate}}{\sigma_{cr,c}}$ v enačbi zelo različni.



Slika 65: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w

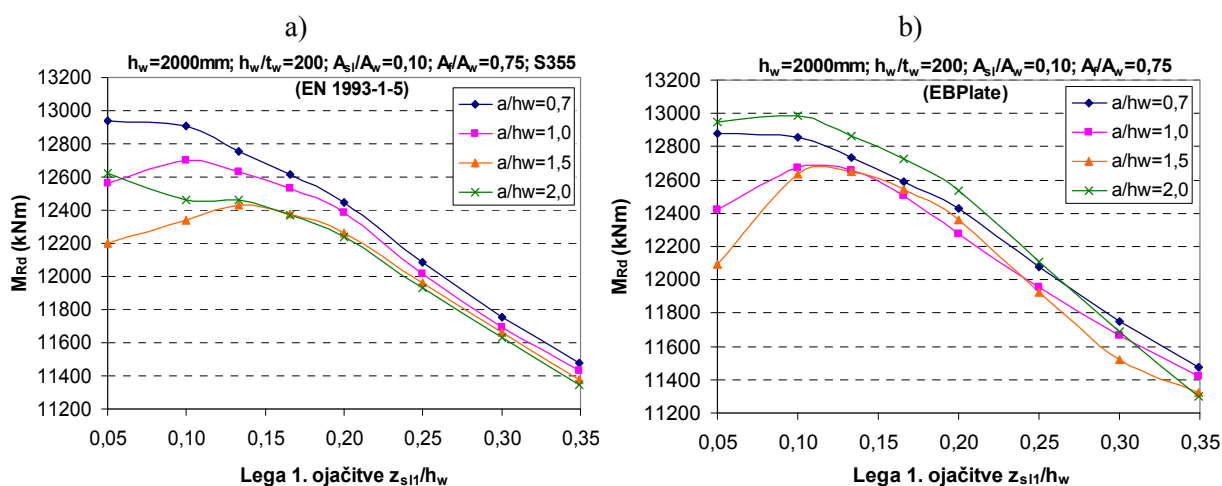
Razlike v redukcijskih koeficientih se kažejo pri upogibni nosilnosti (Slika 67). Upogibna nosilnost se z večanjem razmerja α v glavnem zmanjšuje (izjema je razmerje $\alpha=2,0$, kjer je nosilnost večja). Pri majhnih razmerjih $\alpha=0,7$ in $\alpha=1,0$ so razlike majhne, pri tem so rezultati računa po standardu malo večji (nevarna stran). Največja odstopanja pri primerjavi obeh načinov računa so pri geometrijskih razmerjih $\alpha=1,5$ in $\alpha=2,0$, kjer so nosilnosti, izračunane po standardu, nižje in s tem na varni strani (Preglednica 11 in Preglednica 12).

Preglednica 11: Razlike v nosilnosti med $M_{Rd}(EN)$ in $M_{Rd}(EBPlate)$ pri legah 1. ojačitve $z_{s11}=0,05h_w$ in $z_{s11}=0,10h_w$

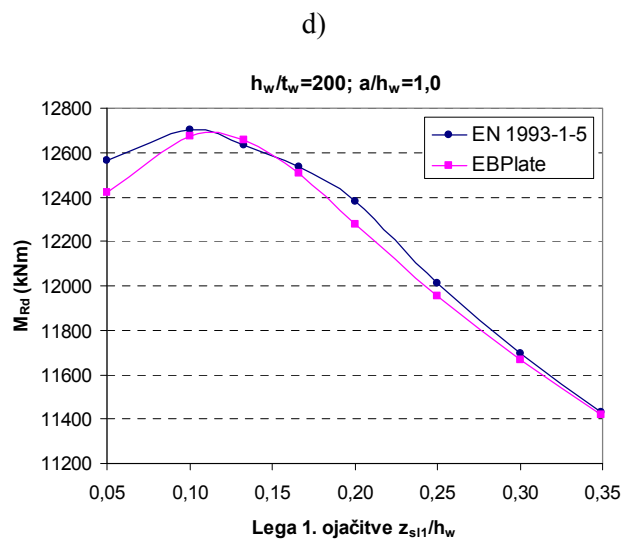
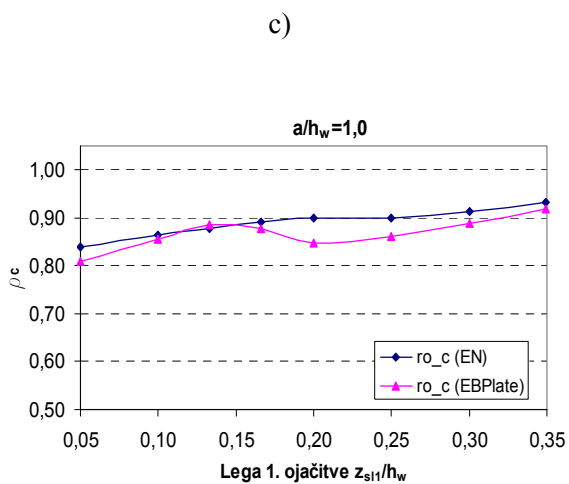
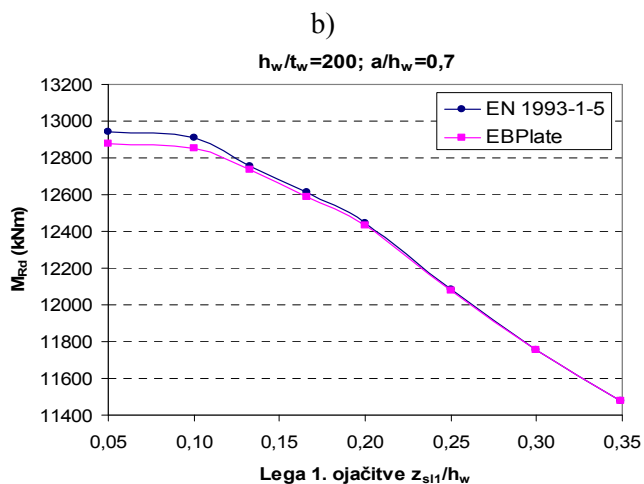
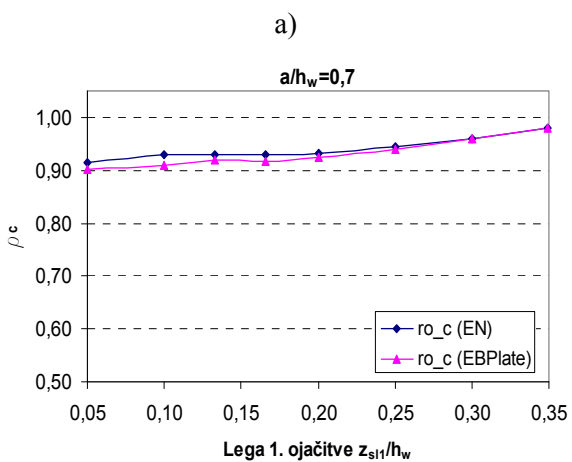
h_w/t_w	[%]		$M_{Rd}(EN) - M_{Rd}(EBPlate)$			
	z_{s11}/h	a/h_w	0,7	1,0	1,5	2,0
150	0,05		0,32	1,0	-1,2	-2,3
	0,10		0,28	-0,4	-2,5	-2,3
200	0,05		0,45	1,2	0,8	-2,6
	0,10		0,41	0,2	-2,4	-4,2
250	0,05		0,58	1,3	3,1	-1,5
	0,10		0,53	1,4	-1,1	-6,0
300	0,05		0,52	1,4	4,4	-0,7
	0,10		0,57	-0,2	0,2	-4,7
400	0,05		0,45	1,6	3,5	3,4
	0,10		0,52	1,8	4,1	0,5

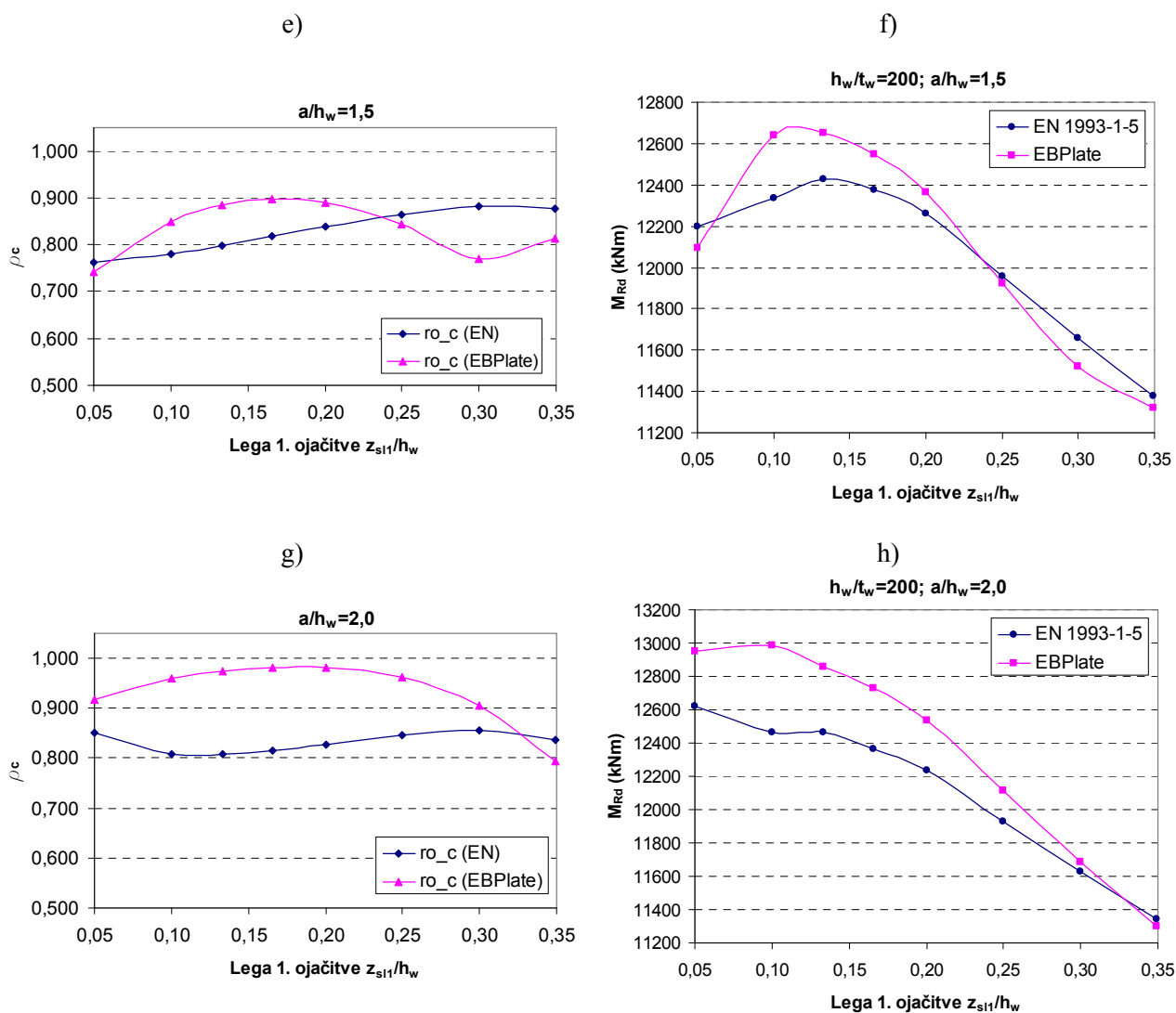
Preglednica 12: Povečanje upogibne nosilnosti pri najbolj učinkoviti legi ojačitev glede na nosilnost pri najmanj učinkoviti legi ojačitve na sredini višine stojine za različna razmerja $\alpha = a/h_w$ in vitkosti stojine h_w/t_w (dve vzdolžni ojačitvi)

[%]		EN 1993-1-5				EBPlate			
h_w/t_w	a/h_w	0,7	1,0	1,5	2,0	0,7	1,0	1,5	2,0
	150	10,3	8,5	7,0	11,1	10,0	9,1	10,4	13,4
	200	12,7	11,1	9,2	11,3	12,2	11,0	11,7	14,9
	250	14,1	12,5	10,1	9,2	13,4	12,2	12,6	15,5
	300	14,7	13,0	10,1	7,9	14,1	13,3	11,5	13,7
	400	14,4	12,5	9,2	6,2	13,9	10,6	6,9	7,6



Slika 66: Primerjava upogibnih nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w



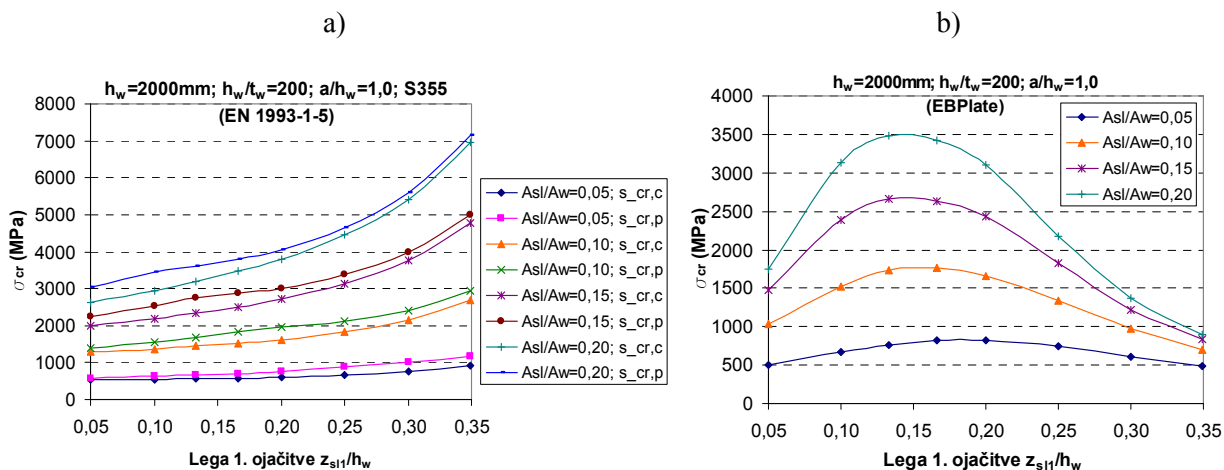


Slika 67: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c in upogibnih nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitve za različna geometrijska razmerja a/h_w

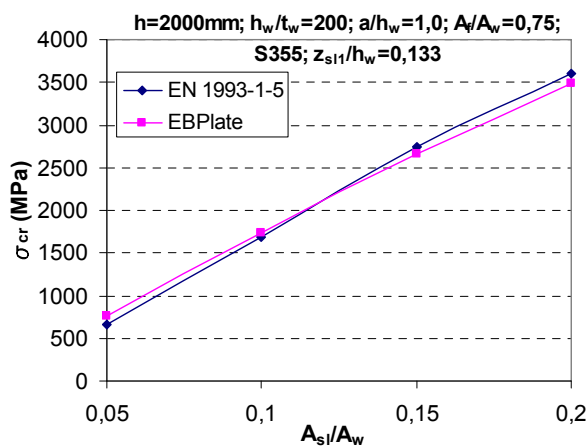
4.2.2.3 Vpliv površine ojačitve A_{sl}/A_w

Z večanjem razmerja med površino prereza posamezne ojačitve in stojine A_{sl}/A_w se kritične napetosti v obeh načinih računa podobno povečujejo (Slika 69). Za razmerja $A_{sl}/A_w = 0,10, 0,15$ in $0,20$ je najboljše ujemanje rezultatov, ko sta ojačitvi v območju $z_{sl,1}=0,10$ do $0,166h_w$. V primeru najmanjših ojačitev, $A_{sl}/A_w = 0,05$, je tu odstopanje večje (Slika 70a). Ko sta ojačitvi blizu sredine višine nosilca in najbližje pasnici ($z_{sl,1}=0,05h_w$), so kritične napetosti, izračunane s programom EBPlate, zopet manjše od kritičnih napetosti, izračunanih po standardu. Ta razlika se z večanjem razmerja A_{sl}/A_w povečuje. Kot v primeru ene ojačitve so

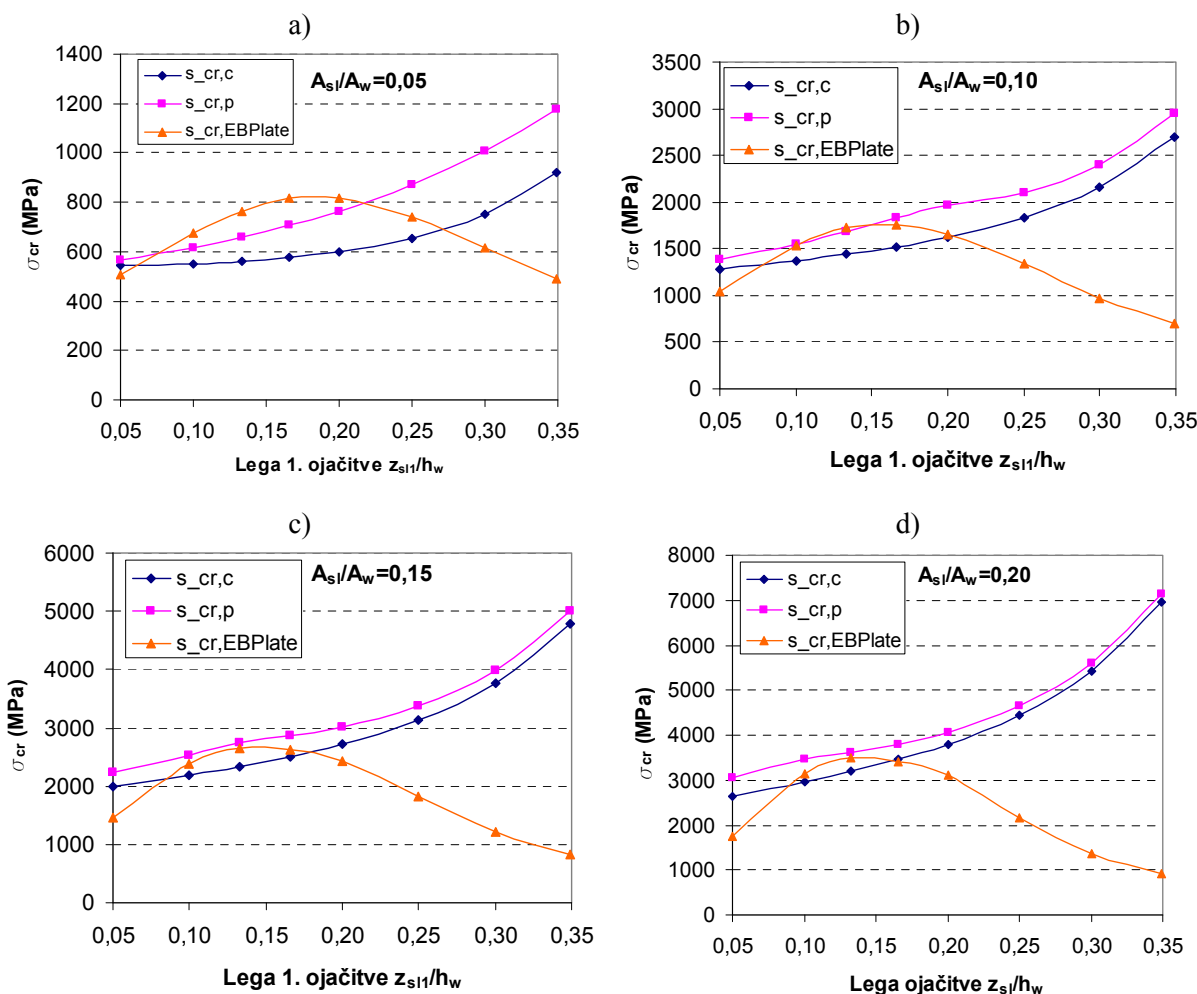
kritične napetosti izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$, izračunane po standardu, pri vseh razmerjih površin A_{sl}/A_w večje od kritičnih napetosti uklonske izbočenja ojačitve $\sigma_{cr,c}$, razlika med njimi pa raste z zmanjševanjem razmerja A_{sl}/A_w .



Slika 68: Kritične napetosti a) $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,p}$ ter b) $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od lege ojačitve za različna razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w



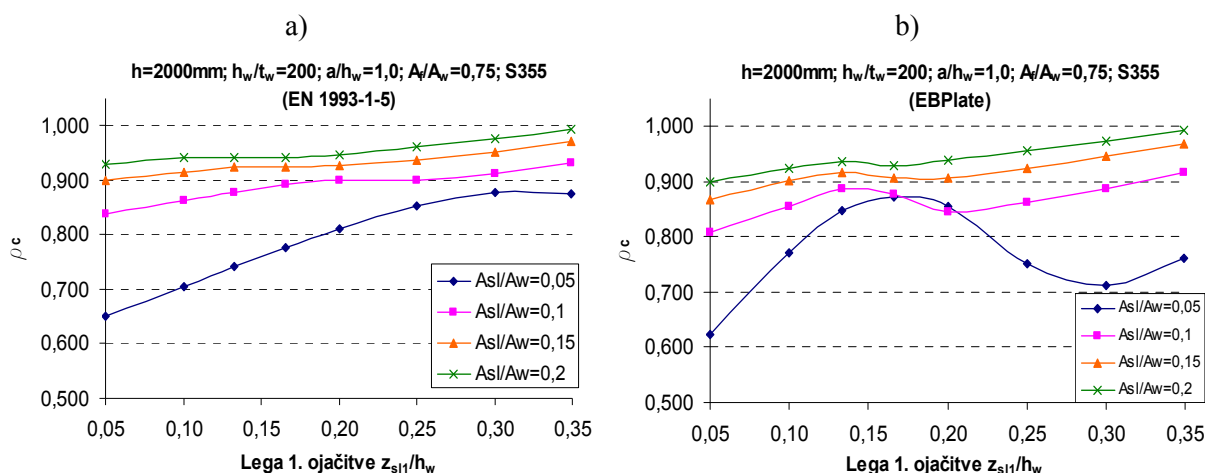
Slika 69: Primerjava kritičnih napetosti $\sigma_{cr,p}$ ter $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w za položaj ojačitve $z_{sl1}/h_w=0,133$



Slika 70: Primerjava kritičnih napetosti $\sigma_{cr,c}$, $\sigma_{cr,p}$ ter $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od lege ojačitve pri posameznih razmerjih površin prečnih prerezov A_{s1}/A_w

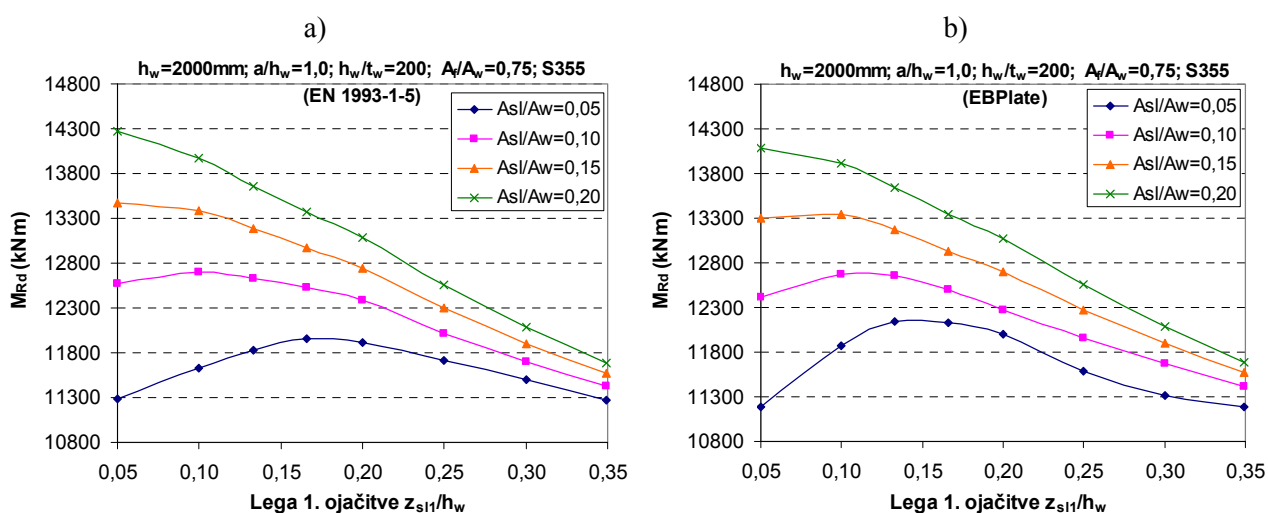
Redukcijski koeficienti se z zmanjševanjem razmerja med površino posamezne ojačitve in stojine A_{s1}/A_w zmanjšujejo. Razlike v redukcijskih koeficientih so največje pri majhnih

razmerjih. To je ponovno posledica razlik v vrednostih $\frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}}$ in $\frac{\sigma_{cr,EBPlate}}{\sigma_{cr,c}}$ (Slika67).



Slika 71: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c v odvisnosti od lege ojačitev za različna razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w

Upogibna nosilnost prereza se zmanjšuje z zmanjševanjem razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w (Slika 72). Pri računu s kritičnimi napetostmi, dobljenimi s programom EBPlate so nosilnosti za razmerja $A_{sl}/A_w=0,10, 0,15$ i $0,20$ malo manjše. Večja razlika med rezultati je za razmerje $A_{sl}/A_w=0,05$, kjer pa so pri legah ojačitev $z_{s11}/h_w=0,10$ do $0,20$ vrednosti $M_{Rd(EBPlate)}$ večje. Najbolj učinkovita lega obeh ojačitev se z zmanjševanjem razmerja A_{sl}/A_w pomika proti sredini višine stojine. Odstotek povečanja nosilnosti pa se z zmanjševanjem razmerja površin po pričakovanjih zmanjšuje (Preglednica 14).



Slika 72: Primerjava upogibnih nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitev za različna razmerja površin prečnih prerezov A_{sl}/A_w

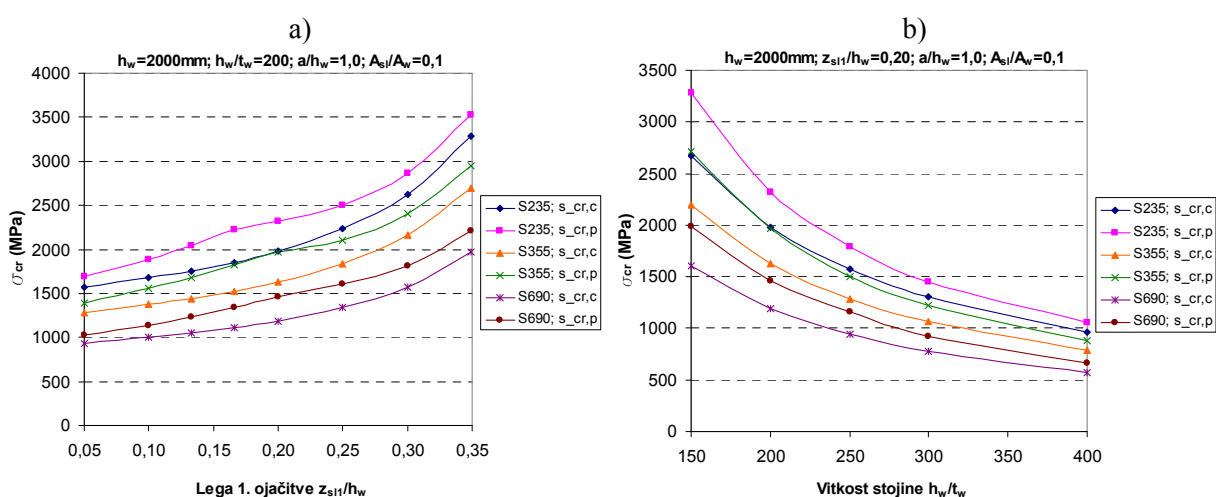
Preglednica 13: Razlike v nosilnosti med $M_{Rd}(EN)$ in $M_{Rd}(EBPlate)$ pri legah 1. ojačitve $z_{s1l}=0,05h_w$ in $z_{s1l}=0,10h_w$

h_w/t_w	[%]		$M_{Rd}(EN) - M_{Rd}(EBPlate)$			
	z_{s1l}/h	A_{s1}/A_w	0,05	0,10	0,15	0,20
150	0,05		0,14	0,96	1,01	0,94
	0,10		-3,21	-0,42	-0,15	-0,03
200	0,05		0,81	1,16	1,35	1,35
	0,10		-2,05	0,24	0,29	0,42
250	0,05		0,55	1,34	1,67	1,73
	0,10		-0,28	1,45	1,11	0,89
300	0,05		0,29	1,44	1,90	2,03
	0,10		0,98	-0,16	1,14	0,91
400	0,05		0,00	1,58	2,18	2,09
	0,10		2,07	1,77	1,36	0,88

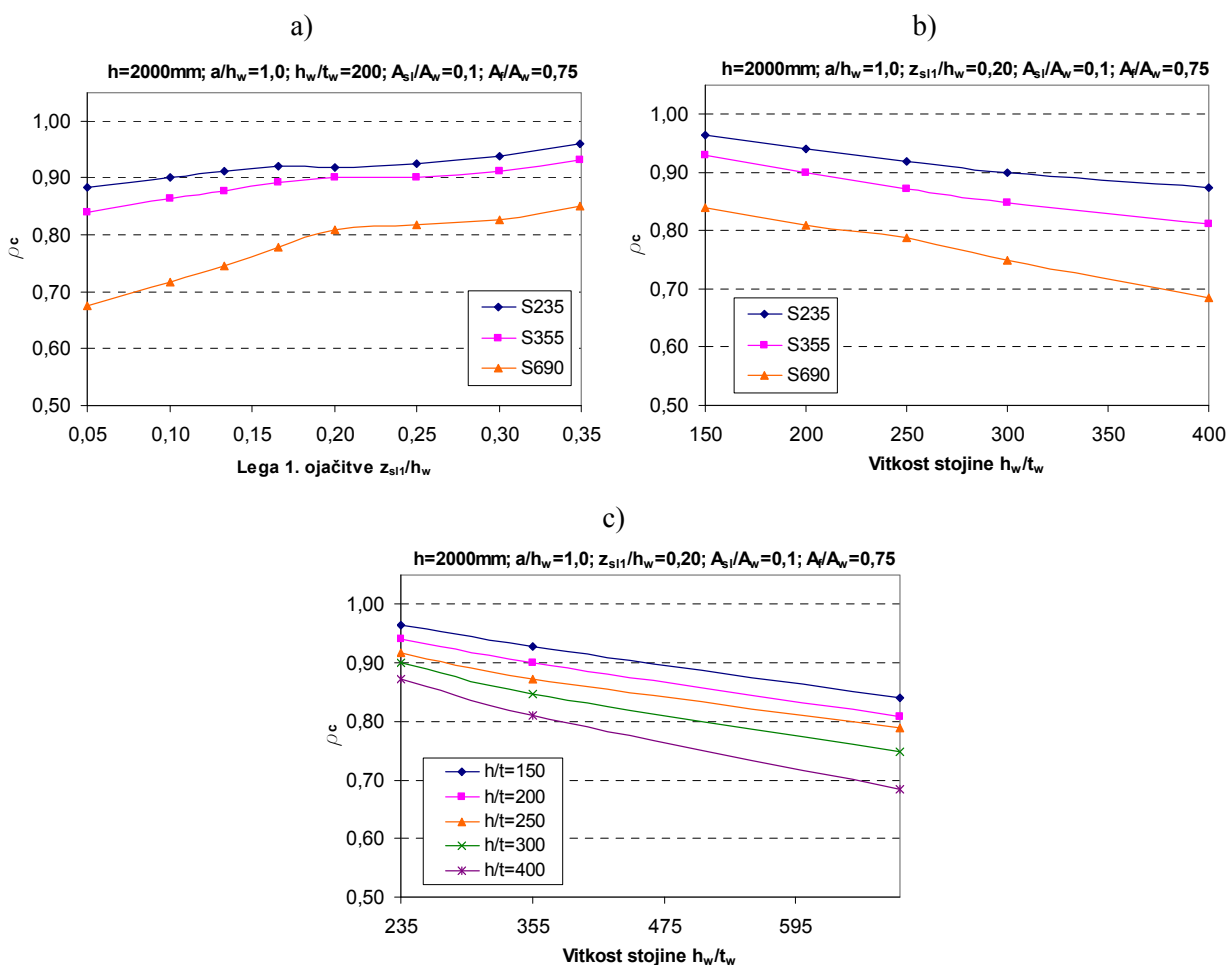
Preglednica 14: Povečanje upogibne nosilnosti pri najbolj učinkoviti legi ojačitev glede na nosilnost pri najmanj učinkoviti legi ojačitve na sredini višine stojine za različna razmerja A_{s1}/A_w in vitkosti stojine h_w/t_w (dve vzdolžni ojačitvi)

h_w/t_w	[%]		EBPlate				EN 1993 - 1 - 5			
	A_{s1}/A_w		0,05	0,10	0,15	0,20	0,05	0,10	0,15	0,20
	150		6,6	9,1	13,1	18,5	3,4	8,5	14,2	19,7
200		8,6	11,0	15,4	20,5	6,0	11,1	16,5	22,1	
250		8,7	12,2	16,0	21,4	7,1	12,5	17,6	23,5	
300		8,0	13,3	16,4	21,7	7,1	13,0	18,2	24,2	
400		4,9	10,6	15,9	21,6	5,9	12,5	18,4	24,2	

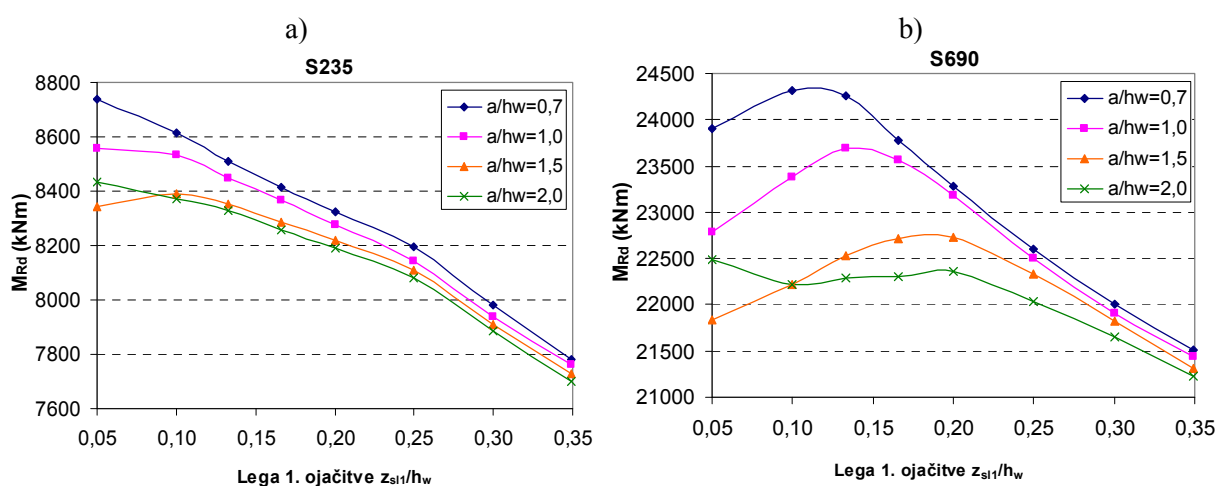
4.2.2.4 Vpliv kvalitete jekla (S235, S355, S690)



Slika 73: Kritične napetosti $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,p}$ v odvisnosti od: a) lege ojačitve ; b) vitkosti stojine za različne kvalitete jekla (S235, S355 in S690)

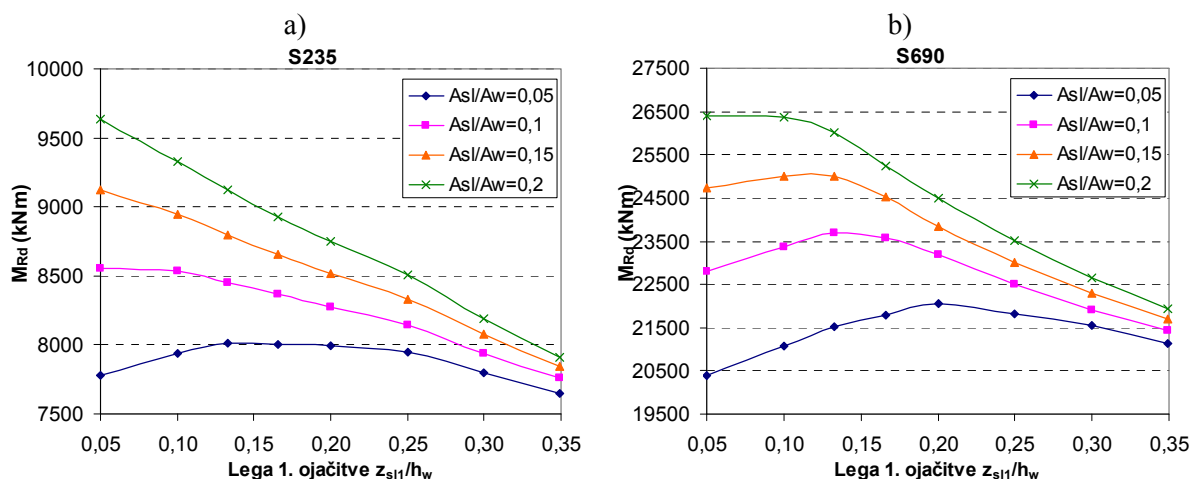


Slika 74: Redukcijski koeficienti ρ_c v odvisnosti od: a) lege ojačitev; b) vitkosti stojine, za različne kvalitete jekla (S235, S355 in S690) ter c) kvalitete jekla, za različne vitkosti stojine

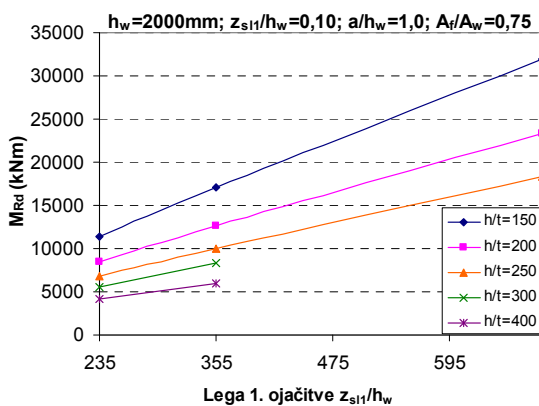


Slika 75: Upogibne nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitve za kvalitete jekla: a) S235; b) S690 za primer: $h=2000\text{mm}, h/t=200, A_{s1}/A_w=0,1, A_f/A_w=0,75$

Iz slik vidimo, da se najbolj učinkovita lega ojačitve z večanjem trdnosti jekla pomika proti sredini višine stojine. Pri tem je odstotek povečanja upogibne nosilnosti glede na nosilnost pri najmanj učinkoviti legi ojačitev pri jeklu S690 malo nižji kot pri jeklih S235 in S355 (od 1% za $\alpha=0,7$ do 5% za $\alpha=2,0$). Vpliv geometrijskega razmerja α je pri jeklu S690 večji.



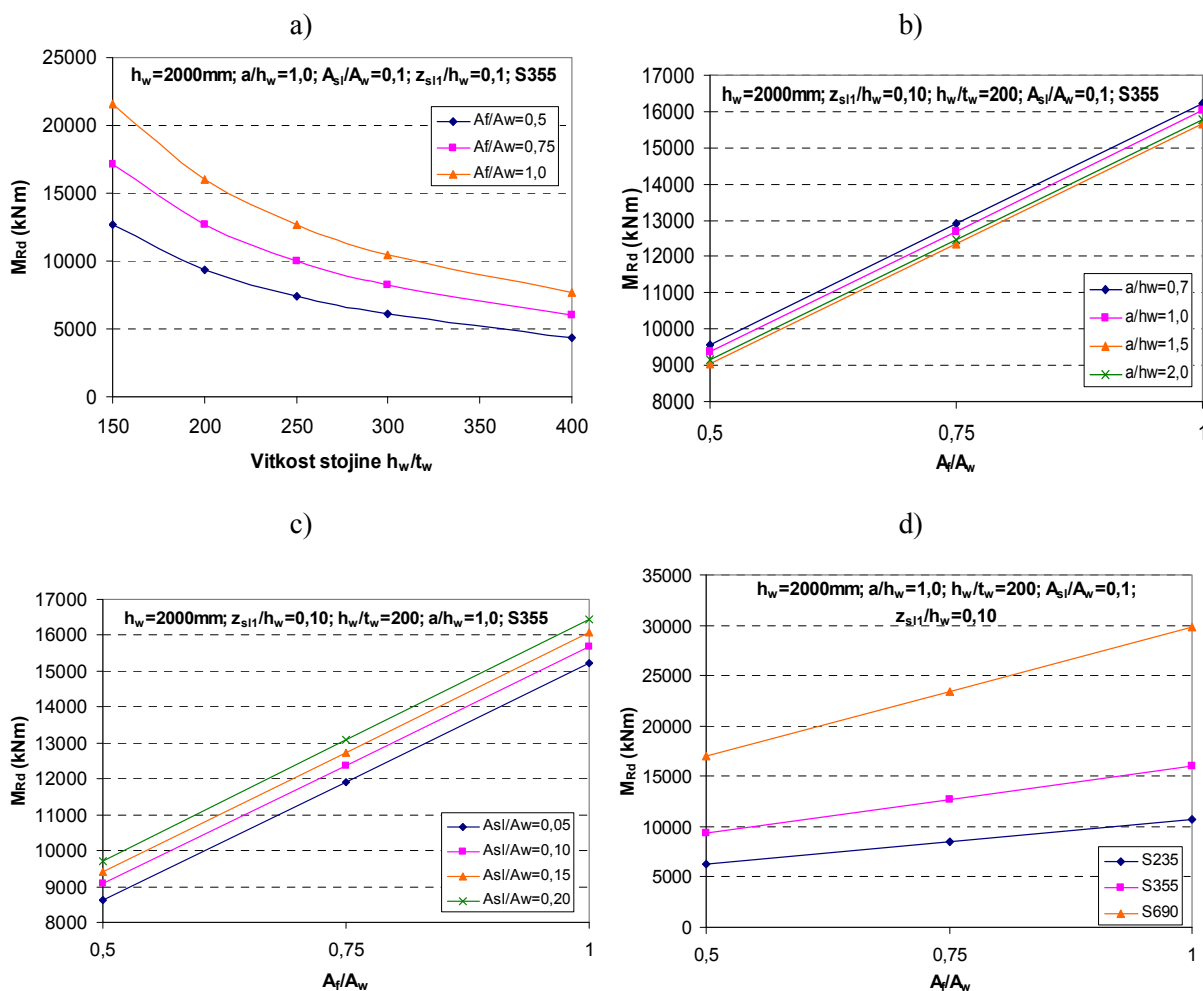
Slika 76: Upogibne nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od lege ojačitve za kvalitete jekla: a) S235; b) S690 za primer: $h=2000\text{mm}$, $h/t=200$, $A_{s1}/A_w=0,1$, $A_f/A_w=0,75$ in različna razmerja A_{s1}/A_w



Slika 77: Upogibne nosilnosti M_{Rd} v odvisnosti od kvalitete jekla za različne vitkosti stojine, v primeru $z_{s1l}/h_w=0,10$

4.2.2.5 Vpliv površine prečnega prereza pasnice A_f/A_w

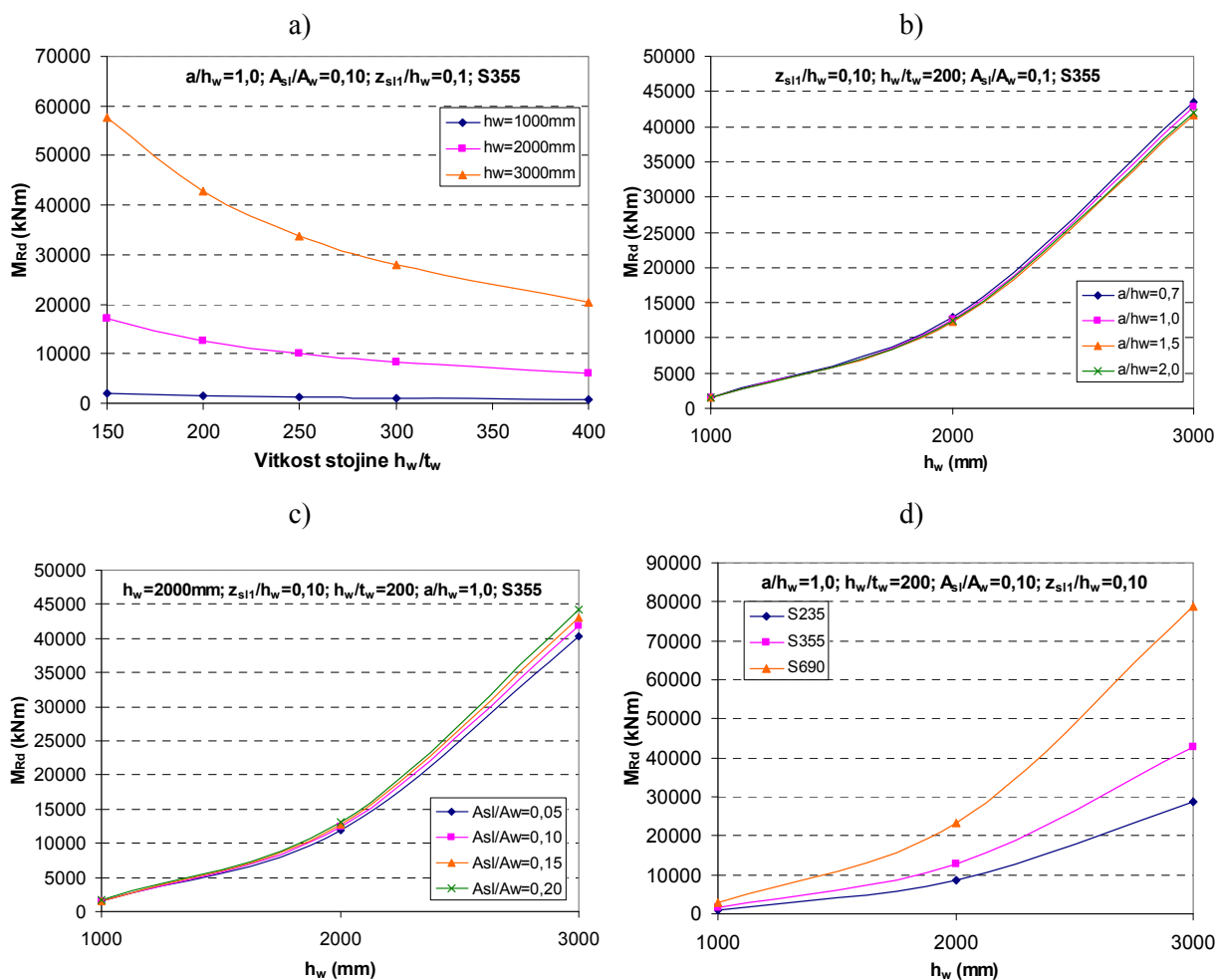
Podobno kot pri prerezu z eno vzdolžno ojačitvijo se s povečanjem razmerja A_f/A_w upogibna nosilnost linearno povečuje, pri čemer se vpliv parametrov h_w/t_w , α in A_f/A_w na nosilnost ne spremeni (Slika 78).



Slika 78: a) Upogibna nosilnost prečnega prereza v odvisnosti od vitkosti stojine za različna razmerja površin A_f/A_w ; b) Upogibna nosilnost prečnega prereza v odvisnosti od razmerja prerezov A_f/A_w za: b) različna geometrijska razmerja α ; c) različna razmerja površin prerezov A_{sl}/A_w ; d) različne kvalitete jekla, pri legi ojačitev $z_{sl}/h_w=0,10$

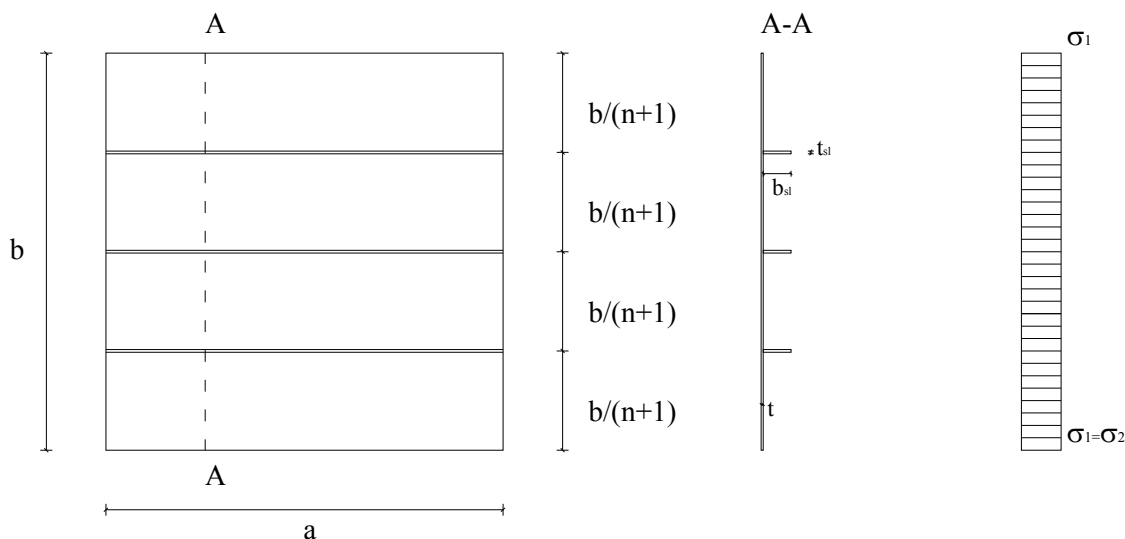
4.2.2.6 Vpliv višine stojine h_w

S povečanjem višine stojine se nosilnost znatno poveča, odvisnost od brezdimenzijskih parametrov pa ostane nespremenjena (Slika 79).



Slika 79: a) Upogibna nosilnost prečnega prereza M_{Rd} v odvisnosti od vitkosti stojine za različne višine stojin h_w ; M_{Rd} v odvisnosti od višine stojine h_w za: b) različna razmerja α ; c) različna razmerja prerezov A_{s1}/A_w in d) različne kvalitete jekla

4.2.3 Pločevina z eno, dvema ali več vzdolžnimi ojačitvami, čisti tlak

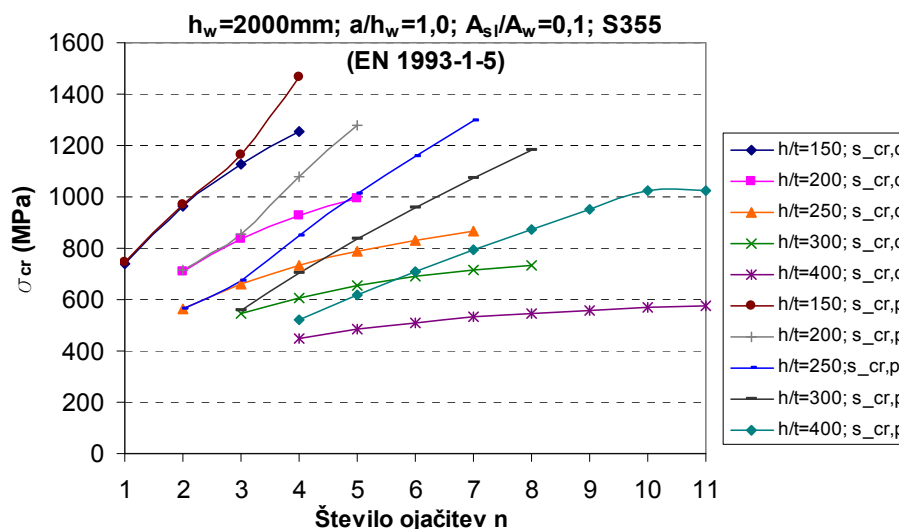


Slika 80: Geometrija panela, ojačanega z n ojačitvami (čisti tlak)

Ojačitve so razporejene enakomerno po širini panela. Število ojačitev smo omejili z lokalno vitkostjo pločevine, tako da je ta v mejah od $40 - 100 \varepsilon$. Velikosti ostalih parametrov so podane v Preglednica 6.

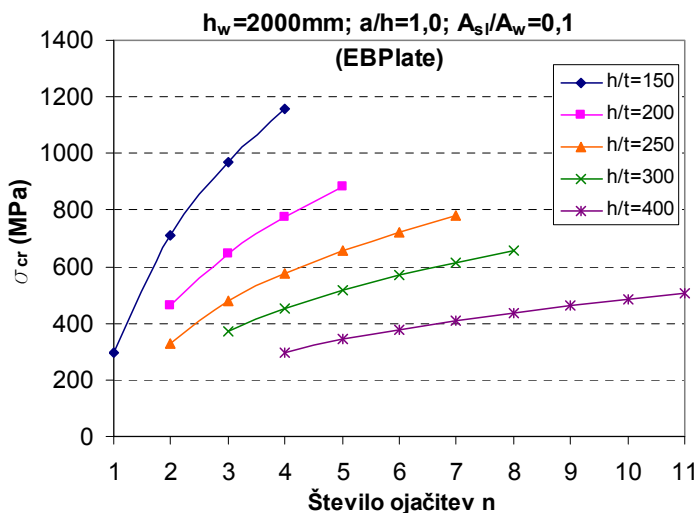
4.2.3.1 Vpliv vitkosti pločevine b/t

Standard: Elastične kritične napetosti izbočenja pločevine se z večanjem vitkosti pločevine zmanjšujejo (Slika 81). Pri tem naklon krivulj za kritične napetosti izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ v odvisnosti od števila ojačitev pada veliko manj, kot pri krivuljah za kritične napetosti uklonske izbočenja tlačene palice $\sigma_{cr,c}$. To pomeni, da povečanje števila ojačitev pri velikih vitkosti zelo malo prispeva k povečanju kritičnih napetosti uklonske izbočenja, medtem ko je povečanje kritičnih napetosti izbočenja panela pri vseh vitkosti pločevine podobno. Razlike med kritičnima napetostma obeh skrajnih načinov izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ se večajo z večanjem števila ojačitev.



Slika 81: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različne vitkosti stojine h_w/t_w

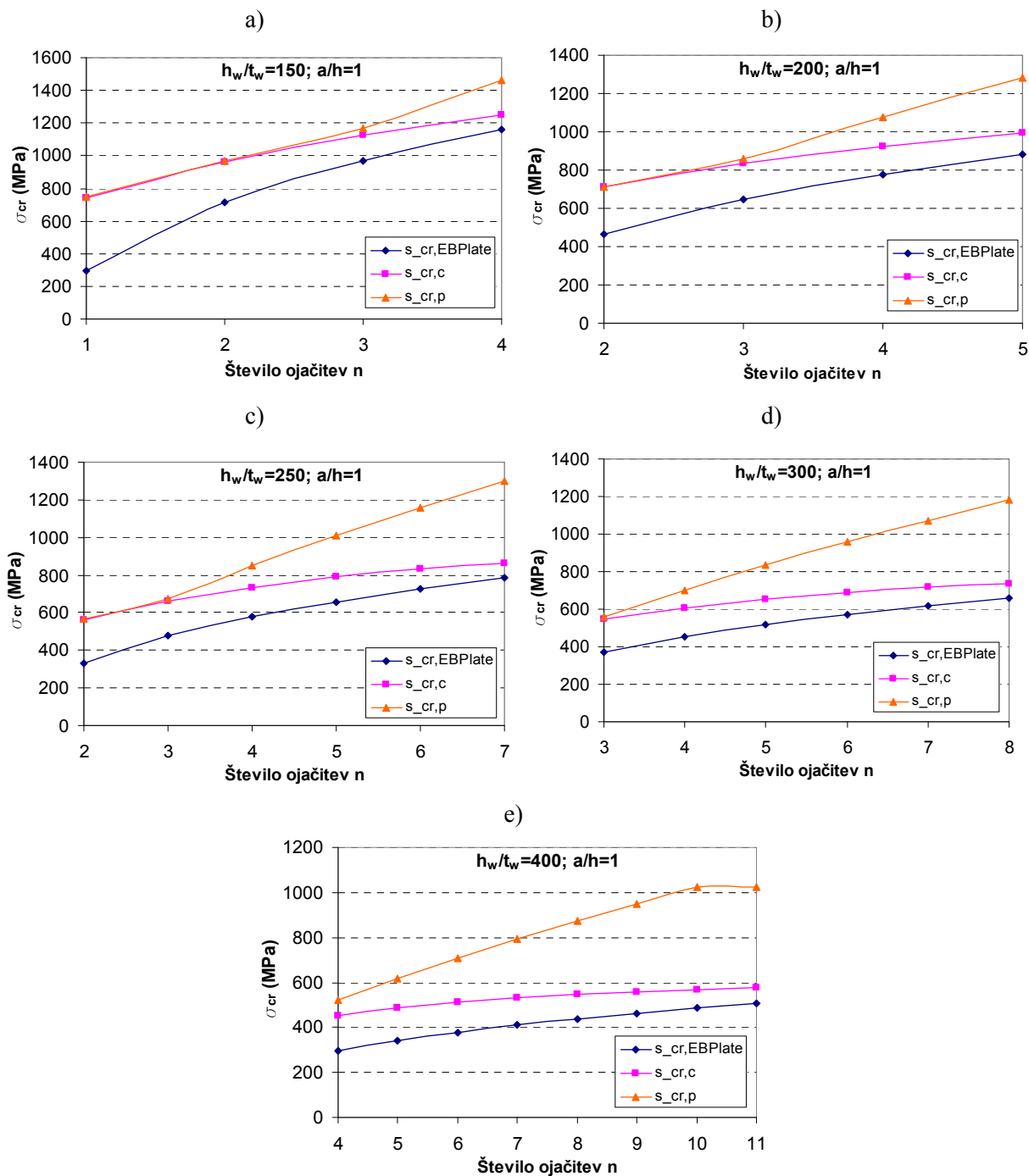
Program EBPlate: Elastične kritične napetosti izbočenja pločevine se prav tako zmanjšujejo z večanjem vitkosti pločevine. Pri tem se zmanjšuje tudi vpliv števila ojačitev (podobno kot pri $\sigma_{cr,c}$) (Slika 82).



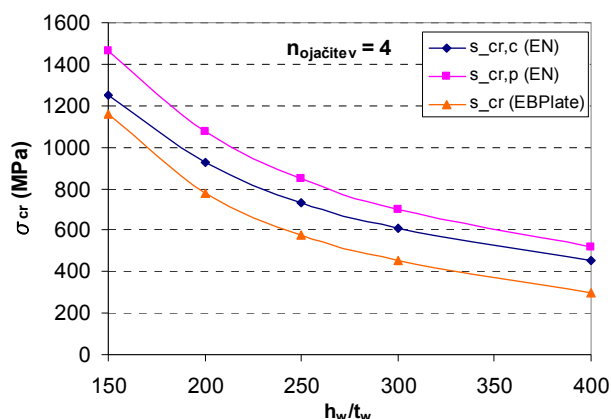
Slika 82: Elastične kritične napetosti izbočenja $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različne vitkosti stojine h_w/t_w

Pri primerjavi rezultatov obeh načinov računa vidimo, da so kritične napetosti, izračunane s programom EBPlate, za vse vitkosti pločevine manjše od obeh kritičnih napetosti, $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$. Z večanjem števila ojačitev oziroma z zmanjševanjem lokalne vitkosti pločevine se

vrednosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ približujejo vrednostim kritičnih napetosti uklona $\sigma_{cr,c}$, vendar se razlika med napetostmi $\sigma_{cr,EBPlate}$ in kritičnimi napetostmi izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ povečuje, saj slednje bolj strmo naraščajo (Slika 83).



Slika 83: Primerjava $\sigma_{cr,p}$, $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različne vitkosti pločevine b/t , za primer: $b=2000\text{mm}$; $a/b=1,0$; $A_{st}/A_w=0,10$ in S355



Slika 84: Primerjava $\sigma_{cr,p}$, $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od vitkosti pločevine b/t , za primer: $n_{ojaitev}=4$
 $b=2000\text{mm}$; $a/b=1,0$; $A_{sl}/A_w=0,10$ in S355

Redukcijski koeficienti ρ_c se z večanjem vitkosti pločevine zmanjšujejo. Pri majhnem številu ojačitev (do $n=3$) so rezultati obeh načinov računa zelo podobni, z večanjem števila ojačitev pa se bistveno razlikujejo, saj se v primeru računa po standardu vrednosti redukcijskih koeficientov večajo proti vrednosti 1, v računu z napetostmi $\sigma_{cr,EBPlate}$ pa so skoraj konstantne, oziroma se pri velikih vitkosti pločevine, $b/t=300$ in $b/t=400$, zmanjšujejo (Slika 85).

Vzrok za odstopanja vidimo v enačbi (2.39), saj velja:

- Za $n \leq 3$,

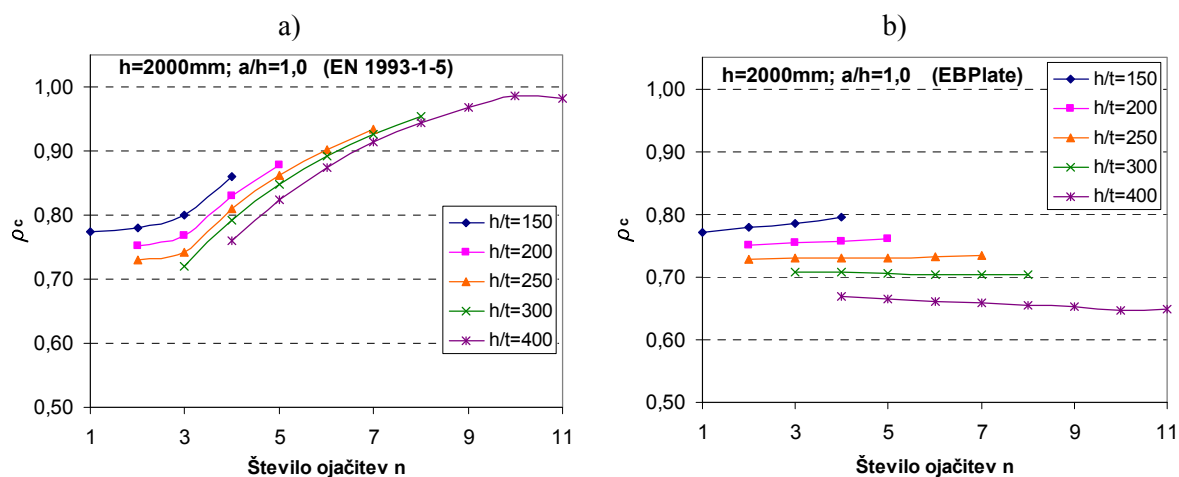
$$\sigma_{cr,p} \approx \sigma_{cr,c} \Rightarrow \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} \approx 1 \Rightarrow \xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 \approx 0 \Rightarrow \rho_c \approx \chi_c \quad 4.11$$

$$\sigma_{cr,EBPlate} < \sigma_{cr,c} \Rightarrow \frac{\sigma_{cr,EBPlate}}{\sigma_{cr,c}} < 1 \Rightarrow \xi = \frac{\sigma_{cr,EBPlate}}{\sigma_{cr,c}} - 1 < 0 \Rightarrow \xi = 0 \Rightarrow \rho_c = \chi_c$$

- Za $n > 3$,

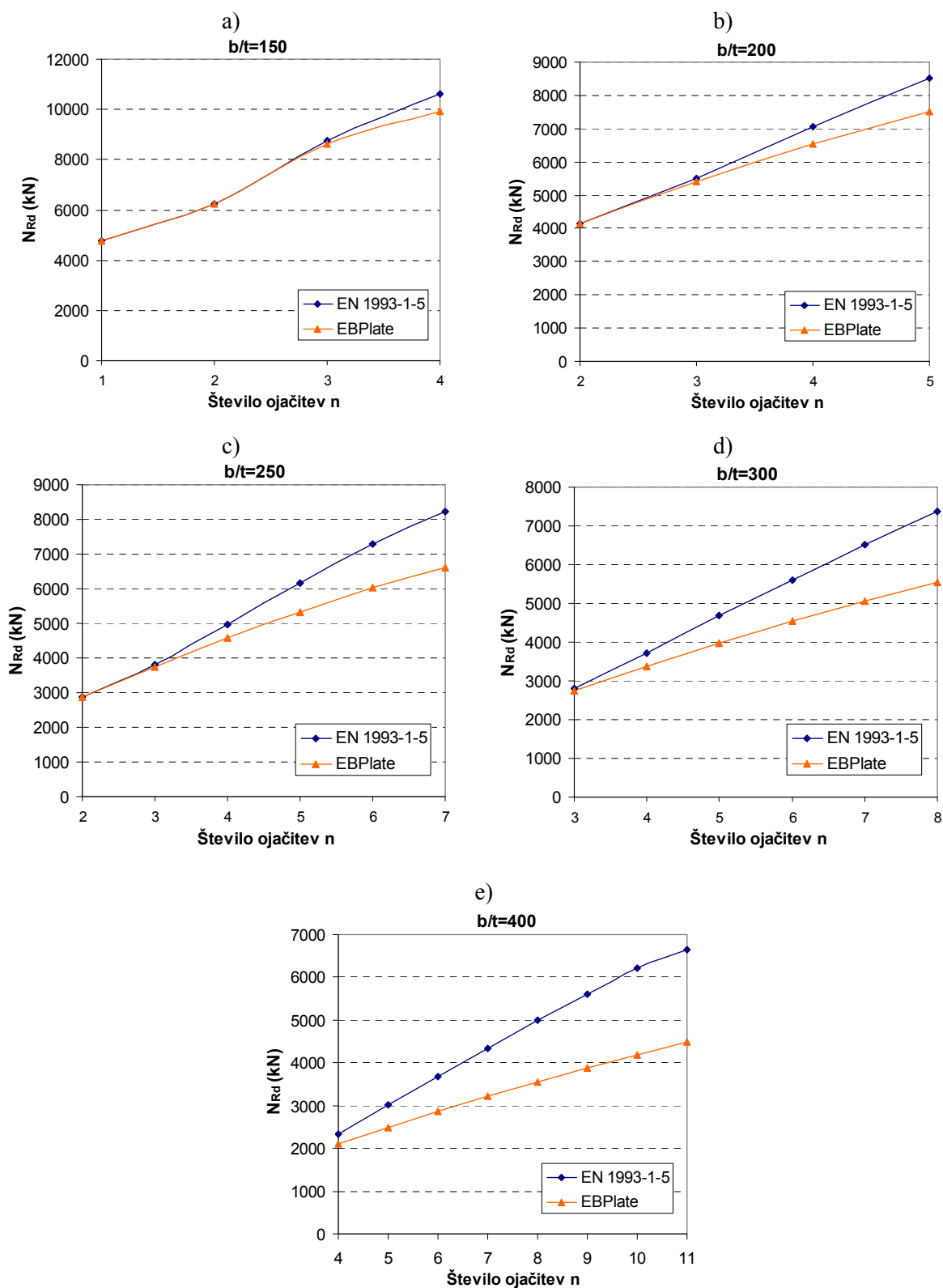
$$\sigma_{cr,p} > \sigma_{cr,c} \Rightarrow \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} > 1 \Rightarrow \xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 > 0 \Rightarrow \rho_c > \chi_c \quad 4.12$$

$$\sigma_{cr,EBPlate} < \sigma_{cr,c} \Rightarrow \frac{\sigma_{cr,EBPlate}}{\sigma_{cr,c}} < 1 \Rightarrow \xi = \frac{\sigma_{cr,EBPlate}}{\sigma_{cr,c}} - 1 < 0 \Rightarrow \xi = 0 \Rightarrow \rho_c = \chi_c$$



Slika 85: Primerjava redukcijskih koeficientov ρ_c v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različne vitkosti pločevine b/t

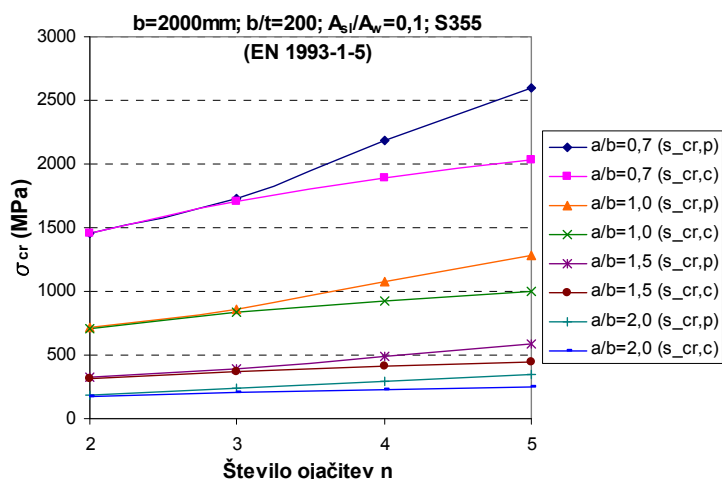
Tlačna nosilnost N_{Rd} ojačane pločevine se povečuje z zmanjševanjem vitkosti pločevine in z večanjem števila vzdolžnih ojačitev. Zaradi razlik v redukcijskih koeficientih ρ_c so tlačne nosilnosti, ki smo jih izračunali s pomočjo programa EBPlate, pri številu ojačitev $n > 3$ manjše od nosilnosti, izračunanih po standardu. Odstopanja se povečujejo z večanjem števila ojačitev in z večanjem vitkosti pločevine (Slika 86).



Slika 86: Primerjava tlačnih nosilnosti N_{Rd} v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev pri različnih vitkosti pločevine b/t ; za primer: $b=2000\text{mm}$; $a/b=1,0$; $A_{sl}/A_w=0,10$ in S355

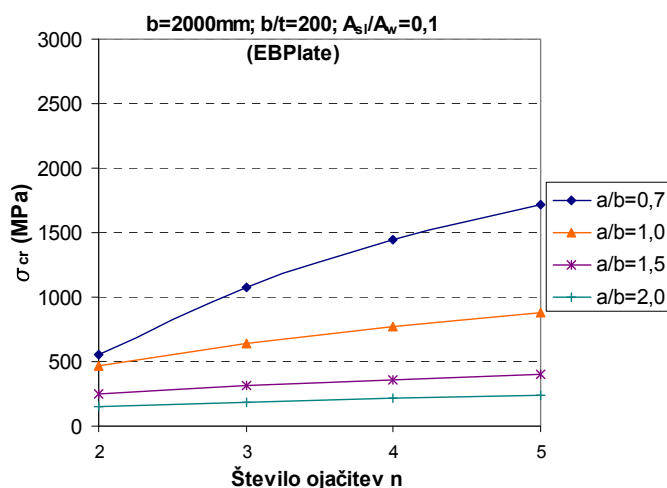
4.2.3.2 Vpliv razmerja med dolžino in višino panela $\alpha = a/b$

S povečanjem razmerja geometrije $\alpha = a/b$ se kritične napetosti izbočenja bistveno zmanjšajo, saj se zmanjša koeficient izbočenja $k_{\sigma,p}$ (enačba (A.1), EN 1993-1-5). Pri tem ostane vpliv števila ojačitev na spremembo kritičnih napetosti podoben. Razlika med σ_{cr} dveh skrajnih načinov izbočenja $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ se z večanjem razmerja α povečuje (Slika 87).



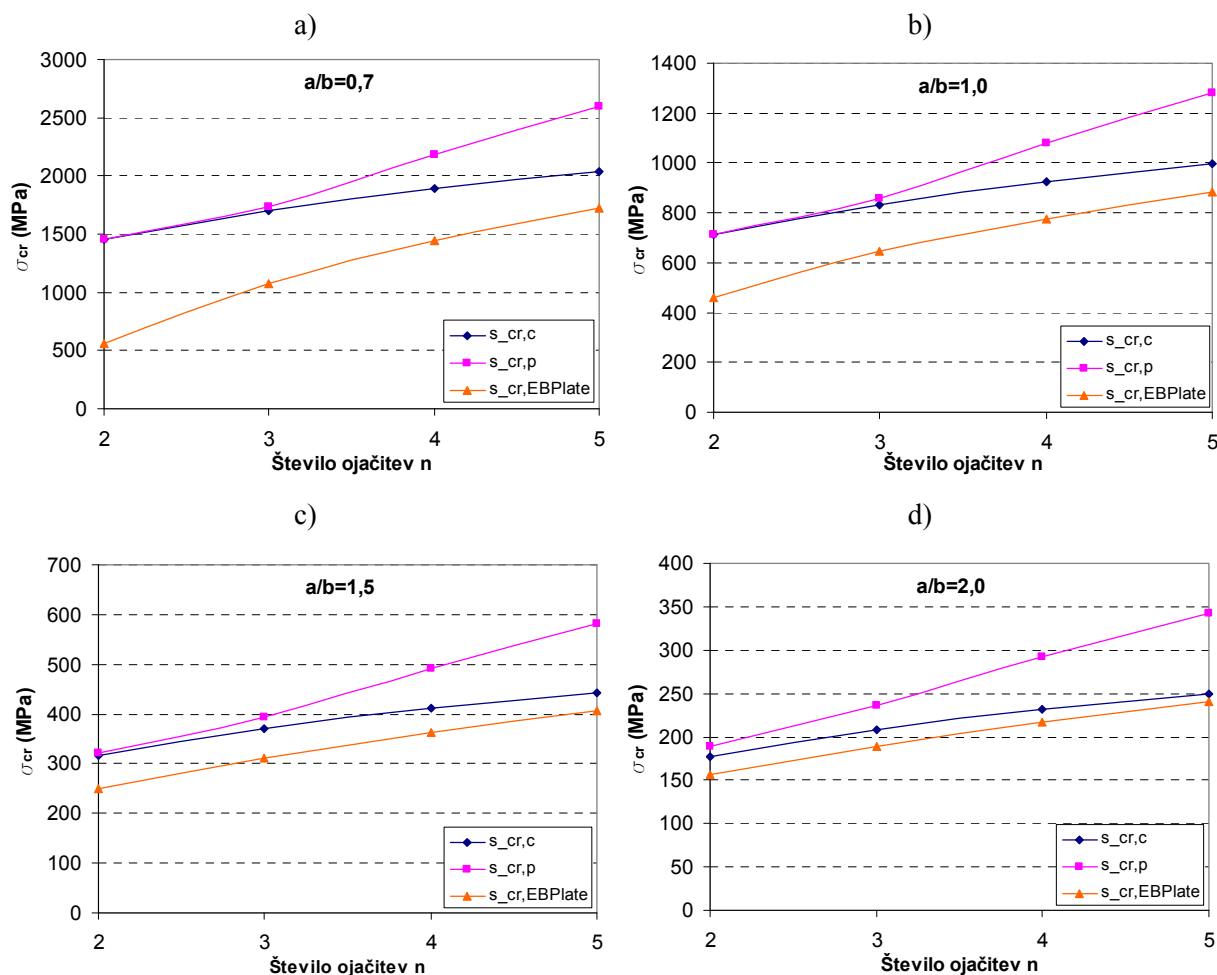
Slika 87: $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja α

Tudi kritične napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ se z večanjem razmerja α manjšajo. Sprememba je večja pri večjem številu ojačitev (Slika 88).



Slika 88: $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja α

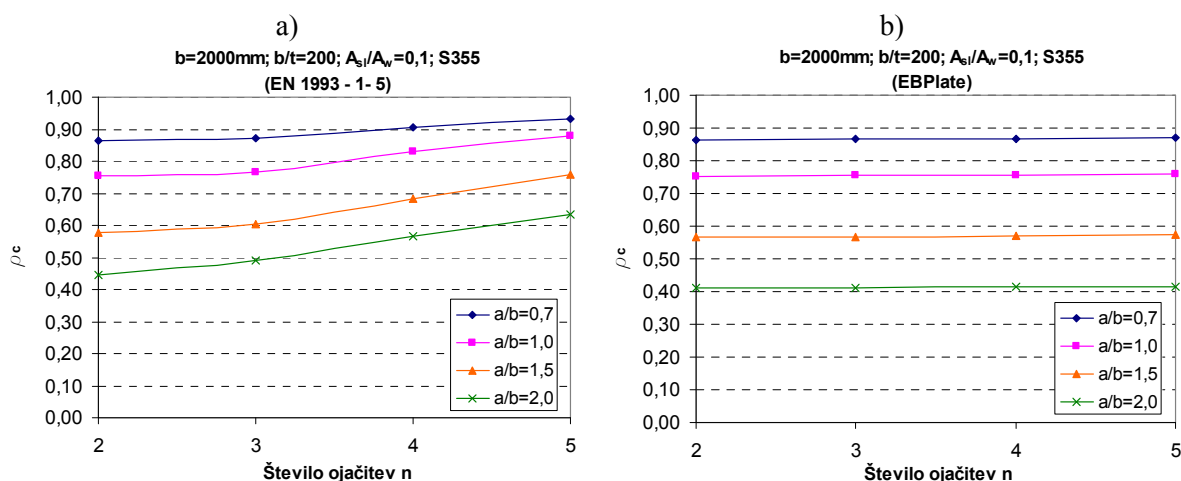
Iz primerjave rezultatov (Slika 89) vidimo, da so napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ pri vseh razmerjih α manjše od kritičnih napetosti uklonske izbočenja $\sigma_{cr,c}$ in se jim z večanjem razmerja α približujejo.



Slika 89: Primerjava $\sigma_{cr,p}$, $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja α , za primer: $b=2000\text{mm}$; $b/t=200$; $A_{sl}/A_p=0,10$ in S355

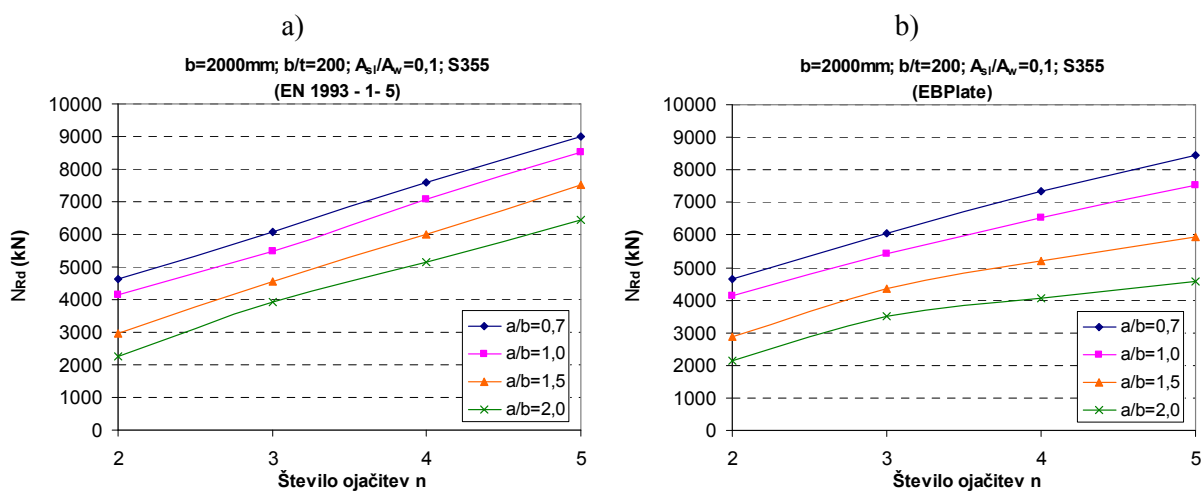
Redukcijski koeficient ρ_c se v obeh primerih računa z večanjem geometrijskega razmerja α zmanjšuje. Pri računu po standardu se z večanjem števila ojačitev povečuje, medtem ko je pri drugem načinu računa skoraj konstanten in enak redukcijskemu koeficientu uklona χ_c , saj je v

enačbi (2.40) $\frac{\sigma_{cr,EBPlate}}{\sigma_{cr,c}} < 1$ in s tem $\xi = 0$.



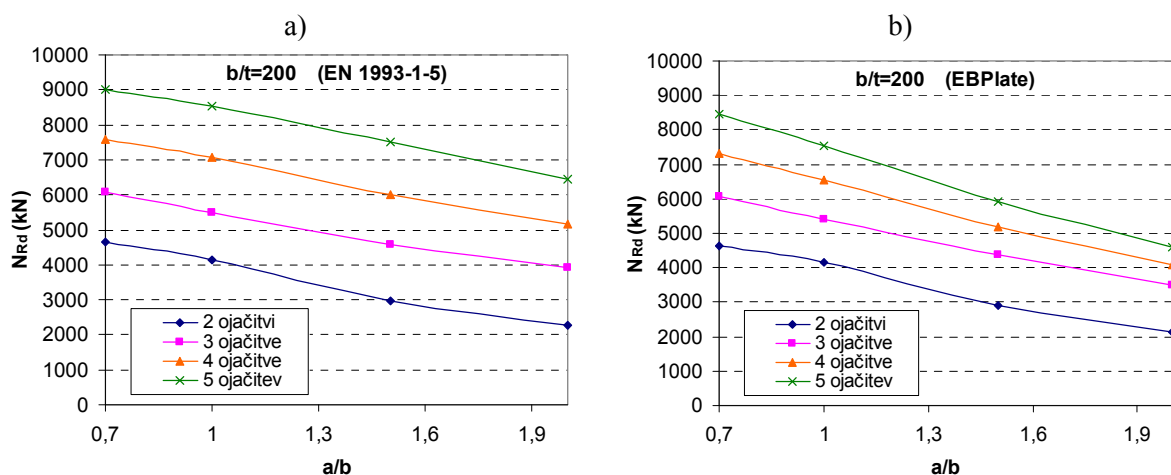
Slika 90: Primerjava koeficientov ρ_c v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja α

Tlačna nosilnost se z večanjem razmerja α zmanjšuje. Pri računu po standardu z večanjem števila ojačitev skoraj linearno narašča, pri računu s programom EBPlate pa je prirastek nosilnosti pri večjem številu ojačitev manjši, zlasti pri večjem razmerju α . (Slika 91)

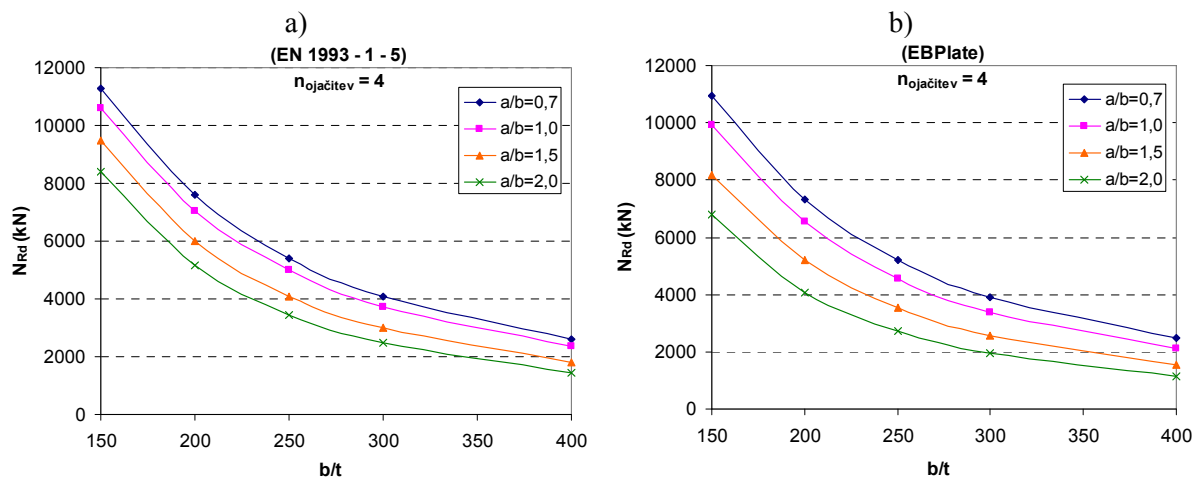


Slika 91: Primerjava nosilnosti N_{Rd} v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja α

Razlike med rezultati $N_{Rd}(EN)$ in $N_{Rd}(EBPlate)$ so najmanjše pri majhnem številu ojačitev in majhnem razmerju α (Slika 92).



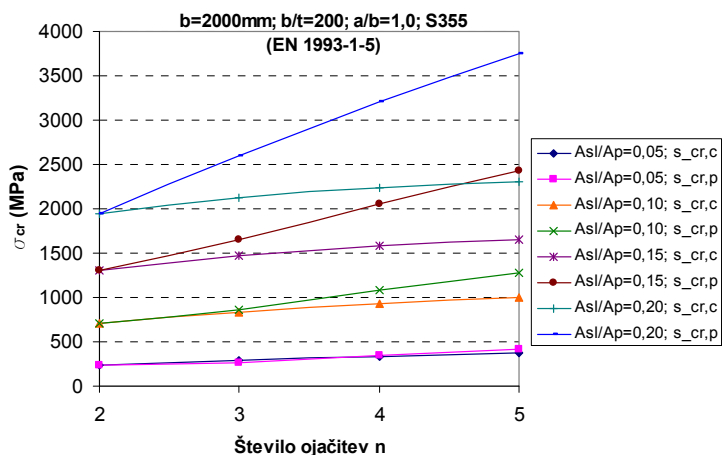
Slika 92: Primerjava nosilnosti N_{Rd} v odvisnosti od razmerja α za različno število vzdolžnih ojačitev



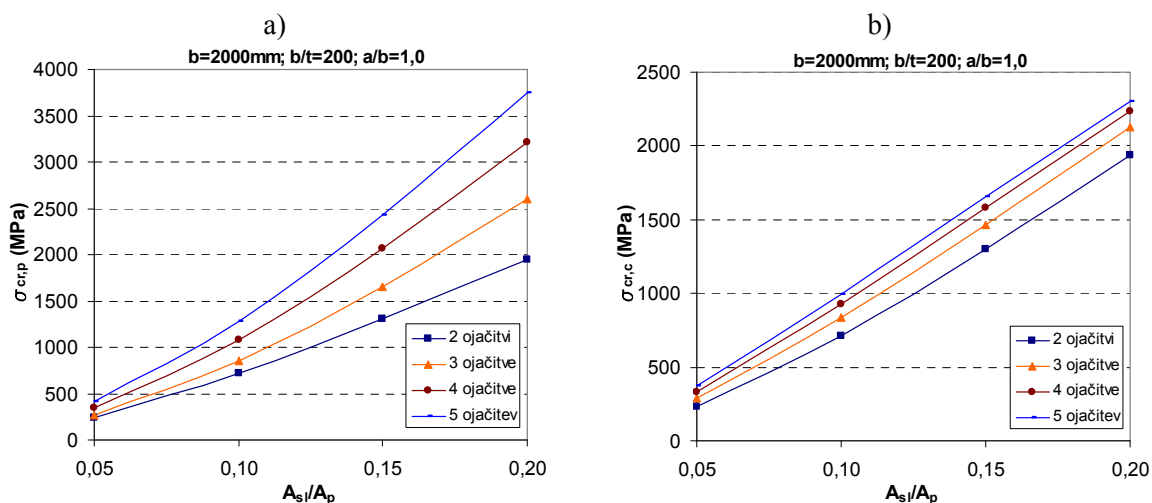
Slika 93: Primerjava nosilnosti N_{Rd} v odvisnosti od vitkosti pločevine za različna razmerja α

4.2.3.3 Vpliv razmerja površin prečnih prerezov ojačitve in pločevine A_{sl}/A_p

Standard: Z večanjem razmerja površin A_{sl}/A_p se kritične napetosti povečujejo (Slika 94). Pri tem se povečuje tudi sprememba kritičnih napetosti izbočenja panela $\sigma_{cr,p}$ zaradi povečanja ali zmanjšanja števila vzdolžnih ojačitev, medtem ko je sprememba kritičnih napetosti uklona $\sigma_{cr,c}$ pri vseh razmerjih A_{sl}/A_p približno enaka (Slika 95).

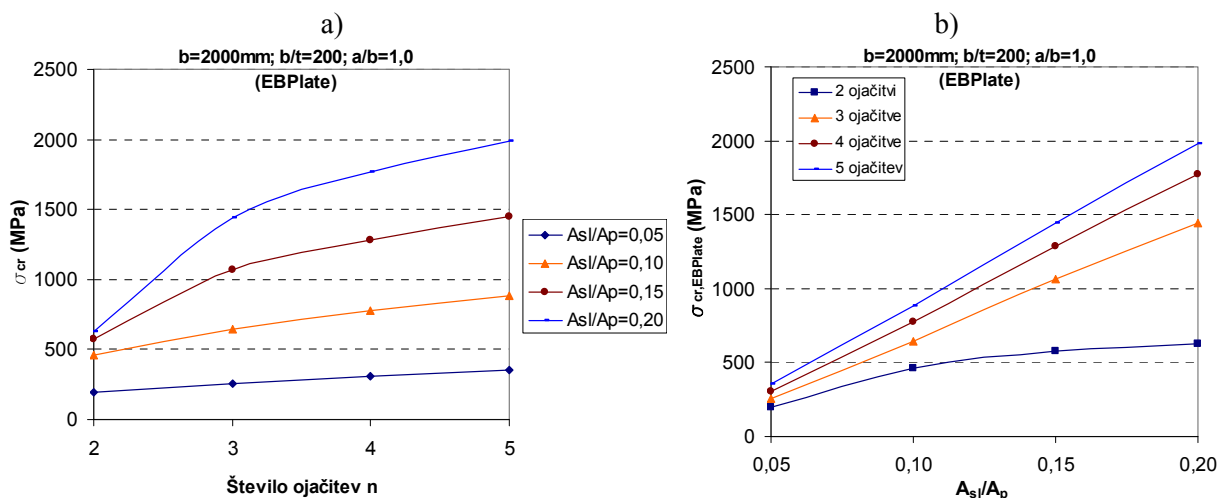


Slika 94: $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja prevezov A_{sl}/A_p



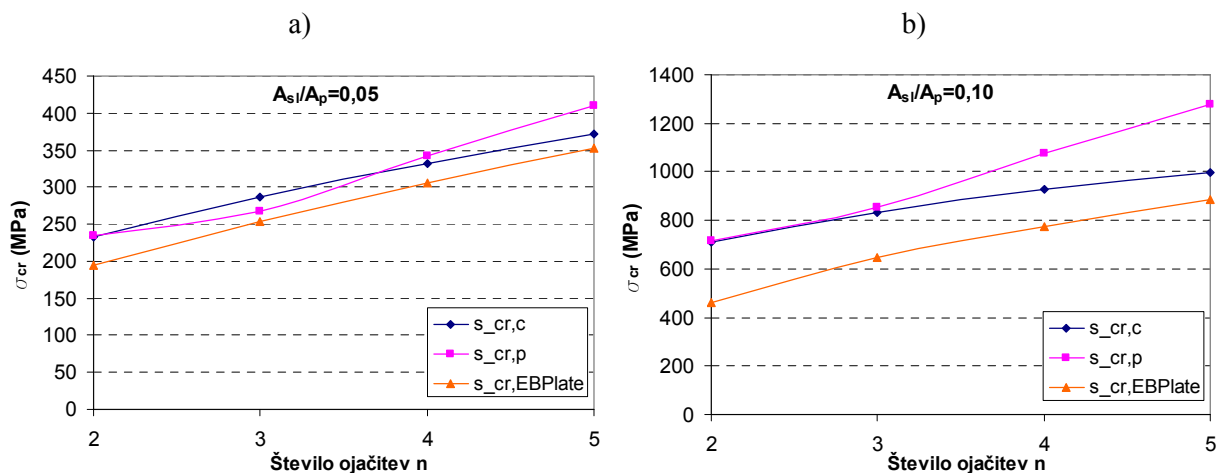
Slika 95: a) $\sigma_{cr,p}$ in b) $\sigma_{cr,c}$ v odvisnosti od razmerja A_{sl}/A_p za različno število vzdolžnih ojačitev

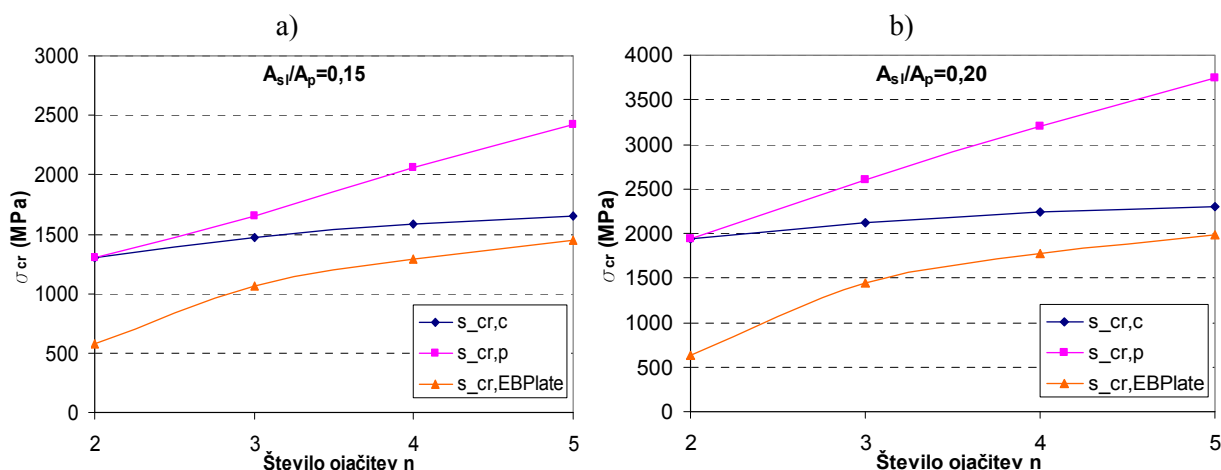
Program EBPlate: Tudi tu se kritične napetosti z večanjem razmerja A_{sl}/A_p povečujejo (Slika 96a). V primeru dveh ojačitev je to povečanje zelo majhno, z večanjem števila ojačitev pa se povečuje (Slika 96b).



Slika 96: a) $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja A_s/A_p in b) $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od razmerja A_s/A_p za različno število vzdolžnih ojačitev

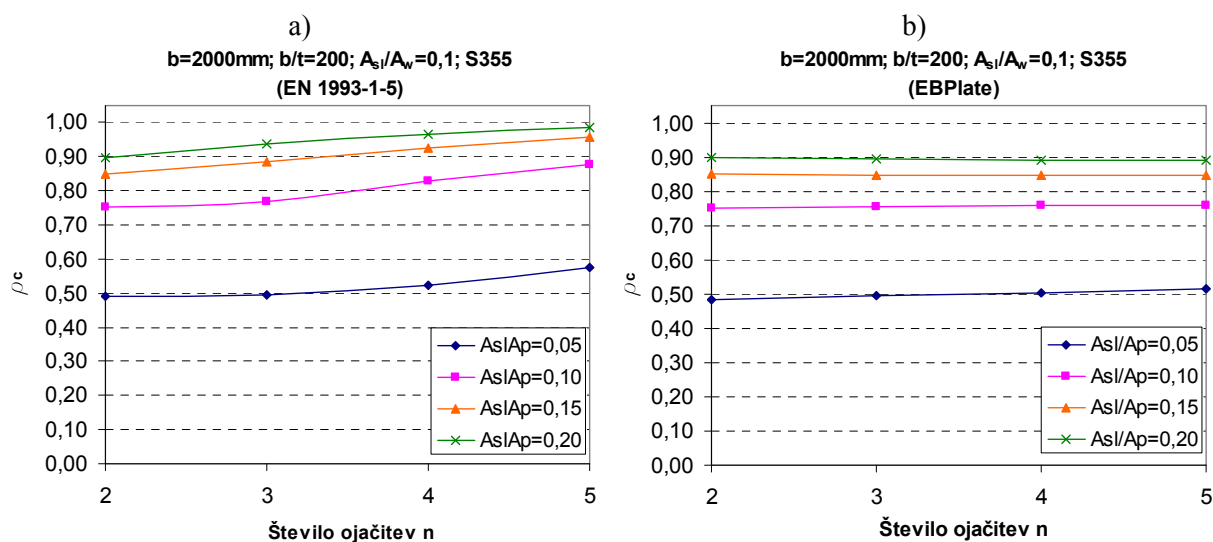
Če primerjamo kritične napetosti za posamezna razmerja površin A_s/A_p , ugotovimo, da so odstopanja med rezultati obeh načinov računa večja pri večjem razmerju A_s/A_p . Kritične napetosti izbočenja panela $\sigma_{cr,EBPlate}$ so v vseh primerih manjše od kritičnih napetosti uklona $\sigma_{cr,c}$.





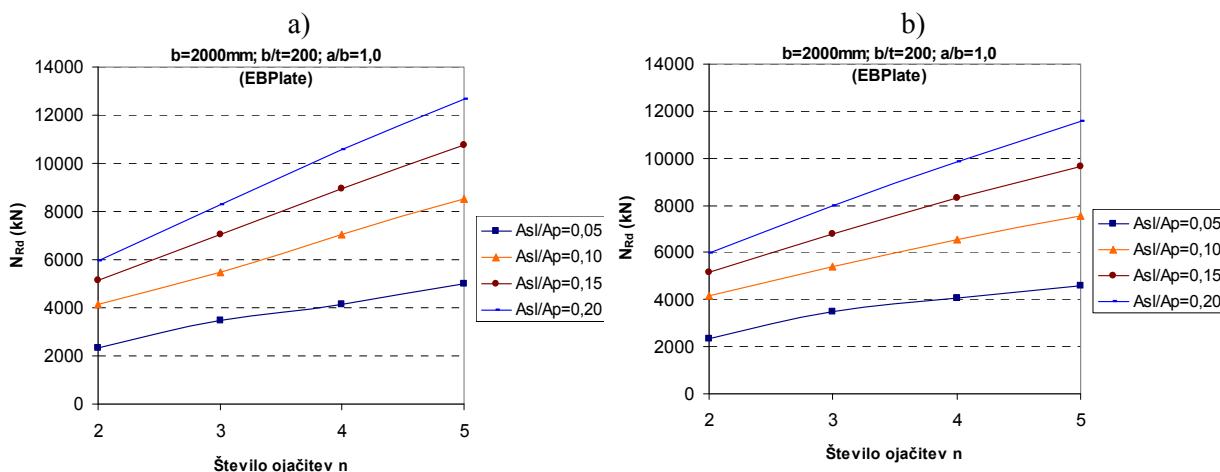
Slika 97: Primerjava $\sigma_{cr,p}$, $\sigma_{cr,c}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja A_{s1}/A_p , za primer: $b=2000\text{mm}$; $b/t=200$; $a/b=1,0$ in S355

Redukcijski koeficienti ρ_c so si pri majhnem številu ojačitev ($n=2$) zelo podobni kljub velikim odstopanj med vrednostmi kritičnih napetosti. Z večanjem števila ojačitev se ρ_c pri računu po standardu povečuje (4.10), v primeru računa z napetostmi $\sigma_{cr,EBPlate}$ pa je enak redukcijskemu koeficientu χ_c (4.11) in je povečanje pri razmerjih $A_{s1}/A_p=0,05$ in $0,10$ zelo majhno, pri večjih razmerjih A_{s1}/A_p pa se redukcijski koeficient malo zmanjšuje (Slika 98).

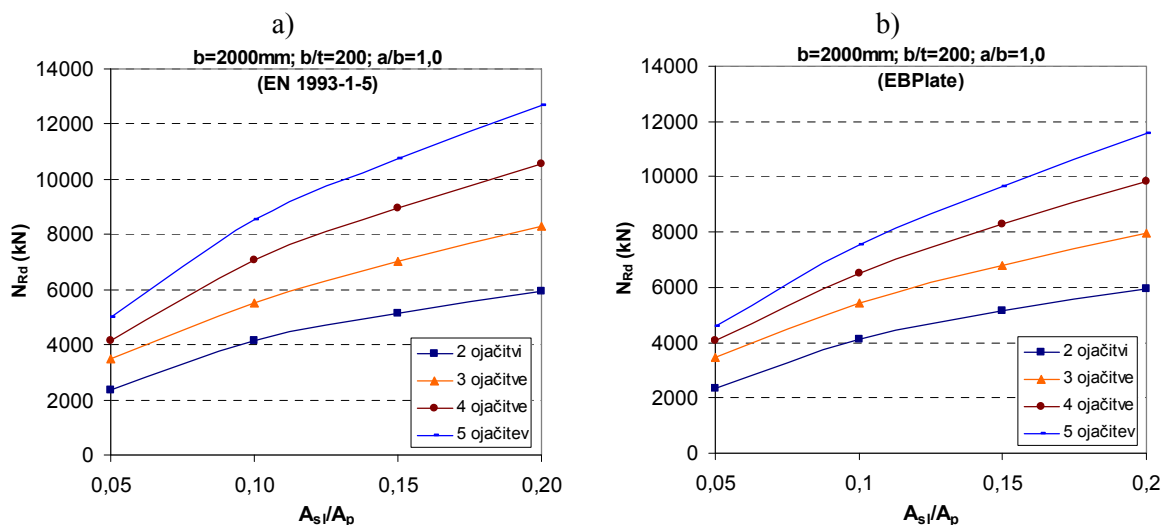


Slika 98: Primerjava koeficientov ρ_c v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja A_{s1}/A_p

Tlačna nosilnost se z večanjem razmerja A_{s1}/A_p povečuje (Slika 99). Razlike med rezultati obeh načinov računa se večjo z večanjem števila ojačitev ter z večanjem razmerja A_{s1}/A_p , pri tem so nosilnosti, izračunane po standardu, večje (nevarna stran) (Slika 100).



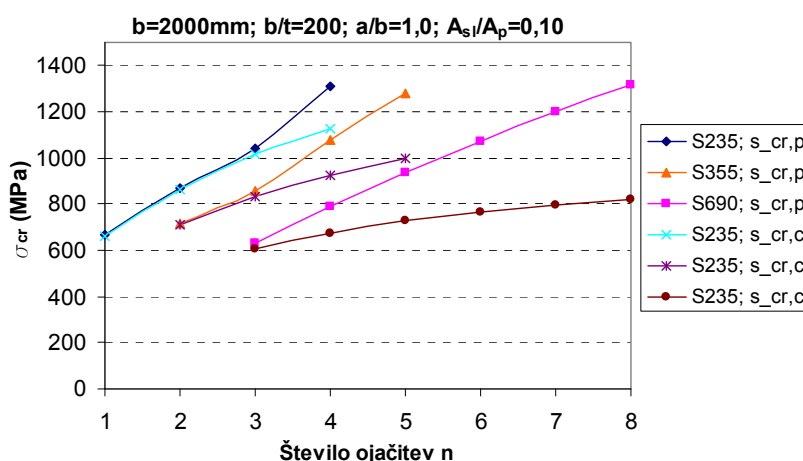
Slika 99: Primerjava nosilnosti N_{Rd} v odvisnosti od števila vzdolžnih ojačitev za različna razmerja A_{s1}/A_p



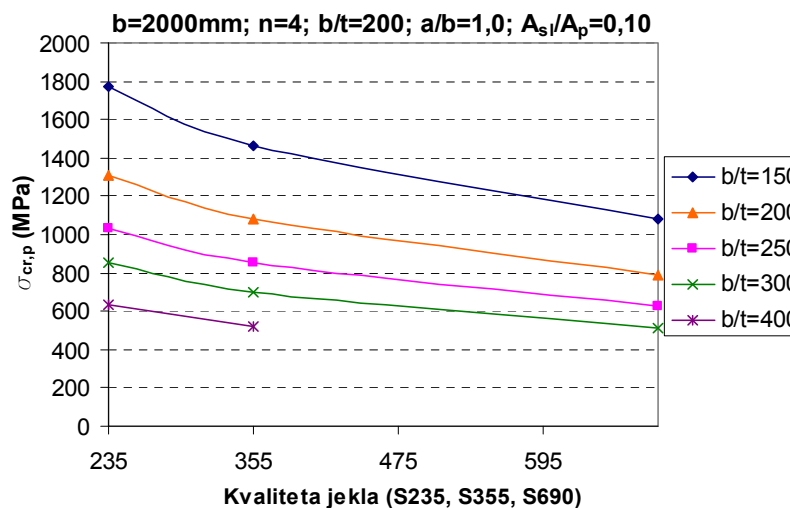
Slika 100: Primerjava nosilnosti N_{Rd} v odvisnosti od A_{s1}/A_p za različno število vzdolžnih

4.2.3.4 Vpliv kvalitete jekla (S235, S355, S690)

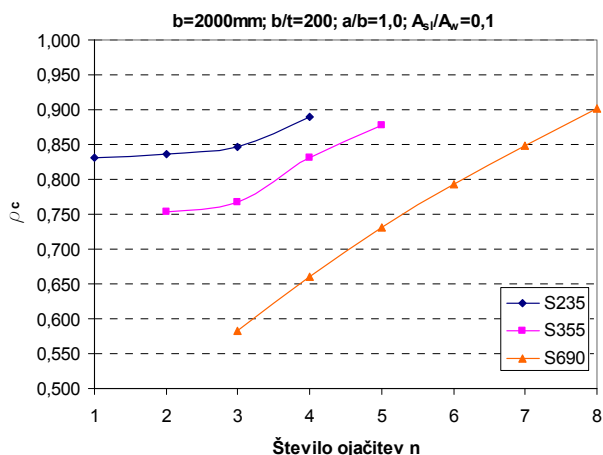
Z večanjem trdnosti jekla se kritične napetosti zmanjšujejo (Slika 102), pri tem ostaja vpliv števila ojačitev na spremembo kritičnih napetosti podoben (Slika 101). Redukcijski koeficienti so pri jeklu visoke trdnosti bistveno manjši (Slika 103), še vedno pa je tlačna nosilnost večja (Slika 105). Pri večjih vitkostih pločevine je povečanje nosilnosti zaradi kvalitete jekla manjše (Slika 104).



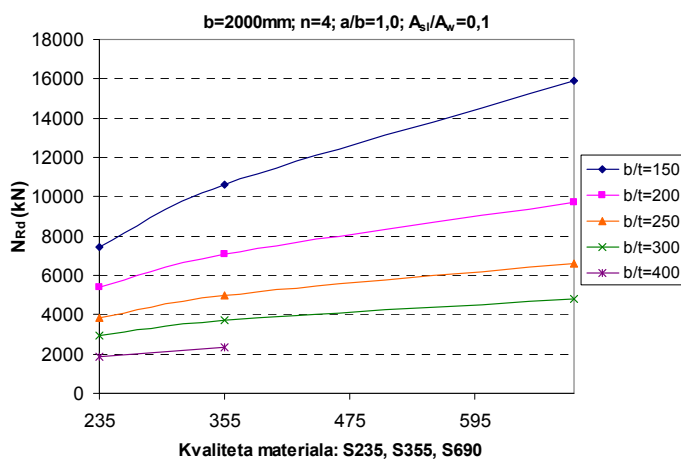
Slika 101: Kritične napetosti v odvisnosti od števila ojačitev pri različnih kvalitetah jekla



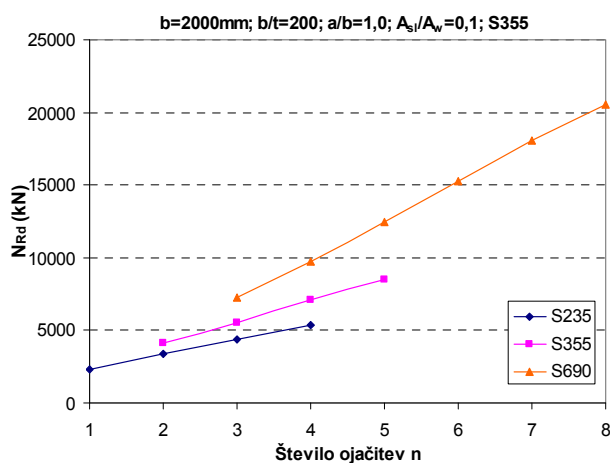
Slika 102: Kritične napetosti $\sigma_{cr,p}$ v odvisnosti od kvalitete jekla za različne vitkosti pločevine



Slika 103: Redukcijski koeficient v odvisnosti od števila ojačitev za različne kvalitete jekla



Slika 104: Tlačna nosilnost N_{Rd} v odvisnosti od kvalitete jekla za različne vitkosti pločevine



Slika 105: : Tlačna nosilnost N_{Rd} v odvisnosti od števila ojačitev pri različnih kvalitetah jekla

5 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo obravnavali problem izbočenja pločevin, ojačanih z vzdolžnimi ojačitvami, zaradi delovanja normalnih napetosti. Po pravilih za dimenzioniranje ravnih pločevinastih konstrukcij, ki jih določa standard EN 1993-1-5, smo izračunali upogibne in tlačne nosilnosti večjega števila vzdolžno ojačanih polnostenskih nosilcev različnih geometrij. Pri tem smo analizirali vpliv različnih geometrijskih parametrov na izbočenje in nosilnost. Elastične kritične napetosti izbočenja ojačanega panela $\sigma_{cr,p}$ smo izračunali tudi z računalniškim programom EBPlate ter z njimi po standardu določili nosilnost. V parametrični analizi smo primerjali rezultate obeh načinov računa in prišli do naslednjih ugotovitev:

1.) Primer upogibno obremenjenega I-profila z eno vzdolžno ojačitvijo:

- Kritične napetosti: Razlike med kritičnimi napetostmi v odvisnosti od položaja ojačitve so velike, ko je ojačitev blizu pasnice ter blizu sredine višine stojine. Napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ so tu veliko manjše od napetosti $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$. Najboljše ujemanje vrednosti kritičnih napetosti je pri položajih ojačitve v sredini tlačene cone. Razlike se večajo z večanjem vitkosti stojine, z manjšanjem razmerja α ter z večanjem razmerja prerezov A_{sl}/A_w .

- Upogibna nosilnost: Razlike v nosilnosti niso skladne z razlikami med napetostmi $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$. Razlog za to je v načinu določanja redukcijskega koeficienta ρ_c s katerim se upošteva vpliv kritičnih napetosti na nosilnost. Koeficient ρ_c upošteva interakcijo med $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$, pri tem pa omejuje napetost $\sigma_{cr,p}$ tako, da je vedno $\sigma_{cr,p} \geq \sigma_{cr,c}$. Ker je $\sigma_{cr,EBPlate}$ večinoma manjša od $\sigma_{cr,c}$, se torej vzame, da je $\sigma_{cr,EBPlate} = \sigma_{cr,c}$, in do razlik v nosilnosti pride le, če je $\sigma_{cr,p}$ bistveno večja od $\sigma_{cr,c}$. Tako so večja odstopanja v nosilnosti pri različnih vitkosti stojine, ko je ojačitev blizu pasnice, pri večjem razmerju α in pri majhnem razmerju A_{sl}/A_w . Pri tem je nosilnost, ki je v celoti izračunana po standardu, večja in zato na nevarni strani. S primerjavo povečanja nosilnosti pri najbolj učinkovitem položaju ojačitve, ugotovimo, da je ujemanje rezultatov $M_{Rd,max}(EN)$ in $M_{Rd,max}(EBPlate)$ pri vseh vitkosti stojine zelo dobro pri manjšem razmerju α , $\alpha=0,7$ in $1,0$, ter za velikosti parametra $A_{sl}/A_w=0,10$; $0,15$ in $0,20$.

Največja odstopanja so pri $\alpha=2,0$ in vitkosti $h_w/t_w=400$, kjer so vrednosti $M_{Rd}(EN)$ za približno 10% večje, ter pri $A_{sl}/A_w=0,05$ in vitkosti $h_w/t_w=300$ in 400 , kjer je $M_{Rd}(EN)$ za približno 2% večji. Razlike so največje pri legi ojačitve blizu pasnice, in sicer pri razmerju

$\alpha=2,0$ in velikih vitkosti $h_w/t_w=300$ in 400 , kjer je $M_{Rd}(EN)$ za 10% večji od $M_{Rd}(EBPlate)$ ter pri razmerju $A_{sl}/A_w=0,05$ in vitkosti $h_w/t_w=150$, kjer je $M_{Rd}(EN)$ za 7% večji od $M_{Rd}(EBPlate)$. Standard je za vse vrednosti parametrov na nevarni strani.

2.) Primer upogibno obremenjenega I-profila z dvema vzdolžnima ojačitvama:

- Kritične napetosti: Spreminjanje napetosti v odvisnosti od položaja ojačitev je podobno kot pri prerezu z eno ojačitvijo, s tem da so razlike med $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ večje. Odstopanja od rezultatov $\sigma_{cr,EBPlate}$ so pri obeh skrajnih položajih ojačitev (blizu pasnice ter blizu nevtralne osi) manjša kot v primeru ene ojačitve. Napetosti $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ se najbolj ujemajo, ko je ojačitev, ki je bližje pasnici, na razdalji $z_{sl,l}=0,10h_w$ do $0,166h_w$, pri tem pa so razlike večje v primeru zelo majhne vitkosti stojine ($h_w/t_w=150$) in zelo velike vitkosti stojine ($h_w/t_w=400$). Povečanje parametra α vpliva na povečanje razlike med $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$, napetosti $\sigma_{cr,EBPlate}$ pa pri $\alpha=1,5$ in $2,0$ postanejo večje od $\sigma_{cr,p}$. Z večanjem razmerja A_{sl}/A_w se napetosti podobno povečujejo v obeh primerih računa. Največja odstopanja med napetostmi $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ so pri majhnem razmerju $A_{sl}/A_w=0,05$.

- Upogibna nosilnost: Če primerjamo povečanje nosilnosti pri najbolj učinkovitem položaju ojačitev, se izkaže, da se rezultati $M_{Rd}(EN)$ in $M_{Rd}(EBPlate)$ pri vseh vitkosti stojine zelo dobro ujemajo, ko je razmerje α majhno, $\alpha=0,7$ in $1,0$, in razmerje prerezov $A_{sl}/A_w=0,10$. Največja odstopanja so pri $\alpha=2,0$ in vitkosti $h_w/t_w=250$, kjer so vrednosti $M_{Rd}(EN)$ za približno 7% večje (nevarna stran), ter pri $A_{sl}/A_w=0,05$ in vitkosti $h_w/t_w=150$, kjer je $M_{Rd}(EN)$ za približno 4% manjši (varna stran). Razlike so največje pri legi ojačitve blizu pasnice, in sicer pri razmerju $\alpha=2,0$ in vitkosti $h/t=250$, kjer je $M_{Rd}(EN)$ za 6% manjši od $M_{Rd}(EBPlate)$ ter pri razmerju $A_{sl}/A_w=0,05$ in vitkosti $h_w/t_w=150$, kjer je $M_{Rd}(EN)$ za 3% manjši od $M_{Rd}(EBPlate)$. V tem primeru je standard je na varni strani.

3.) Primer tlačno obremenjene pločevine z eno, dvema ali več vzdolžnimi ojačitvami:

- Kritične napetosti: Z večanjem števila ojačitev se povečuje razlika med $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,c}$ ($\sigma_{cr,p} > \sigma_{cr,c}$) pri tem pa so napetosti $\sigma_{cr,EBPlate} < \sigma_{cr,c}$. Vpliv števila ojačitev na kritične uklonske napetosti $\sigma_{cr,c}$ se z večanjem vitkosti pločevine zmanjšuje, napetosti $\sigma_{cr,p}$ pa se zaradi spremembe števila ojačitev pri vseh vitkosti pločevine podobno spreminjajo. Odstopanja med $\sigma_{cr,p}$ in $\sigma_{cr,EBPlate}$ so večja pri manjšem razmerju α in velikem razmerju A_{sl}/A_p .

- Tlačna nosilnost: Pri majhnem številu ojačitev so odstopanja nosilnosti $N_{Ra}(EN)$ in $N_{Ra}(EBPlate)$, kljub velikim razlikam v vrednostih kritičnih napetosti zelo majhna. Odstopanja se povečujejo se z večanjem števila ojačitev, večanjem vitkosti pločevine b/t , večanjem razmerja α in večanjem razmerja A_{sl}/A_p .

VIRI

Beg, D. 1999. Projektiranje jeklenih konstrukcij po evropskem predstandardu ENV 1993-1-1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 219 str.

European standard prEN 1993-1-5: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements, CEN – European Committee For Standardization. Brussels, September 2005.

Johansson, B., Maquoi, R., Sedlacek, G., Müller, C., Beg, D. 2005. Commentary to EN 1993-1-5 "Plated Structural elements", Final draft: 213 str.

Galéa, Y., Martin, P. 2006. Presentation Manual of EBPlate. Liege, CTICM – Centre Technique Industriel de la Construction Métallique: 48 str.

Plates and Shells: Lecture 8.1, 8.2, 8.3

<http://www.kuleuven.ac.be/bwk/materials/Teaching/master/wg08/toc.htm> (23.2.2007)