

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Lužar, G., 2013. Podrobna analiza vpliva geometrijskih nepopolnosti na nosilnost vzolžno ojačanih pločevin. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Beg, D., somentor Rejec, K.): 120 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Lužar, G., 2013. Podrobna analiza vpliva geometrijskih nepopolnosti na nosilnost vzolžno ojačanih pločevin. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Beg, D., co-supervisor Rejec, K.): 120 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

GAŠPER LUŽAR

**PODROBNA ANALIZA VPLIVA GEOMETRIJSKIH
NEPOPOLNOSTI NA NOSILNOST VZOLŽNO
OJAČANIH PLOČEVIN**

Diplomska naloga št.: 3321/KS

**DETAILED ANALYSIS OF THE EFFECTS OF INITIAL
GEOMETRIC IMPERFECTIONS ON
LONGITUDINALLY STIFFENED PLATES**

Graduation thesis No.: 3321/KS

Mentor:
prof. dr. Darko Beg

Predsednik komisije:
izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:
dr. Klemen Rejec

Član komisije:
izr. prof. dr. Marijan Žura

Ljubljana, 02. 07. 2013

IZJAVE

Podpisani Gašper Lužar izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »**Podrobna analiza vpliva geometrijskih nepopolnosti na nosilnost vzdolžno ojačanih pločevin**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 20.6.2013

Gašper Lužar

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.014.2(043.2)
Avtor:	Gašper Lužar
Mentor:	prof. dr. Darko Beg
Somentor:	dr. Klemen Rejec
Naslov:	Podrobna analiza geometrijskih nepopolnosti na nosilnost vzdolžno ojačanih pločevin
Tip dokumenta:	Dipl. nal.-UNI
Obseg in oprema:	120 str., 107 pregl., 72 sl., 37 en.
Ključne besede:	jeklene konstrukcije, izbočenje pločevin, geometrijske nepopolnosti pločevin, vzdolžne ojačitve

Izvleček:

V diplomski nalogi obravnavamo strižno in tlačno obremenjene vitke pločevine, ojačene z vzdolžnimi ojačitvami. Posebnost vitkih pločevin je, da po izbočenju ne izgubijo nosilnosti, ampak izkazujejo veliko post-kritično nosilnost. Vitke pločevine so občutljive na velikost in obliko začetnih nepopolnosti, zato je v računskih analizah pravilna izbira nepopolnosti zelo pomembna. Pravila za dimenzioniranje ojačenih in neojačenih pločevin so zajeta v standardu SIST EN 1993-1-5, ki podaja predlog oblike začetne nepopolnosti in omejitev največje dovoljene amplitude nepopolnosti. Oblike nepopolnosti, ki jih priporoča standard, niso nujno najbolj neugodne. Zato je bila v okviru diplomske naloge opravljena obširna študija s katero smo določili najbolj neugodne začetne nepopolnosti ob upoštevanju toleranc in tehnoloških omejitev za tankostenske ojačene pločevine. Pri tem smo uporabili napredno optimizacijsko metodo, ki je bila razvita na Katedri za metalne konstrukcije. Obravnavali smo vitke ojačene pločevine z reprezentativno geometrijo. Upoštevali smo obtežna primera, kjer smo pločevine obremenili v čistem strigu oz. enakomernem tlaku. Pogoja optimizacijskega problema sta bila največja dovoljena amplituda nepopolnosti in ukrivljenost nepopolne geometrije. Vrednost največje amplitude smo povzeli po SIST EN 1993-1-5. Meje za največjo ukrivljenost pa smo opredelili sami. Opazovali smo vpliv razmerja dolžin stranic pločevine, vitkosti pločevin ter števila in togosti vzdolžnih ojačitev na obliko najbolj neugodne začetne nepopolnosti. V primerjavi z oblikami nepopolnosti, ki so predlagane v SIST EN 1993-1-5, dobljene najbolj neugodne oblike nepopolnosti izkazujejo do 10% nižjo nosilnost v primeru obremenitve s čistim strigom oz. do 5% v primeru enakomerne tlačne obremenitve. Ugotovili smo tudi, da so najbolj neugodne oblike nepopolnosti zelo podobne deformacijskim oblikam pri doseženem mejnem stanju nosilnosti.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK: 624.014.2(043.2)

Author: Gašper Lužar

Supervisor: prof. Darko Beg, Ph.D

Cosupervisor: Klemen Rejec, Ph.D

Title: Detailed analysis of the effects of initial geometric imperfections on longitudinally stiffened plates

Document type: Graduation Thesis – University studies

Notes: 120 p., 107 tab., 72 fig., 37 eq.

Key words: steel structures, plate buckling, worst initial imperfections, longitudinal stiffeners

Abstract:

The graduate thesis addresses slender longitudinally stiffened steel plates subjected to pure shear and uniform compression respectively. After buckling such plates develop significant post-critical resistance, which is not the case for column buckling. The resistance of slender plates is highly dependent on the amplitude and shape of the initial imperfections. Therefore reliable imperfections should be taken in account when evaluating the resistance of slender plates. The theoretical background and procedures for the design of plated structures are given in SIST EN 1993-1-5 design code. The code recommends the initial imperfection shape and the limit of imperfect plate maximal amplitude, which should be considered in numerical analyses. It is known that such imperfection shapes are not necessarily the worst possible. The present thesis contains an extended study, which deals with seeking the most unfavourable initial imperfection shape for representative stiffened slender plates. The tolerance and technical constraints for slender plates were considered. For this purpose, an advanced optimization method for direct determination of the most unfavourable imperfection of structures developed at the Chair of Steel Structures was utilized. The constraints of the optimization process were represented by maximal allowable imperfection amplitude obtained from SIST EN 1993-1-5 and maximal curvature of the imperfect geometry. The boundaries for the maximal allowable curvature have been developed specifically in the context of the thesis. Pure shear and uniform compression load cases were considered. The influence of the plate aspect ratio, slenderness ratio, number of longitudinal stiffeners and its geometric parameters on the shape of worst initial imperfection was investigated. In the case of plates subjected to uniform compression, the resistances considering the most unfavourable imperfection are up to 10% lower than those obtained by considering the imperfections suggested in the code. In the case of pure shear, the resistances are up to 5% lower. It was also found out, that the worst initial imperfection shape is very similar to the deformation shape of the plate at the limit state.

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. Darku Begu za mentorstvo, usmerjanje in koristne nasvete pri pisanju diplomske naloge

Posebna zahvala gre somentorju dr. Klemnu Rejcu za pomoč, spodbudo in vsa znanja, ki jih je z mano delil tekom raziskovanja in mi pomagal z nasveti in konstruktivnimi debatami.

Zahvala gre tudi asist. dr. Francu Sinurju, ki je rade volje prisluhnil mojim vprašanjem in bil vedno pripravljen sodelovati pri reševanju problemov.

Hvala Tamari, Sari, Mateju, Alenu in Mihi, ki so poskrbeli za prijetno delovno vzdušje in pomagali s konstruktivnimi komentarji.

Hvala mami, očetu, Domnu in Žanu, ki so mi v času študija stali ob strani, dajali motivacijo in me spodbujali.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	IZBOČENJE PLOČEVIN ZARADI NORMALNIH IN STRIŽNIH OBREMENITEV	2
2.1	Normalne napetosti	2
2.2	Strižne napetosti	4
3	METODE DELA	5
3.1	Uvod	5
3.2	Opis metode	5
3.3	Določitev najbolj neugodne začetne nepopolnosti	6
3.4	Opis algoritma	6
3.5	Optimizacijski problem	8
3.6	Direktna in občutljivostna analiza	8
3.7	Nastavki	9
3.7.1	Fourierjevi nastavki	9
3.7.2	Posebno definirani nastavki (t.i. ročni nastavki)	12
4	OMEJITVE	13
4.1	Definicija začetnih nepopolnosti v računalniških programih	13
4.2	Definicija omejitev v obravnavanih primerih	14
4.2.1	Primerjava ukrivljenosti v odvisnosti od vitkosti pločevine	16
4.2.2	Krivulje ukrivljenosti v odvisnosti od širine panela v primerjavi z ukrivljenostjo na meji tečenja (alternativni prikaz)	20
4.2.3	Uporaba omejitev ukrivljenosti na računskih primerih	21
5	ANALIZA NAJBOLJ NEUGODNE ZAČETNE NEPOPOLNOSTI PLOČEVIN OBREMENJENIH S ČISTIM STRIGOM	24
5.1	Opis modela	24
5.1.1	Geometrija	24
5.1.2	Material	24
5.1.3	Robni pogoji	24
5.1.4	Obtežba	24
5.2	Občutljivostna analiza	25
5.2.1	Primer ene vzdolžne ojačitve ($\alpha=1$; $\gamma=16,4$; $b/t=100$)	26
5.2.1.1	Število Fourierjevih nastavkov	26
5.2.1.2	Število ročnih nastavkov	28

5.2.1.3	Gostota mreže	30
5.2.1.4	Primerjava in zaključki	31
5.2.2	Primer dveh vzdolžnih ojačitev ($\alpha=1$; $\gamma=16,4$; $b/t=66,7$).....	33
5.2.2.1	Število Fourierjevih nastavkov.....	33
5.2.2.2	Število ročnih nastavkov	35
5.2.2.3	Gostota mreže	36
5.2.2.4	Primerjava in zaključki	36
5.2.3	Primer štirih vzdolžnih ojačitev ($\alpha=1$; $\gamma=16,4$; $b/t=40$)	39
5.2.3.1	Število Fourierjevih nastavkov.....	39
5.2.3.2	Število ročnih nastavkov	39
5.2.3.3	Gostota mreže	40
5.2.3.4	Primerjava in zaključki	40
5.2.4	Zaključki občutljivostne analize	43
5.3	Parametrična študija.....	43
5.3.1	Analiza pločevin z eno vzdolžno ojačitvijo.....	46
5.3.1.1	Pločevine 1Oj_2.....	47
5.3.1.2	Pločevine 1Oj_3.....	47
	Pločevine 1Oj_4	53
5.3.1.3	Primerjava faktorja nosilnosti	55
5.3.2	Analiza pločevin z dvema vzdolžnima ojačitvama	57
5.3.2.1	Pločevine 2Oj_1.....	57
5.3.2.2	Pločevine 2Oj_2.....	57
5.3.2.3	Pločevine 2Oj_3.....	65
5.3.2.4	Pločevine 2Oj_4.....	68
5.3.2.5	Primerjava faktorja nosilnosti	70
5.3.3	Analiza pločevin s štirimi vzdolžnimi ojačitvami.....	72
5.3.3.1	Pločevine 4Oj_2.....	72
5.3.3.2	Pločevine 4Oj_3.....	76
5.3.3.3	Primerjava faktorja nosilnosti	79
5.4	Izbira začetne nepopolnosti v prvem iteracijskem koraku strižno obremenjenih pločevin	79
5.5	Vpliv omejitve ukrivljenosti na obliko nepopolnosti in faktor nosilnosti.....	80
5.6	Praktičen primer – konzola	83

5.7 Zaključek	86
6 ANALIZA NAJBOLJ NEUGODNE ZAČETNE NEPOPOLNOSTI PLOČEVIN OBREMENJENIH S ČISTIM TLAKOM	88
6.1 Opis modela	88
6.2 Nastavki	88
6.3 Občutljivostna analiza	89
6.3.1 Število Fourierjevih nastavkov	90
6.3.2 Število ročnih nastavkov	91
6.3.3 Število kontinuirnih ročnih nastavkov	92
6.3.4 Gostota mreže končnih elementov.....	93
6.4 Parametrična študija	93
6.4.1 Ojačene pločevine z razmerjem stranic $\alpha=1,0$	94
6.4.1.1 Pločevine a1_1	95
6.4.1.2 Pločevine a1_2	97
6.4.1.3 Pločevine a1_3	100
6.4.1.4 Primerjave	103
6.4.2 Ojačene pločevine z razmerjem stranic $\alpha=0,5$	105
6.4.2.1 Pločevine a0,5_1	106
6.4.2.2 Pločevine a0,5_2	107
6.4.2.3 Pločevine a0,5_3	108
6.4.2.4 Primerjave	109
6.5 Izbira začetne oblike nepopolnosti in vpliv omejitve ukrivljenosti na obliko nepopolnosti in faktor nosilnosti	111
6.6 Zaključek	116
7 SKLEP	118
VIRI	119

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Grafičen prikaz ročnih nastavkov na prečnem prerezu pločevine	12
Preglednica 2: Nadomestne geometrijske nepopolnosti (Preglednica C.2 v EN 1993-1-5, Dodatek C).....	13
Preglednica 3: Omejitve amplitud nepopolnosti iz standarda EN 1993-1-5	14
Preglednica 4: Označevanje oblik	14
Preglednica 5: Robni pogoji za primer A	15
Preglednica 6: Robni pogoji za primer B	15
Preglednica 7: Označevanje oblik	16
Preglednica 8:Primerjava ukrivljenosti med primeri A in B za $b/t=35$	18
Preglednica 9: Primerjava ukrivljenosti med primeri A in B za $b/t =50$	18
Preglednica 10: Primerjava ukrivljenosti med primeri A in B za $b/t=75$	18
Preglednica 11:Primerjava ukrivljenosti med primeri A in B za $b/t =100$	18
Preglednica 12: Vrednost ukrivljenosti med največjo in najmanjšo vrednostjo za $t=10$ mm ..	19
Preglednica 13: Kritične širine in vitkosti pločevin	21
Preglednica 14: Geometrijske karakteristike analiziranih pločevin.....	21
Preglednica 15: Primerjava oblik nepopolnosti pri različnih omejitvah ukrivljenosti.....	22
Preglednica 16: Geometrijske karakteristike obravnavanih pločevin v občutljivostni analizi .	25
Preglednica 17: Grafičen prikaz aplikacije globalne in lokalne oblike nepopolnosti na pločevine	26
Preglednica 18: Nosilnost pločevine za različne tipe mrež končnih elementov (ena ojačitev)	30
Preglednica 19: Tabele računsko približno ali popolno ekvivalentnih Fourierjevih in ročnih nastavkov za eno ojačitev	32
Preglednica 20: Primerjava faktorjev nosilnosti nepopolnih pločevin z eno ojačitvijo.....	33
Preglednica 21: Primerjava oblike nepopolnosti za $N_{FouRed}=2$	34
Preglednica 22: Nosilnost pločevine za različne tipe mrež končnih elementov (dve ojačitvi) 36	
Preglednica 23: Tabele računsko približno ali popolno ekvivalentnih Fourierjevih in ročnih nastavkov za dve ojačitvi	38
Preglednica 24: Primerjava faktorjev nosilnosti nepopolnih pločevin z dvema ojačitvama....	38
Preglednica 25: Nosilnost pločevine za različne tipe mrež končnih elementov (štiri ojačitve)40	
Preglednica 26: Tabele računsko približno ali popolno ekvivalentnih Fourierjevih in ročnih nastavkov za štiri ojačitve	42

Preglednica 27: Primerjava faktorjev nosilnosti nepopolnih pločevin s štirimi ojačitvami	42
Preglednica 28: Primeri pločevin z eno ojačitvijo.....	44
Preglednica 29: Primeri pločevin z dvema ojačitvama.....	45
Preglednica 30: Primeri pločevin s štirimi ojačitvami	45
Preglednica 31: Redukcija strižne nosilnosti po postopku iz Evrokoda za pločevine z eno ojačitvijo.....	46
Preglednica 32: Pločevine 1Oj_3	47
Preglednica 33: Najbolj neugodne oblike nepopolnosti pločevine 1Oj_3.....	48
Preglednica 34: Primerjava oblike nepopolnosti in deformacijske oblike za 1Oj_3 s Fourierjevimi nastavki	49
Preglednica 35: Primerjava oblike nepopolnosti in deformacijske oblike za 1Oj_3 z ročnimi nastavki	50
Preglednica 36: Primerjava nosilnosti pločevin 1Oj_3.....	50
Preglednica 37: Deviacija oblike po iteracijah za 1Oj_3	52
Preglednica 38: Pločevine 1Oj_4	53
Preglednica 39: Primerjava nosilnosti pločevin 1Oj_4.....	54
Preglednica 40: Primerjave nosilnosti vseh obravnavanih primerov pločevin 1Oj.....	55
Preglednica 41: Redukcija strižne nosilnosti po Evrokodu za pločevine z dvema ojačitvama	57
Preglednica 42: Pločevine 2Oj_2	57
Preglednica 43: Najbolj neugodne oblike nepopolnosti pločevine 2Oj_2.....	58
Preglednica 44: Misesove napetosti za pločevino 2Oj_2_1.....	59
Preglednica 45: Primerjava oblike nepopolnosti in deformacijske oblike za 2Oj_2 s Fourierjevimi nastavki	60
Preglednica 46: Primerjava oblike nepopolnosti in deformacijske oblike za 2Oj_2 z ročnimi nastavki	61
Preglednica 47: Primerjava oblik nepopolnosti.....	62
Preglednica 48: Primerjava nosilnosti pločevin 2Oj_2.....	62
Preglednica 49: Deviacija oblike po iteracijah za 2Oj_2	64
Preglednica 50: Pločevine 2Oj_3	65
Preglednica 51: Najbolj neugodna oblika nepopolnosti pločevine 2Oj_3_1.....	65
Preglednica 52: Primerjava oblik nepopolnosti na pločevini 2Oj_3_1.....	65
Preglednica 53: Primerjava nosilnosti pločevin 2Oj_3.....	66

Preglednica 54: Standardna deviacija oblike po iteracijah za 2Oj_3_1	67
Preglednica 55: Pločevine 2Oj_4	68
Preglednica 56: Oblika nepopolne pločevine s Fouriejevimi nastavki in Misesove napetosti za 2Oj_4	68
Preglednica 57: Primerjava nosilnosti pločevin 2Oj_4	69
Preglednica 58: Primerjave nosilnosti vseh obravnavanih primerov pločevin 2Oj	70
Preglednica 59: Redukcija strižne nosilnosti po Evrokodu za pločevine s štirimi ojačitvami ..	72
Preglednica 60: Pločevine 4Oj_2	72
Preglednica 61: Najbolj neugodne oblike nepopolnosti pločevin 4Oj_2	73
Preglednica 62: Primerjava oblike nepopolnosti in deformacijske oblike za 4Oj_2_2	74
Preglednica 63: Primerjava nosilnosti pločevin 4Oj_2	75
Preglednica 64: Standardna deviacija oblike po iteracijah za 4Oj_2_1	76
Preglednica 65: Pločevine 4Oj_3	76
Preglednica 66: Grafičen prikaz najbolj neugodnih oblik nepopolnosti za 4Oj_3	77
Preglednica 67: Primerjava nosilnosti pločevin 4Oj_3	78
Preglednica 68: Primerjave nosilnosti vseh obravnavanih primerov pločevin 4Oj	79
Preglednica 69: Primerjava oblik in faktorjev nosilnosti za različno izbiro začetne nepopolnosti	80
Preglednica 70: Amplitude nepopolnosti in ukrivljenosti nepopolni pločevin ter sprememba faktorja nosilnosti	81
Preglednica 71: Oblike nepopolnosti	83
Preglednica 72: Preglednica najbolj neugodnih oblik nepopolnosti in misesovih napetosti ...	85
Preglednica 73: V občutljivostni analizi obravnavana pločevina	89
Preglednica 74: Število Fourierjevih nastavkov in primerjava nosilnosti	91
Preglednica 75: Število kontinuirnih nastavkov in primerjava nosilnosti	92
Preglednica 76: Nosilnost pločevine za različne tipe mrež končnih elementov	93
Preglednica 77: Geometrijske karakteristike obravnavanih pločevin	94
Preglednica 78: Redukcijski faktor tlačno obremenjenih pločevin	95
Preglednica 79: Misesove napetosti kompaktne in vitke pločevine	95
Preglednica 80: Najbolj neugodni obliki začetnih nepopolnosti	96
Preglednica 81: Primerjava nosilnosti pločevin a1_1	96
Preglednica 82: Najbolj neugodne oblike začetne nepopolnosti	98

Preglednica 83: Oblike nepopolnosti na srednjem podpanelu	99
Preglednica 84: Oblike nepopolnosti na sredini robnega podpanela	99
Preglednica 85: Primerjava nosilnosti pločevin a1_2	100
Preglednica 86: Najbolj neugodne oblike začetne nepopolnosti za primer a1_3	101
Preglednica 87: Primerjava ukrivljenosti pločevine a_1_3_2	102
Preglednica 88: Primerjava nosilnosti pločevin a1_3	102
Preglednica 89: Nosilnosti vseh obravnavanih pločevin a1	104
Preglednica 90: Redukcijski faktor tlačno obremenjenih pločevin.....	105
Preglednica 91: Najbolj neugodni obliki nepopolnosti za pločevino a0,5_1_2	106
Preglednica 92: Primerjava nosilnosti pločevin a0,5_1.....	107
Preglednica 93: Najbolj neugodni obliki nepopolnosti za pločevino a0,5_2_2	107
Preglednica 94: Primerjava nosilnosti pločevin a0,5_2.....	108
Preglednica 95: Najbolj neugodna oblika nepopolnosti za a0,5_3_1.....	109
Preglednica 96: Primerjava nosilnosti pločevin a0,5_3.....	109
Preglednica 97: Nosilnosti vseh obravnavanih pločevin a0,5	110
Preglednica 98: Najbolj neugodne začetne nepopolnosti	112
Preglednica 99: Amplitude in ukrivljenosti nepopolnih pločevin ter sprememba faktorja nosilnosti (dva polvalova)-način A.....	113
Preglednica 100: Amplitude in ukrivljenosti nepopolnih pločevin ter sprememba faktorja nosilnosti (en polval)-način B	114
Preglednica 101: Red Fourierjevih nastavkov, število Fourierjevih nastavkov v bazi oblik in oblika nepopolne pločevine ter primerjava nosilnosti s priporočilom iz standarda za primer pločevine z eno vzdolžno ojačitvijo	A1
Preglednica 102: Red ročnih nastavkov, število ročnih nastavkov v bazi oblik in oblika nepopolne pločevine ter primerjava nosilnosti s priporočilom iz standarda za primer pločevine z eno vzdolžno ojačitvijo	A2
Preglednica 103: Red Fourierjevih nastavkov, število Fourierjevih nastavkov v bazi oblik in oblika nepopolne pločevine ter primerjava nosilnosti s priporočilom iz standarda za primer pločevine z dvema vzdolžnima ojačitvijama	A3
Preglednica 104: Red ročnih nastavkov, število ročnih nastavkov v bazi oblik in oblika nepopolne pločevine ter primerjava nosilnosti s priporočilom iz standarda za primer pločevine z dvema vzdolžnima ojačitvama	A4

Preglednica 105: Red Fourierjevih nastavkov, število Fourierjevih nastavkov v bazi oblik in oblika nepopolne pločevine ter primerjava nosilnosti s priporočilom iz standarda za primer pločevine s štirimi vzdolžnimi ojačitvami	A5
Preglednica 106: Red ročnih nastavkov, število ročnih nastavkov v bazi oblik in oblika nepopolne pločevine ter primerjava nosilnosti s priporočilom iz standarda za primer pločevine s štirimi vzdolžnimi ojačitvami	A6
Preglednica 107: Primerjava najbolj neugodnih oblik nepopolnosti, velikosti ukrivljenosti in misesovih napetosti izbranih analiz pločevin	B1

KAZALO SLIK

Slika 1: Post-kritični odziv vitkih pločevin izpostavljenih tlačnim napetostim (Beg idr., 2010: str. 23)	2
Slika 2: Izbočenje in uklon pločevine zaradi normalnih tlačnih napetosti (Beg idr., 2010: str. 31)	3
Slika 3: Glavne napetosti pred in po formaciji nateznega polja (Piculin S., 2013, str.4)	4
Slika 4: Algoritem določitve najbolj neugodne začetne nepopolnosti (Kristanič, 2008, str. 59)7	
Slika 5: Geometrija analiziranih pločevin.....	9
Slika 6: Primeri naključnih Fourierjevih nastavkov.....	10
Slika 7: Primer Fourierjevih sinusnih nastavkov reda $N_{FouRed} = 3$	11
Slika 8: Primer Fourierjevih kosinusnih nastavkov reda $N_{FouRed} = 3$	11
Slika 9: Primer ročnih nastavkov $N_{GlobObl}=1$, pločevina z dvema ojačitvama	12
Slika 10: Primerjava oblik A	15
Slika 11: Primerjava oblik B	15
Slika 12: Izbrana primera spreminjanja ukrivljenosti glede na debelino panela za krivulje A	17
Slika 13: Izbrana primera spreminjanja ukrivljenosti glede na debelino panela za krivulje B	17
Slika 14: Krivulje ukrivljenosti v odvisnosti od širine	20
Slika 15: Odvisnost nosilnosti pločevine od omejitve ukrivljenosti	23
Slika 16: Geometrija in oznake dimenzij obravnavanih primerov ojačanih pločevin.....	24
Slika 17: Shema strižne obtežbe.....	24
Slika 18: Faktorji nosilnosti po iteracijah za primer pločevine z eno ojačitvijo.....	27
Slika 19: Razlika med oblikami z različnim številom Fourierjevih nastavkov.....	28
Slika 20: Primerjava najbolj neugodne oblike nepopolnosti in Misesovih napetosti za $N_{FouRed}=16$	28
Slika 21: Faktorji nosilnosti po iteracijah za primer pločevine z eno ojačitvijo.....	29
Slika 22: Razlika med oblikami z različnim številom ročnih nastavkov za primer pločevine z eno ojačitvijo.....	29
Slika 23: Prispevek posamezne oblike ročnih nastavkov h končni obliki geometrijske nepopolnosti	30
Slika 24: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevine z eno ojačitvijo	31
Slika 25: Faktorji nosilnosti glede na način zapisa nastavkov nepopolnosti pločevine z eno ojačitvijo.....	33
Slika 26: Faktorji nosilnosti po iteracijah za primer pločevine z eno ojačitvijo.....	34

Slika 27: Razlika med oblikami z različnim številom Fourierjevih nastavkov	35
Slika 28: Faktorji nosilnosti po iteracijah za primer pločevine z dvema ojačitvama	35
Slika 29: Razlika med oblikami z različnim številom ročnih nastavkov za primer pločevine z eno ojačitvijo	36
Slika 30: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevine z dvema ojačitvama	37
Slika 31: Faktorji nosilnosti glede na način zapisa nastavkov nepopolnosti pločevine z dvema ojačitvama.....	38
Slika 32: Faktorji nosilnosti po iteracijah za primer pločevine s štirimi ojačitvami	39
Slika 33: Faktorji nosilnosti po iteracijah za primer pločevine s štirimi ojačitvami	40
Slika 34: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevine s štirimi ojačitvami.....	41
Slika 35: Faktorji nosilnosti glede na način zapisa nastavkov nepopolnosti pločevine z dvema ojačitvama.....	42
Slika 36: Prikaz lastnih uklonskih oblik za različne primere togosti vzdolžnih ojačitev (ena ojačitev)	45
Slika 37: Faktorji nosilnosti po iteracijah za pločevine 1Oj_3.....	51
Slika 38: Norma prispevkov uteži nastavkov analize pločevin 1Oj_3.....	51
Slika 39: Faktor nosilnosti po iteracijah za pločevine 1Oj_4	54
Slika 40: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevin 1Oj_4.....	54
Slika 41: Grafičen prikaz redukcijskih faktorjev v odvisnosti od vitkosti podpanela za 1Oj....	56
Slika 42: Faktorji nosilnosti po iteracijah za pločevine 2Oj_2.....	63
Slika 43: Norma prispevkov uteži nastavkov analize pločevin 2Oj_2.....	63
Slika 44: Faktorji nosilnosti po iteracijah za pločevine 2Oj_3.....	67
Slika 45: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevin 2Oj_3.....	67
Slika 46: Faktorji nosilnosti po iteracijah za pločevine 2Oj_4.....	69
Slika 47: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevin 2Oj_4.....	69
Slika 48: Grafičen prikaz redukcijskih faktorjev v odvisnosti od vitkosti podpanela za 1Oj....	71
Slika 49: Faktorji nosilnosti po iteracijah za pločevine 4Oj_2.....	75
Slika 50: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevin 4Oj_2.....	75
Slika 51: Faktorji nosilnosti po iteracijah za pločevine 4Oj_3.....	78
Slika 52: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevin 4Oj_3.....	78
Slika 53: Potek faktorja nosilnosti s spreminjanjem omejitev amplitude in ukrivljenosti	82
Slika 54: Omejitve amplitud nepopolnosti in ukrivljenosti po primerih 0 do 10	82

Slika 55: Geometrija konzole z dvema ojačitvama	84
Slika 56: Faktorji nosilnosti po iteracijah pri analizi konzole	85
Slika 57: Numerični tlačni model konstrukcije	88
Slika 58: Priporočena oblika nepopolnosti po standardu Evrokod	89
Slika 59: Najbolj neugodna oblika nepopolnosti pri NFouRed=4	90
Slika 60: Faktorji nosilnosti po iteracijah za Fourierjeve nastavke	91
Slika 61: Primer oblike najbolj neugodne nepopolnosti pri NGlobObl=4	92
Slika 62: Faktorji nosilnosti po iteracijah za ročne nastavke	93
Slika 63: Faktorji nosilnosti pločevin po iteracijah za pločevine a1_1	97
Slika 64: Faktorji nosilnosti pločevin po iteracijah za pločevine a1_2	100
Slika 65: Grafičen prikaz poteka nosilnosti pločevin z iteracijami za primere a1_3.....	102
Slika 66: Diagrami redukcije nosilnosti v odvisnosti od vitkosti panela različnih togosti ojačitev za razmerje stranic $\alpha=1$	105
Slika 67: Misesove napetosti za a0,5_1_2	106
Slika 68: Misesove napetosti za a0,5_2_2	108
Slika 69: Diagrami redukcije nosilnosti v odvisnosti od vitkosti panela različnih togosti ojačitev za razmerje stranic $\alpha=0,5$	111
Slika 70: Omejitve ukrivljenosti in dosežene vrednosti ukrivljenosti v obeh smereh pločevine- način A	114
Slika 71: Omejitve ukrivljenosti in dosežene vrednosti ukrivljenosti v obeh smereh pločevine- način B	115
Slika 72: Spreminjanje faktorja nosilnosti z večanjem omejitev ukrovljenosti za oba načina A in B	115

1 UVOD

Pri gradnji zahtevnih konstrukcij velikih razponov in obremenitev se pogosto odločamo za uporabo tankostenskih nosilcev z visoko nosilnostjo in nizko lastno težo. To so varjeni I ali škatlasti nosilci, sestavljeni iz kompaktnih ali vitkih pasnic in vitkih stojin, ki so po navadi ojačeni z vzdolžnimi in/ali prečnimi ojačitvami. Zaradi velike statične višine nosilec povečamo upogibno nosilnost. Vitke pločevine se izbočijo pri relativno nizkem nivoju napetosti in zaradi izgube togosti pride do prerazporeditve napetosti. Vitki elementi imajo posebnost, da po izbočitvi ne izgubijo nosilnosti, kot se to zgodi v primeru tlačene palice, ampak izkazujejo dodatno nosilnost tudi v post-kritičnem stanju. Pravila za dimenzioniranje ojačenih in neojačenih pločevin so zajeta v standardu SIST EN 1993-1-5. Postopki in teorija standarda so na kratko predstavljeni v prvem delu diplomske naloge.

Nepopolnosti pločevin delimo na geometrijske nepopolnosti in nepopolnosti zaradi zaostalih napetosti. Prve so posledica izdelave, saj v proizvodnem procesu pločevine nikoli ne moremo izdelati idealno ravne. Vsak proizvod pa mora zadostiti tolerancam izdelave, ki jih predpisuje stroka. Druga oblika nepopolnosti so posledica obdelave pločevine, kot je valjanje pločevin, varjenje, rezanje, itd. Nepopolnosti pločevin lahko zajamemo z nadomestnimi geometrijskimi nepopolnostmi, ki jih definiramo kot kombinacijo nepopolnosti ojačitev in podpanelov. V standardu predlagana oblika nepopolnosti pa ni nujno tudi najbolj neugodna. Zato smo z optimizacijsko metodo poiskati najbolj neugodno obliko začetnih nepopolnosti ob upoštevanju priporočil standarda, ki predpisuje le največjo dovoljeno amplitudo nepopolnosti, največje ukrivljenosti geometrije nepopolne pločevine pa ne. Zato smo v prvem delu diplomske naloge poiskali smiselno vrednost za omejitev ukrivljenosti. Preverjali smo vpliv velikosti dovoljene ukrivljenosti na obliko in nosilnost nepopolne pločevine.

Nadaljevanje diplomske naloge smo razdelili na dva dela. Najprej smo obravnavali strižno obremenjene pločevine z eno, dvema ali štirimi vzdolžnimi ojačitvami. Obsežno parametrično študijo vpliva vitkosti panela in togosti vzdolžnih ojačitev na obliko najbolj neugodne začetne nepopolnosti smo izvedli s programom AceFEM (Korelc, 2010) skupaj s programom Mathematica (Wolfram Research, 2011). Nadaljevali smo z analizo najbolj neugodne oblike nepopolnosti tlačno obremenjenih pločevin z dvema vzdolžnima ojačitvama. Preučevali smo vpliv razmerja stranic in vitkosti panela ter togosti vzdolžnih ojačitev na obliko nepopolnosti in redukcijo polnoplastične nosilnosti pločevin.

Obliko nepopolnosti smo definirali z določenim številom nastavkov nepopolnosti in z optimizacijo določili njihovo najbolj neugodno kombinacijo, ki je dala največjo redukcijo nosilnosti. Nastavke smo zapisali na dva načina, ki sta vključevala sinusne oblike nepopolnosti različnega števila valov in oblik.

2 IZBOČENJE PLOČEVIN ZARADI NORMALNIH IN STRIŽNIH OBREMENTEV

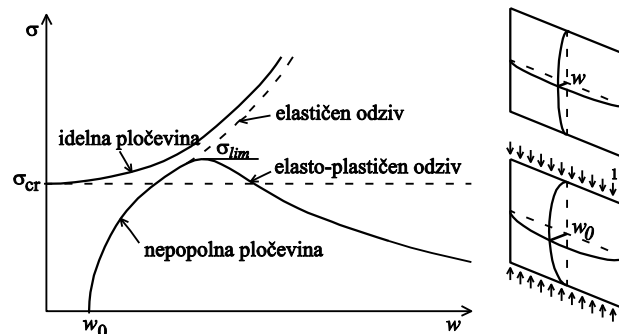
Poglavje je delno povzeto po Beg idr., 2010.

Značilnost jeklenih konstrukcij je njihova nizka lastna teža in uporaba vitkih in prefabriciranih elementov. Pravila za dimenzioniranje ojačanih in neojačanih pločevin v jeklenih konstrukcijah so zajeta v standardu SIST EN 1993-1-5, ki je del evropskih predpisov Evrokod. V nadaljevanju diplomskega dela smo za standard SIST EN 1993-1-5 uporabili le poimenovanje Evrokod ali standard. V mejnem stanju nosilnosti, mejnem stanju uporabnosti in utrujanju moramo pri dimenzioniranju upoštevati strižno podajnost pasnic, izbočenje pločevin in interakcijo obeh pojavov. V sklopu diplomske naloge smo pozornost posvetili predvsem izbočenju pločevin, obremenjenih v njihovi ravnini.

2.1 Normalne napetosti

Pri uklonu tlačene palice se zgodi, da po prekoračitvi elastične kritične napetosti $\sigma_{E,cr}$ (1) nosilnost konstrukcije pade. Vitke pločevine pa imajo to značilnost, da tudi po prekoračitvi elastične kritične napetosti še vedno nosijo. Ta pojav imenujemo post-kritična nosilnost. Elastična kritična napetost $\sigma_{E,cr}$, imenovana tudi Eulerjeva kritična napetost, je napetost, pri kateri se idealna pločevina izboči.

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

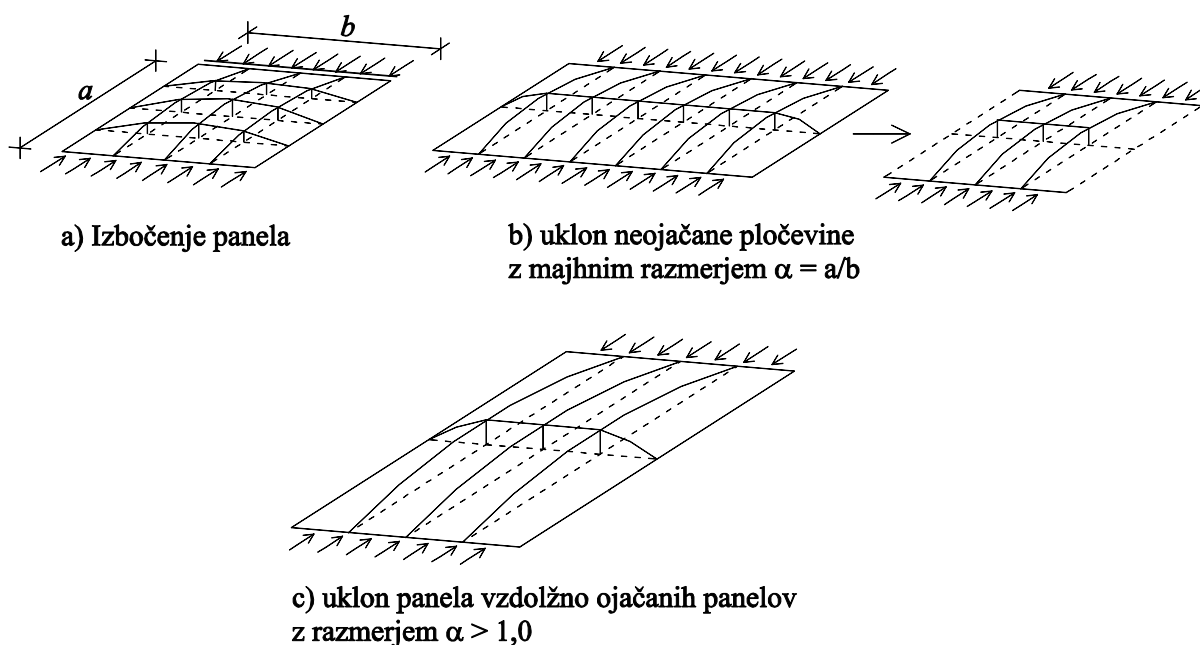


Slika 1: Post-kritični odziv vitkih pločevin izpostavljenih tlačnim napetostim (Beg idr., 2010: str. 23)

Pri idealnih pločevinah do izbočitve ne pride dokler v konstrukciji ni dosežena elastična kritična sila σ_E . Ta stadij konstrukcije imenujemo tudi pred-kritično stanje. Razmejitev med pred- in post-kritičnim območjem je bifurkacijska točka. Konstrukcija se takrat izboči in nosi naprej. Pri realnih, geometrijsko nepopolnih pločevinah z začetno nepopolnostjo je prehod iz pred- v post-kritično območje postopen. Po prekoračitvi elastične kritične napetosti σ_E se napetosti v pločevini povečujejo vse do plastične porušitve konstrukcije. V post-kritičnem stanju pride do prerazporeditve tlačnih napetosti, zmanjša se osna togost izbočenega dela elementa, kjer se napetosti zmanjšajo, na robovih pločevine pa pride do povečanja napetosti. Mejna nosilnost je dosežena, ko napetosti na robu dosežejo mejo tečenja f_y , saj vitke pločevine ne izkazujejo duktilnosti in do formacije plastičnih členkov ne pride. Razporeditev dejanskih napetosti izbočenih pločevin je nelinearno, zato določitev nosilnosti ni tako

enostavna. V ta namen sta bili razviti dve metodi, metoda efektivnih širin in metoda reduciranih napetosti. Pri nas v večji meri uporabljamo metodo efektivnih širin, katero smo uporabljali tudi v namene te diplomske naloge.

V metodi efektivnih širin (drugo ime je metoda sodelujočega prereza) redukcijo nosilnosti zaradi izbočenja določimo tako, da upoštevamo interakcijo dveh načinov obnašanja pločevine. Izbočenje obravnavamo kot kombinacijo izbočenja ojačene/neojačene pločevine, ki je prostoležeče podprta na vseh robovih in izbočenja, ki je podobno uklonu tlačene palice. V tem delu pločevino na vzdolžih robovih obravnavamo nepodprto. Pločevine z nizkim razmerjem dolžin stranic α izkazujejo nizko post-kritično nosilnost. Pri obremenitvi z normalnimi napetostmi se obnašajo kot enodimenzionalen element (uklon tlačene palice), ki ob izgubi stabilnosti ne izkazuje povečanja nosilnosti v post-kritičnem stanju.



Slika 2: Izbočenje in uklon pločevine zaradi normalnih tlačnih napetosti (Beg idr., 2010: str. 31)

Kritična napetost izbočenja pločevin je vedno višja od kritične napetosti uklona tlačene palice. Zaradi tega je tudi relativna vitkost izbočene pločevine vedno manjša od relativne vitkosti uklonjene tlačene palice ($\bar{\lambda}_p < \bar{\lambda}_c$). Podatek materiala je njegova napetost na meji tečenja f_y .

Relativna vitkost tlačene palice:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad (2)$$

Relativna vitkost izbočene pločevine:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad (3)$$

2.2 Strižne napetosti

Strižno obrmenjene pločevine lahko opišemo z dvema pojavoma: pojav čistega striga in pojav nateznega polja.

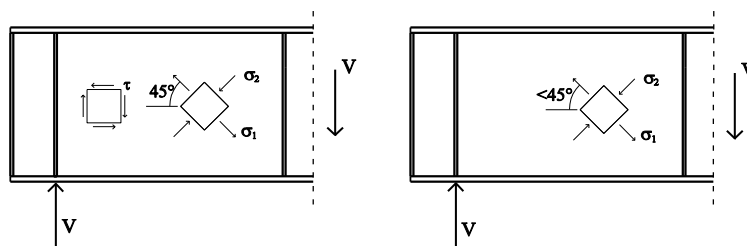
Strižno obremenjena pločevina je vitka, kadar velja enačba (4). Ta je podana v standardu SIST EN 1993-1-5.

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{72}{\eta} \varepsilon \quad (4)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y [N/mm^2]}} \quad (5)$$

V pločevinah kompaktnih v strigu ali pred izbočitvijo v strigu vitke pločevine se razvijejo le čiste strižne napetosti. Če strižne napetosti razstavimo na glavne napetosti, dobimo v eni smeri napetosti σ_1 in v drugi smeri napetosti σ_2 enakih velikosti. Koordinatni sistem je glede na vodoravno os nagnjen za kot 45° .

Tako kot normalno obremenjene tudi strižno obremenjene pločevine izkazujejo rezervo v nosilnosti v post-kritičnem stanju. Ob izbočenju vitkih pločevin konstrukcija preide v post-kritično stanje. Izbočitev se formira v smeri glavnih nateznih napetosti σ_1 . Po izbočenju se glavna tlačna napetost σ_2 ne more več povečati in je enaka kritični strižni napetosti $-\tau_{cr}$. Glavna natezna napetost se v post-kritičnem stanju še lahko povečuje, kar zaradi vzdrževanja ravnotežja sil vodi v rotacijo napetostnega polja ($\sigma_2 < \sigma_1$). Natezna napetost se lahko povečuje dokler ne doseže mejne nosilnosti materiala. Razvoj tovrstnih nateznih napetosti je mogoč le v primeru zadostnega sidranja napetosti v robnih elementih panela. Kot med glavno natezno napetostjo in vzdolžno osjo nosilca se pri razmerjih stranic pločevine $\alpha > 1$ manjša ($< 45^\circ$). Temu pravimo pojav nateznega polja.



Slika 3: Glavne napetosti pred in po formaciji nateznega polja (Piculin S., 2013, str.4)

Vitke pločevine lahko dosežejo veliko post-kritično nosilnost, če je zagotovljeno sidranje membranskih sil v prečne ojačitve nad podporo. Pasnice preprečujejo relativni pomik med prečnimi ojačitvami in zagotavljajo sidranje sil iz nateznega polja. Ko je doseženo mejno stanje nosilnosti v pasnicah pride do razvoja plastičnih členkov.

3 METODE DELA

3.1 Uvod

Poglavje je povzeto po Kristanič, 2008.

Začetna nepopolnost konstrukcij je posledica toleranc pri izdelavi, ki se jim praktično ne da izogniti. Rezultati nelinearnih numeričnih analiz konstrukcijskih elementov in konstrukcij so lahko v veliki meri odvisni od izbire oblike začetnih nepopolnosti, kar je še posebej izraženo pri obravnavi tankostenskih nosilcev, občutljivih na obliko začetne geometrije. Z ustreznim upoštevanjem začetnih nepopolnosti lahko ustrezno zmanjšamo razliko med nosilnostjo konstrukcije izračunane z računalniškimi programi in dejansko nosilnostjo konstrukcije izmerjene s preizkusi v laboratoriju.

Napredno metodo določitve najbolj neugodnih začetnih nepopolnosti konstrukcij glede na mejno stanje nosilnosti sta razvila Kristanič in Korelc na Univerzi v Ljubljani (Kristanič in Korelc, 2008). Metoda je bila pred kratkim prirejena z namenom zagotovitve optimalne učinkovitosti v primeru analize ojačanih pločevin.

3.2 Opis metode

Določitev najbolj neugodne začetne nepopolnosti predstavlja nelinearen optimizacijski problem, ki ga rešimo s pomočjo ene od nelinearnih optimizacijskih metod. Zavedati se moramo, da se tako zahtevnega pristopa v vsakodnevni inženirski praksi v bližnji prihodnosti še ne bomo posluževali. Z uporabo direktne in občutljivostne analize ter optimizacijskih algoritmov je možno neposredno določiti najbolj neugodno obliko geometrijskih nepopolnosti, pri kateri konstrukcija izkaže najnižjo nosilnost v okviru obravnavanega problema (Kristanič in Korelc, 2008). Osnovna ideja predlaganega pristopa je zamenjava nelinearnega optimizacijskega problema z iteracijskim postopkom, ki vsebuje samo linearne optimizacijske probleme. Znotraj iteracije izvedemo nelinearno direktno analizo in občutljivostno analizo prvega reda.

Upoštevati je potrebno omejitve glede oblike in amplitude nepopolnosti. V primeru smiselne definicije omejitev te ostanejo linearne in tako v optimizacijskem problemu omogočijo uporabo učinkovitih in predpripravljenih algoritmov "linear programming". V predstavljenem pristopu so nepopolnosti podane kot linearna kombinacija oblik iz baze oblik. Taka analiza je časovno precej zahtevna, saj vsaka iteracija zahteva direktno nelinearno analizo do mejnega stanja nosilnosti, nelinearno občutljivostno analizo za celotno bazo oblik in reševanje linearnega optimizacijskega problema.

Predhodne numerične raziskave so pokazale, da s predlaganim pristopom lahko dobimo vidno nižje nosilnosti konstrukcije kot z eksperimenti, saj v bazi oblik upoštevamo tudi ne nujno realne nepopolnosti. Zato je pomembno, da oblike in amplitudo nepopolnosti omejimo z vrednostmi, ki so realno tudi možne.

Metoda je razvita na podlagi računalniškega okolja, ki vsebuje paket AceFEM (Korelc, 2010) skupaj s programom Mathematica (Wolfram Research, 2011). AceFEM nudi edinstveno simbolno numerično okolje končnih elementov, ki je primerno za izvedbo popolnoma nelinearne direktne analize in občutljivostne analize prvega reda. V Mathematico vgrajen algoritem omogoča hitro reševanje optimizacijskega problema.

3.3 Določitev najbolj neugodne začetne nepopolnosti

Nepopolnosti, ki jih pločevini definiramo znotraj omejitev, odražajo tako najbolj neugodno spremembo v geometriji pločevine, da je nosilnost najmanjša možna. Imperfektности so linearna kombinacija osnovnih oblik znotraj amplitude e_0 . Obliko nepopolne pločevine torej lahko zapišemo kot:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_p + \sum_{j=1}^N \alpha_j \mathbf{\Gamma}_j \quad (6)$$

Kjer je \mathbf{X}_p popolna začetna oblika pločevine, α_j so neznani parametri oblike dobljeni kot rešitev optimizacijskega problema in $\mathbf{\Gamma}_j$ j-ta oblika iz baze oblik. Bazo oblik $\mathbf{\Gamma}$ lahko izberemo poljubno, vendar morajo biti oblike med seboj linearno neodvisne. To so lahko uklonske oblike, lastni vektorji začetne togostne matrike \mathbf{K}_0 , lastni vektorji togostne matrike $\bar{\mathbf{K}}_0$ konstrukcije s spremenjenimi robnimi pogoji, deformacijske oblike in empirično znane neugodne oblike. V okviru metode je iskana tista nepopolna oblika \mathbf{X} , pri kateri je mejna nosilnost konstrukcije najnižja. "Optimizirana", torej najbolj neugodna oblika nepopolnosti pločevine je odvisna od nabora osnovnih oblik iz baze (N) in od gostote mreže končnih elementov. Za obravnavo rezultatov je pomembno, da število oblik in gostoto mreže sorazmerno povečujemo. Z višanjem števila oblik rezultat konvergira v končno obliko. Moramo pa vključiti vsaj toliko oblik, da zajamemo tako lokalne kot globalne porušne mehanizme. Najbolj neugodna oblika nepopolnosti je odvisna od vrste in oblike obtežbe, podpor, sprememb v geometriji in amplitud začetnih nepopolnosti. Iskanje najbolj neugodne oblike nepopolnosti pri najmanjši možni nosilnosti moramo izvesti za vsako obravnavano pločevino posebej in ne more biti posplošeno.

3.4 Opis algoritma

V predstavljenem pristopu je uporabljena polna geometrijska in materialna nelinearnost. Ker algoritem v samem začetku obravnava konstrukcijo z začetno nepopolnostjo se bifurkacijske točke ne pojavijo predno je dosežena limitna točka na krivulji sila-pomik. Z metodo iščemo najbolj neugodno začetno obliko pločevine, ki je definirana z bazo oblik in parametri oblike, pri katerih bo nosilnost najnižja. Neznane parametre oblike dobimo z iterativnim optimizacijskim postopkom. Iterativni postopek za k-ti korak lahko zapišemo, kot sledi:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k-1} + \Delta \mathbf{X}_k \quad (7)$$

$$\Delta \mathbf{X}_k = \sum_{i=1}^N \Delta \alpha_i^k \mathbf{\Gamma}_i \quad (8)$$

$$\alpha_i^k = \alpha_i^{k-1} + \Delta \alpha_i^k \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{X}}_k = \sum_{i=1}^N \alpha_i^k \mathbf{\Gamma}_i \quad (10)$$

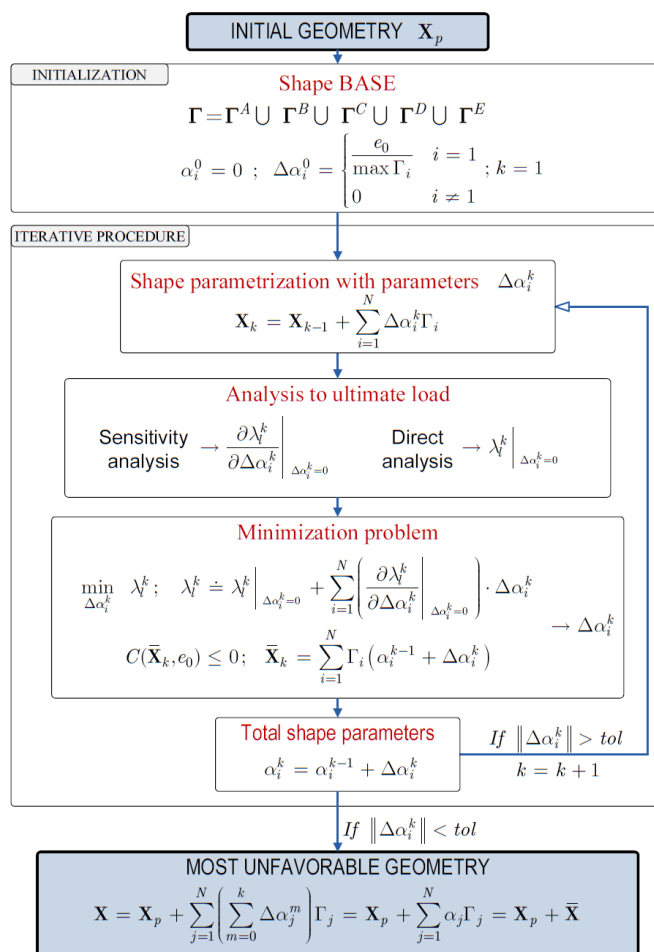
Kjer je \mathbf{X}_k nepopolna geometrija, $\Delta\alpha_i^k$ inkrement (prirastek) parametrov nepopolnosti, $\Delta\mathbf{X}_k$ inkrement nepopolnosti in $\bar{\mathbf{X}}_k$ skupna nepopolnost. Prirastek parametrov $\Delta\alpha_i^k$ v k -ti iteraciji je dobljen z rešitvijo optimizacijskega problema. Za začetni približek po navadi vzamemo kar prvo bazno obliko Γ_1 , normalizirano z amplitudo e_0 .

$$\alpha_i^0 = 0; \Delta\alpha_i^0 = \begin{cases} \frac{e_0}{\max \Gamma_i}, & i = 1 \\ 0, & i \neq 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\mathbf{X}_0 = \mathbf{X}_p + \Delta\alpha_1^0 \Gamma_1 \quad (12)$$

Postopek je zaključen, ko je dosežen pogoj $\|\Delta\alpha_i^k\| < \text{toleranca}$.

V vsakem koraku iterativnega postopka je izvedena direktna in občutljivostna analiza konstrukcije z nepopolno geometrijo \mathbf{X}_k . Parametri oblike α_i^k najbolj neugodne oblike \mathbf{X}_k v trenutnem koraku so izračunani s pomočjo optimizacijskega postopka, ki je popolnoma ločen od direktne in občutljivostne analize. Končni rezultat $\bar{\mathbf{X}}_k$ je po navadi močno odvisen od izbire začetne geometrije konstrukcije \mathbf{X}_0 . Predstavljen postopek omogoča uporabo poljubnega naprednega optimizacijskega algoritma.



Slika 4: Algoritem določitve najbolj neugodne začetne nepopolnosti (Kristanič, 2008, str. 59)

3.5 Optimizacijski problem

Alternativen in bolj točen pristop bi lahko predstavljalo reševanje polno povezanega problema, vendar zaradi numerične prezahtevnosti trenutno za večje sisteme še ni mogoč. Tak sistem je bil poenostavljen na ta način, da je bil z uporabo občutljivosti mejni faktor popolne konstrukcije razvit v Taylorjevo vrsto okoli mejnega obtežnega faktorja nepopolne konstrukcije. Enačbo mejnega obtežnega faktorja lahko zapišemo na sledeči način:

$$\lambda_l^k \cong \lambda_l^k \Big|_{\Delta\alpha_i^k=0} + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \lambda_l^k}{\partial \Delta\alpha_i^k} \Big|_{\Delta\alpha_i^k=0} \right) \cdot \Delta\alpha_i^k, \quad (13)$$

kjer je $\lambda_l^k \Big|_{\Delta\alpha_i^k=0}$ izračunani mejni obtežni faktor v k-ti iteraciji in $\frac{\partial \lambda_l^k}{\partial \Delta\alpha_i^k} \Big|_{\Delta\alpha_i^k=0}$ občutljivost

mejnega obtežnega faktorja na optimizacijske parametre v trenutnem koraku. Predstavljen iterativni pristop omogoča iskanje najbolj neugodne oblike nepopolnosti konstrukcije na že nepopolni konstrukciji. Pri tem se najbolj neugodna oblika konstrukcije iz prejšnje iteracije uporabi kot začetna oblika konstrukcije v trenutni iteraciji. V vsaki iteraciji je potrebno rešiti minimizacijski problem (14, 15), kjer iščemo takšne $\Delta\alpha_i^k$, pri katerih bo λ_l^k minimalen, pod pogojem, da je amplituda oblike skupne nepopolne konstrukcije manjša ali enaka mejni amplitudi nepopolnosti. Mejne amplitude e_0 so določene s principom ekvivalentnih nepopolnosti, ki jih določajo tehnični predpisi. Optimizacijski problem tako zapišemo:

$$\min_{\Delta\alpha_i^k} \lambda_l^k \quad (14)$$

$$C(\bar{X}_k, e_0) \leq 0, \quad (15)$$

kjer $C(\bar{X}_k, e_0)$ predstavlja omejitveno funkcijo. Funkcija λ_l je linearna, medtem ko je omejitvena funkcija $C(\bar{X}_k, e_0)$ v odvisnosti od zasnove lahko ena sama, izrazito nelinearna funkcija, ali skupek več linearnih funkcij.

3.6 Direktna in občutljivostna analiza

Mejno stanje nosilnosti konstrukcije je v splošnem definirano z limitno točko ravnotežne poti. Kadar obravnavamo realno nepopolno konstrukcijo je ta definicija nezanesljiva, saj bi limitno stanje nastopilo pri nerealno velikih pomikih konstrukcije.

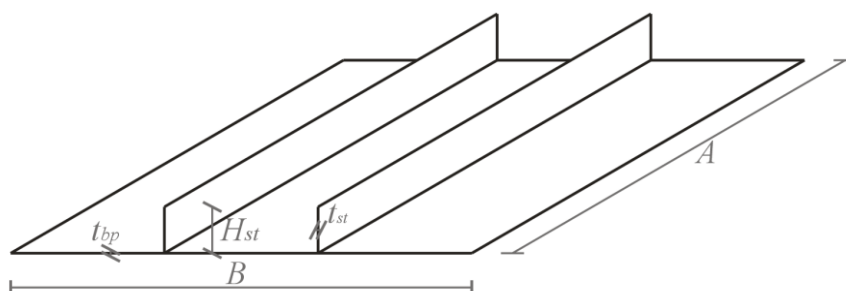
Za določitev mejnega stanja nosilnosti je potrebna geometrijsko in materialno nelinearna analiza. Problem, ki ga je potrebno rešiti po terminologiji predstavljeni v (Michalaris, idr., 1994), predstavlja nelinearen, tranzienten, povezan sistem. Uporabljena je standardna "arc-length" metoda (metoda ločne dolžine) iskanja pomikov (Crisfield 1996, 1997). Sistem ravnotežnih enačb direktne in občutljivostne analize je razširjen z dodatno obtežno spremenljivko λ (obtežni faktor) in dodatnim pogojem g_c , ki predstavlja dodatno enačbo za prirastke posplošenih pomikov.

Občutljivostna analiza se uporablja za izračun spremembe odziva konstrukcije z ozirom na variacijo projektnih parametrov φ in zahteva rešitev tranzientnega, povezanega sistema

enačb, z upoštevanjem geometrijske in materialne nelinearnosti. Ker je problem tranzienten, je potrebno občutljivosti izračunati na koncu vsakega obtežnega koraka skozi vso analizo. Največji problem uporabe občutljivostne analize je izračun polja začetnih občutljivosti (angl.: "velocity field"). Polje začetnih občutljivosti ($\partial X/\partial \varphi$) opiše spremembo koordinat vozlišč končnih elementov (X) glede na poljubno izbran projektni parameter φ . Z uporabo analitično izračunanega polja začetnih občutljivosti je mogoče izvesti občutljivostno analizo, ki je ključnega pomena za natančen in učinkovit potek gradientnih metod optimizacije. Zaradi načina zapisa oblik nepopolnosti lahko enostavno izvednotimo polje začetnih občutljivosti, saj oblika Γ_j predstavlja kar polje začetnih občutljivosti.

3.7 Nastavki

Bazo oblik določajo nastavki, s katerimi opišemo najbolj neugodno obliko nepopolnosti. Izbira nastavkov je poljubna. Večja kot je baza, bolj točno lahko obliko opišemo. Najbolj neugodna oblika nepopolnosti je odvisna od izbire pravih, najbolj neugodnih nastavkov. V bazo oblik vključimo realno možne oblike nepopolnosti.



Slika 5: Geometrija analiziranih pločevin

Običajni pristop je zapis baze oblik s pomočjo uklonskih oblik konstrukcije, lastnih vektorjev in karakterističnih deformacijskih oblik (Kristanič, 2008). Želeli smo preučiti sposobnosti metode določanja najbolj neugodnih začetnih nepopolnosti na primerih vitkih pločevin, zato smo bazo oblik zapisali na nekoliko drugačen način (Kuhlmann, 2012). Zapis nastavkov s pomočjo sinusnih in kosinusnih funkcij vodi k hitri in smiselni rešitvi optimizacijskega problema določanja najbolj neugodne oblike začetne nepopolnosti. V sklopu diplomske naloge so bile narejene analize tlačno in strižno obremenjenih pločevin, saj je najbolj neugodna oblika nepopolnosti odvisna od zunanje obtežbe.

3.7.1 Fourierjevi nastavki

Fourierjevi nastavki so na pločevini definirani na osnovi Fourierjeve vrste, ki periodične funkcije ali signale pretvori v vsoto enostavnih nihanj, ki jih zapišemo s pomočjo sinusne in kosinusne funkcije. Fourierjeva vrsta je poimenovana po njenem izumitelju Jean-Baptiste Joseph Fourier-ju iz leta 1807, ki jo je uporabil za reševanje toplotne enačbe. Danes se vrsto lahko uporabi za reševanje različnih matematičnih in fizikalnih problemov, še posebno tistih, ki vključujejo linearne diferencialne enačbe s konstantnimi koeficienti, kjer je rešitev sinusoida. V tem primeru lahko Fourierjevo vrsto uporabimo pri teoriji vitkih pločevin.

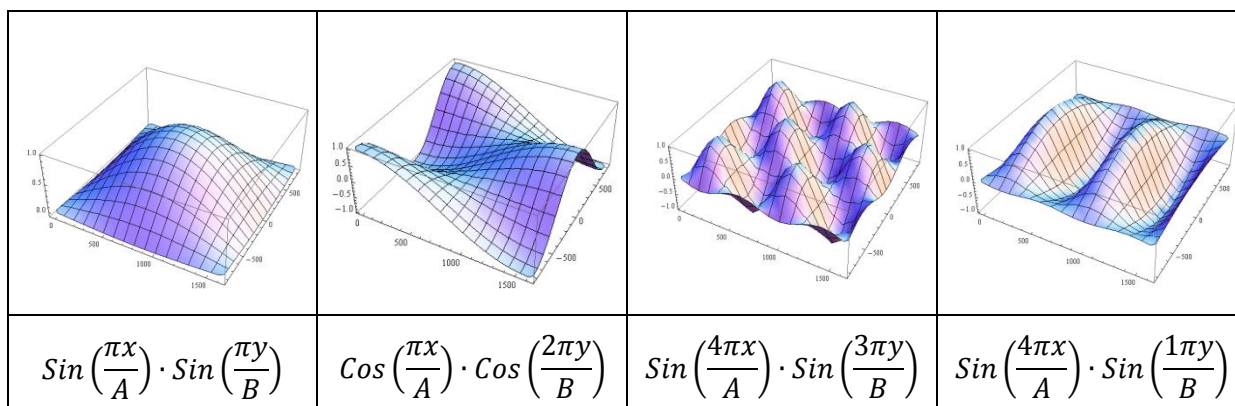
Splošno velja:

$$S(x) = b_1 \sin x + b_2 \sin 2x + b_3 \sin 3x + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nx \quad (16)$$

ali

$$C(x) = b_0 + b_1 \cos x + b_2 \cos 2x + b_3 \cos 3x + \dots = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos nx \quad (17)$$

Razvili smo funkcijo v dvodimenzionalnem prostoru in uporabili samo sinusne funkcije, saj smo na robovih obravnavanih pločevin želeli imeti ravno pločevino, brez začetnih nepopolnosti. V primeru uporabe tudi kosinusnih funkcij, bi bil nastavek imperfekcije tudi na robovih lahko različen od 0 (Slika 6). Pri zapisu Fourierjevih nastavkov se ne oziramo na položaj in število vzdolžnih ojačitev, saj je oblika odvisna le od reda nastavkov in dimenzije pločevine.



Slika 6: Primeri naključnih Fourierjevih nastavkov

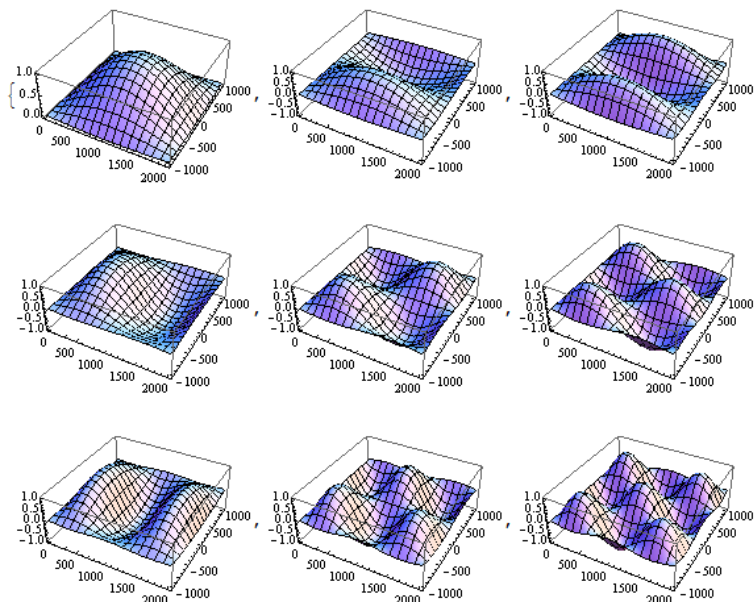
Z namenom jasne predstavitve nastavkov smo prikazali nekatere primere zapisa Fourierjeve vrste za 2D prostor. Dimenziji A in B sta širina in dolžina pločevine (panela), n in m pa red nastavkov nepopolnosti, ki definira število polvalov sinusne ali kosinusne funkcije v x ali y smeri (x in y sta koordinati v obravnavanem 2D prostoru). V nadaljevanju smo red Fourierjevih nastavkov označevali v okrajšani obliki NFouRed. Število nastavkov v bazi oblik Γ je enako kartezičnemu produktu redov nastavkov v obeh smereh $m \times n$.

$$S_1 \times S_2 = \{s_1 \cdot s_2; s_1 \in S_1, s_2 \in S_2\} \quad (18)$$

$$S_1 = \left\{ \text{Sin}\left(\frac{i\pi x}{A}\right), \text{Cos}\left(\frac{i\pi x}{A}\right) \right\}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

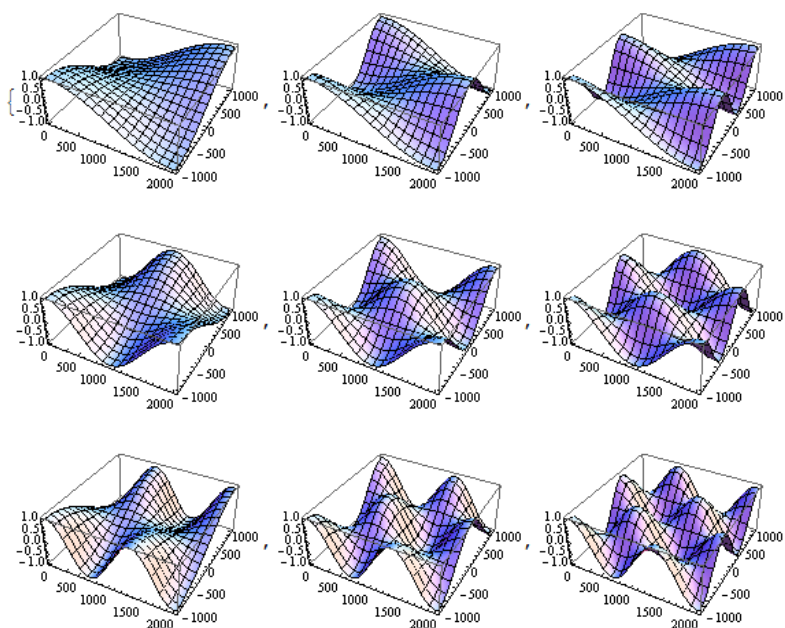
$$S_2 = \left\{ \text{Sin}\left(\frac{i\pi y}{B}\right), \text{Cos}\left(\frac{i\pi y}{B}\right) \right\}; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

Na sliki (Slika 7) je prikazan primer baze oblik, ki vključuje nastavke reda 3 v prečni in vzdolžni smeri ($m = n = 3$). V takšni bazi oblik imamo 9 nastavkov. Upoštevali smo samo sinusne krivulje.



Slika 7: Primer Fourierjevih sinusnih nastavkov reda $N_{FouRed} = 3$

Na sliki (Slika 8) pa so prav tako prikazani nastavki reda 3, ki jih definirajo samo kosinusne krivulje. Opazimo, da je rob pločevine naguban. V nadaljevanju diplomske naloge smo uporabljali samo nastavke s sinusnimi krivuljami, ki imajo robu pločevine ne definirajo nepopolnosti.




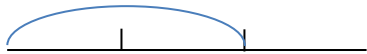
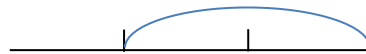

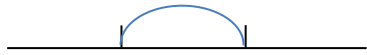
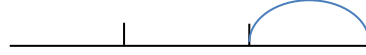
Slika 8: Primer Fourierjevih kosinusnih nastavkov reda $N_{FouRed} = 3$

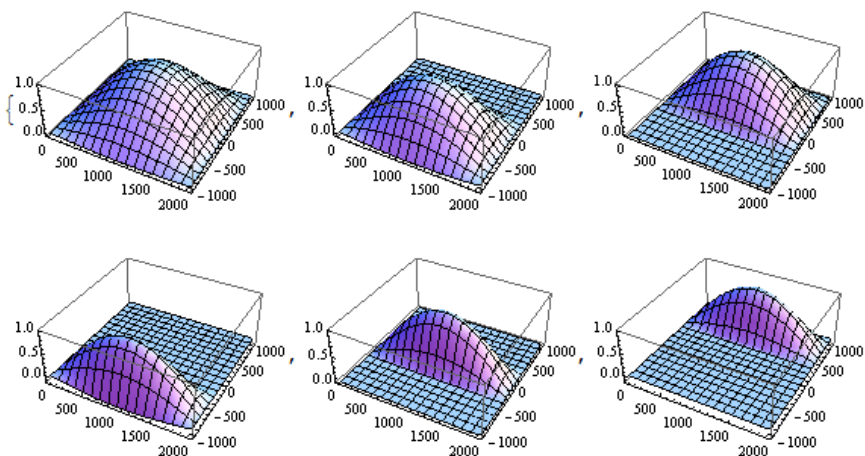
3.7.2 Posebno definirani nastavki (t.i. ročni nastavki)

Tako smo poimenovali nastavke, ki smo jih definirali ročno za vsak panel in podpanel posebej. V diplomski nalogi smo take nastavke poimenovali ročni nastavki oblik nepopolnosti. Tudi ta način temelji na sinusni funkciji, kjer število globalnih oblik predstavlja število polvalov v vzdolžni smeri panela oz. podpanela, medtem ko je v prečni smeri vedno en sam polval. Bazo oblik definirajo vse možne kombinacije definiranih nastavkov. Za razliko od Fourierjevih nastavkov le-te definiramo glede na položaj in število ojačitev. V preglednici (Preglednica 1) je prikazan primer nastavkov na prečnem prerezu pločevine z dvema vzdolžnima ojačitvama.

Na sliki (Slika 9) je prikazana baza oblik ročnih nastavkov za pločevino ojačano z dvema vzdolžnima ojačitvama, kjer je število globalnih enako 1 ($NGlobObl = 1$). V primeru večjega števila globalnih oblik bi se število polvalov v vzdolžni smeri povečalo, v prečni smeri pa ostalo nespremenjeno. Če je število globalnih oblik označeno s črko n in je število kombinacij nastavkov na panelih oz. podpanelih označeno kot k (v primeru dveh ojačitev je $k = 6$), potem je število oblik v bazi oblik $n \times k$.

Preglednica 1: Grafičen prikaz ročnih nastavkov na prečnem prerezu pločevine

1. Oblika	2. Oblika	3. Oblika
		
4. Oblika	5. Oblika	6. oblika
		



Slika 9: Primer ročnih nastavkov $NGlobObl=1$, pločevina z dvema ojačitvama

4 OMEJITVE

Upoštevati je potrebno omejitve glede oblike in amplitude nepopolnosti. V predstavljenem pristopu so nepopolnosti podane kot linearna kombinacija oblik iz baze oblik. Omejitve glede oblike podamo z zgornjo vrednostjo največjega dovoljenega odmika pločevine od ravnine, ki jo določa idealno ravna pločevina. Prav tako omejimo največjo ukrivljenost v pločevini, od katere je tudi odvisna največja dovoljena nepopolnost.

4.1 Definicija začetnih nepopolnosti v računalniških programih

Poglavje je delno povzeto po Beg idr., 2010.

Pri vitkih pločevinah razlikujemo med dvema vrstama nepopolnosti:

- Geometrijske nepopolnosti kot posledica izdelave. Takšno vrsto nepopolnosti definiramo kot nepravilno, deformirano obliko teoretično idealne konstrukcije in amplitudo nepopolnosti omejimo. Dodatek C k EN 1993-1-5 priporoča oblike, ki temeljijo na kritičnih uklonskih oblikah pločevine, in amplitude nepopolnosti, ki so enake 80% toleranc pri izdelavi. Tolerance pri izdelavi določa Evropski standard EN 1090 del 2 za metalne konstrukcije (CEN, 2008).
- Zaostale napetosti pri obdelavi (valjanje pločevin, rezanje in varjenje). V vsaki izmed pločevin v konstrukciji nastanejo napetosti, ki so med seboj uravnotežene. Imenujemo jih zaostale napetosti. V računalniških modelih zaostale napetosti težko definiramo, zato uporabimo poenostavljen pristop, kjer zaostale napetosti nadomestimo z dodatno enakovredno geometrijsko nepopolnostjo.

Kombinacijo obeh vrst nepopolnosti modeliramo kot nadomestne geometrijske nepopolnosti, ki so enake geometrijskim nepopolnostim s povečano amplitudo. Uporaba te metode je bolj enostavna kot modeliranje zaostalih napetosti, ja pa manj natančna. Vpliv zaostalih napetosti je v mnogih primerih precej drugačen od vpliva geometrijskih napetosti. Predlagane omejitve največjih dovoljenih odstopanj od idealne geometrije podaja preglednica (Preglednica 2) iz standarda EN 1993-1-5.

Preglednica 2: Nadomestne geometrijske nepopolnosti (Preglednica C.2 v EN 1993-1-5, Dodatek C)

Tip imperfektosti	Komponenta	Oblika	Magnituda
globalna	Element dolžine l	lok	Tabela 5.1 v EN 1993-1-5
globalna	Vzdolžna ojačitev dolžine a	lok	$\min (a/400, b/400)$
lokalna	Panel ali podpanel s krajšim razponom a ali b	uklonska oblika	$\min (a/200, b/200)$
lokalna	Imperfektna ojačitev ali pasnica	lok	1/50

Osnovne oblike nepopolnosti so dobljene iz predhodnih analiz uklonskih oblik konstrukcije. Za zapis nadomestnih geometrijskih nepopolnosti uporabimo primerno kombinacijo teh oblik. Na primer: globalni nepopolnosti ojačene stojine dodamo še torzijsko nepopolnost v njeni vzdolžni ojačitvi. EN 1993-1-5, C.5 (5) priporoča najprej izbiro vodilne nepopolnosti, kateri pripišemo še dodatne nepopolnosti v zmanjšani vrednosti amplitud nepopolnosti na 70%. Merodajna za konstrukcijo je najbolj neugodna kombinacija nepopolnosti. Kadar merodajne

kombinacije ni mogoče enostavno prepoznati, izvedemo analizo vseh možnih kombinacij, za merodajno pa se privzame najbolj neugodna.

4.2 Definicija omejitev v obravnavanih primerih

Omejitve amplitude nepopolnosti smo povzeli po EN 1993-1-5, medtem ko omejitve začetne ukrivljenosti pločevine standard ne določa. Že predhodne študije (Kristanič, 2008) so pokazale, da za smiselne rezultate zgolj omejitve amplitud nepopolnosti ni zadosten pogoj. Za dodaten kriterij smiselne izvedljivosti smo v izvedenih primerih omejili še največje dovoljene ukrivljenosti pločevin. Za določitev smiselne vrednosti ukrivljenosti smo izdelali podrobnejšo analizo. V preglednici (Preglednica 3) so prikazane omejitve iz standarda. A in B sta vzdolžna in prečna dimenzija pločevine. Oznaka n_{st} pa označuje število ojačitev na pločevini.

Preglednica 3: Omejitve amplitud nepopolnosti iz standarda EN 1993-1-5

Amplituda globalne nepopolnosti e_G	$\min\left\{\frac{A}{400}, \frac{B}{400}\right\}$
Amplituda lokalne nepopolnosti e_L	$\min\left\{\frac{A}{200}, \frac{B}{(n_{st} + 1) \cdot 200}\right\}$

Po EN 1993-1-5 smo privzeli kombinacijo globalne in lokalne omejitve nepopolnosti, pri kateri h globalni prištejemo 70% lokalne nepopolnosti.

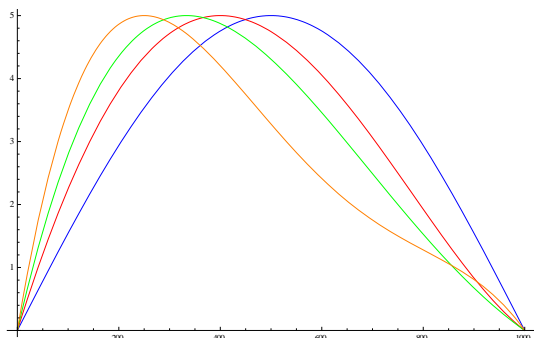
$$e_0 = e_G + 0,7 \cdot e_L \quad (21)$$

Poiskali smo smiselno vrednost za največjo dovoljeno ukrivljenost v geometriji začetne nepopolnosti. Evrokod določa samo največji dovoljen razpon nepopolnosti na določeni dolžini (širini) pločevine. Najbolj enostaven in največkrat uporabljen nastavek oblike nepopolnosti je sinusna funkcija. Sinusoida doseže vrh na sredini panela, kjer je tudi ukrivljenost največja. Ta se nam ne zdi realno največja možna vrednost ukrivljenosti, zato smo za opis nepopolnosti poiskali nekaj funkcij, ki smo jih imenovali "funkcije izmaknjeni sinus". Podobne so sinusoidi, le da imajo vrh nekoliko izmaknjen proti robu panela. Njihov vrh smo definirali na izbranih širinah panela: 2/5, 1/3 in 1/4. Obliko nepopolnosti po navadi zapišemo kot sinusno funkcijo (Slika 10 in Slika 11; modra funkcija F05). V primeru izmaknitve, pa te funkcije ne moremo več zapisati kot obliko sinusne krivulje, zato smo kot najboljšo in najhitrejšo rešitev izbrali polinom četrtega reda; prikazan na slikah (Slika 10 in Slika 11), funkcije rdeče (F04), zelene (F033) in oranžne barve (F025). V nadaljevanju se na funkcijo sklicujemo z barvo (Preglednica 4). Ukrivljenost smo označevali s simbolom κ .

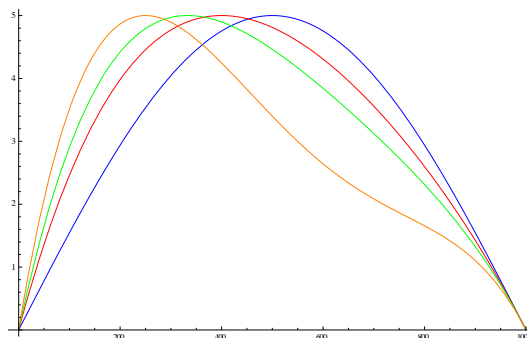
Preglednica 4: Označevanje oblik

barva	vrh	funkcija
modra	1/2	F05
rdeča	2/5	F04
zelena	1/3	F033
oranžna	1/4	F025

Naredili smo dva nabora oblik, pri katerih smo upoštevali polinom četrtega reda in sta prikazani na slikah (Slika 10 in Slika 11). Če si natančneje ogledamo prikazane nastavke oblik, vidimo da se v obeh primerih funkcija četrtega reda izkaže za dovolj dobro izbiro. Do večjih odstopanj pride le pri oranžni funkciji F025, ki na nekem območju definira konkavno obliko.



Slika 10: Primerjava oblik A



Slika 11: Primerjava oblik B

Funkcija z vrhom na sredini panela je sinusna. Funkcije za vrh v $2/5$, $1/3$ in $1/4$ smo določili iz robnih pogojev (vrednost funkcije in njenega odvoda v določenih točkah). Funkcije so polinomi četrtega reda (22), zato smo za definicijo funkcije zapisali pet robnih pogojev:

$$f(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (22)$$

Preglednica 5 in Preglednica 6 se nanašata na primer, ko je vrh na $1/4$ širine pločevine (oranžna krivulja).

Preglednica 5: Robni pogoji za primer A

$f(0) = 0$	$f(b) = 0$	$f\left(\frac{b}{4}\right) = e_{max}$	$f'\left(\frac{b}{4}\right) = 0$	$f\left(\frac{3}{4}b\right) = X$
------------	------------	---------------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

Vrednost X (Preglednica 5) v petem robnem pogoju smo določili s poskušanjem, da se je krivulja čim bolj prilagajala obliki sinusne krivulje (Slika 10):

- F04: vrednost $X=0,5$ (rdeča funkcija)
- F033: vrednost $X=0,4$ (zelena funkcija)
- F025: vrednost $X=0,3$ (oranžna funkcija)

Preglednica 6: Robni pogoji za primer B

$f(0) = 0$	$f(b) = 0$	$f\left(\frac{b}{4}\right) = e_{max}$	$f'\left(\frac{b}{4}\right) = 0$	$f'(b) = Y$
------------	------------	---------------------------------------	----------------------------------	-------------

Vrednost Y (Preglednica 6) smo določili iz odvoda sinusne funkcije F05, z vrhom na $1/2$, na mestu $x = b$. Na ta način smo funkcije F04, F033 in F025 še bolj približali sinusni obliki (Slika 11).

Zgornjo mejo ukrivljenosti nepopolne pločevine smo določili kot ukrivljenost na meji tečenja. Ta je odvisna samo od deformacij na meji tečenja ($\epsilon_y = E * \sigma_y$) in debeline pločevine t , kjer je E elastični modul materiala in σ_y napetost na meji tečenja. Imenujemo jo ukrivljenost na meji tečenja in jo označimo s κ_{Yield} . Njena velikost je enaka za vse vitkosti, zato je neodvisna od širine panela. Izračuna se z enačbo:

$$\kappa_{Yield} = \frac{2 * \epsilon_y}{t} \quad (23)$$

V uvodu smo povedali, da Evrokod določa samo mejno amplitudo nepopolnosti, ne določa pa ukrivljenosti. Obliko nepopolnosti zapišemo s sinusno funkcijo, ki ima vrh na sredini (modra funkcija na sliki Slika 10), kjer pa je tudi mesto največje ukrivljenosti. To ukrivljenost smatramo kot spodnjo mejo, in jo posredno, preko naše interpretacije, določa standard. Označimo jo s κ_{05} . Odvisna je od omejitve e_{max} in vitkosti pločevine (panela).

4.2.1 Primerjava ukrivljenosti v odvisnosti od vitkosti pločevine

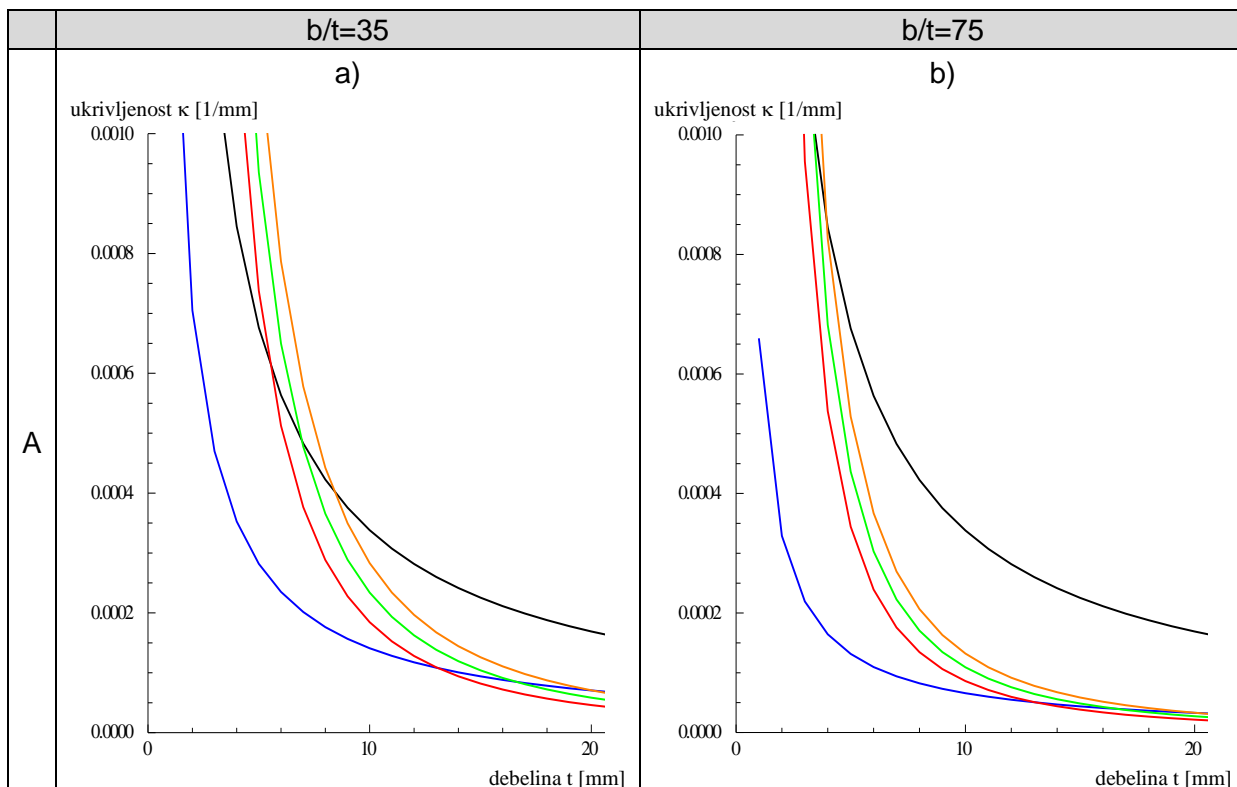
V enačbi ukrivljenosti na meji tečenja (23) kot spremenljivka nastopa samo debelina pločevine t . V funkciji ukrivljenosti (22) za polinome F05, F04, F033 in F025 pa je spremenljivka samo širina panela b . Ukrivljenost bi morala biti po definiciji odvisna od debeline pločevine. V našem primeru pa v funkcijah ukrivljenosti nastopa le širina panela, ki jo zaradi omejitve amplitude nepopolnosti zahteva Evrokod (21). Dodatno se v polinomih oblike nepopolnosti F04, F033 in F025, širina pojavi tudi v samem zapisu polinoma. V računskih primerih smo si izbrali pločevine z vitkostmi $b/t = 35, 50, 75, 100$. Ker vitkosti pločevin poznamo, lahko b izrazimo kot:

$$b = vitkost * t; \quad t \in [1, 40] \quad (24)$$

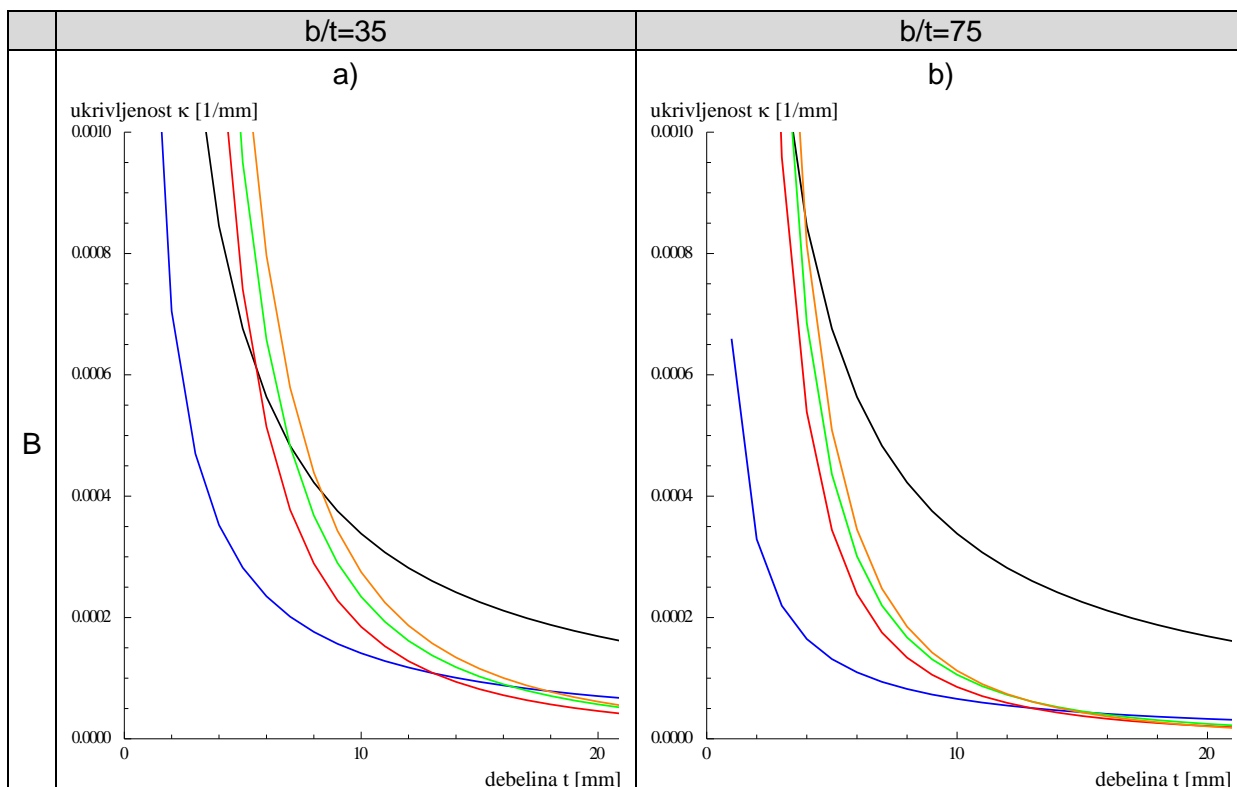
Da med seboj lahko primerjamo vseh pet krivulj ukrivljenosti (za določeno vitkost, ki je konstanta), smo funkcijo ukrivljenosti zapisali v odvisnosti od debeline t . S tem ukrepom, tako v enačbi za ukrivljenost na meji tečenja, kot v funkcijah ukrivljenosti za polinome, sedaj nastopa ena sama spremenljivka (debelina t). Tak način prikaza rezultatov nam da direktno primerjavo ukrivljenosti na enem grafu v odvisnosti od ene spremenljivke. Če bi želeli preveriti pri kateri širini b dobimo neko ukrivljenost (velja za modro, rdečo, zeleno in oranžno krivuljo), bi uporabili enačbo (24). V nadaljevanju smo se sklicevali predvsem na vrednost ukrivljenosti pri debelini pločevine $t=10$ mm. Spodaj sta zaradi preglednosti prikazani samo dve sliki za vsak primer A in B.

Preglednica 7: Označevanje oblik

barva	vrh	funkcija	ukrivljenost
črna	/	/	κ_{Yield}
modra	1/2	F05	κ_{05}
rdeča	2/5	F04	κ_{04}
zeleno	1/3	F033	κ_{033}
oranžna	1/4	F025	κ_{025}



Slika 12: Izbrana primera spreminjanja ukrivljenosti glede na debelino panela za krivulje A



Slika 13: Izbrana primera spreminjanja ukrivljenosti glede na debelino panela za krivulje B

Iz primerjave grafov primera A in primera B (Slika 12 in Slika 13) za določeno vitkost, v sami obliki velikih razlik ni moč opaziti. Če pa znotraj posameznega nabora oblik nepopolnosti med seboj primerjamo krivulje ukrivljenosti, opazimo, da vrednost modre, rdeče, zelene in oranžne krivulje z večanjem vitkosti pada. Rdeča, zelena in oranžna krivulja presežejo ukrivljenost na meji tečenja. V primeru vitkosti $b/t=35$ (Slika 12a in Slika 13a) je črna krivulja presežena pri pločevinah tanjših od debeline $t \approx 8$ mm pri oranžni krivulji, $t \approx 7$ mm pri zeleni krivulji in $t \approx 6$ mm pri rdeči krivulji. Na sliki (Slika 12b) in sliki (Slika 13b) pa do prekoračitve ukrivljenosti na meji tečenja pride pri manjših debelinah pločevine. Ukrivljenost na meji tečenja je pri debelejših pločevinah manjša. Če izvedemo primerjavo velikosti med ukrivljenostjo za pločevine debeline $t=10$ mm z največjo dovoljeno ukrivljenostjo na meji tečenja materiala κ_{Yield} , dobimo:

Preglednica 8: Primerjava ukrivljenosti med primeri A in B za $b/t=35$

$b/t=35$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{05}$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{04}$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{033}$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{025}$
A	2,398	1,832	1,445	1,194
B	2,398	1,855	1,527	1,230
razlika [%]	0,0	1,2	5,6	3,0

Preglednica 9: Primerjava ukrivljenosti med primeri A in B za $b/t=50$

$b/t=50$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{05}$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{04}$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{033}$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{025}$
A	3,426	2,618	2,065	1,706
B	3,426	2,650	2,181	1,757
razlika [%]	0,0	1,2	5,6	3,0

Preglednica 10: Primerjava ukrivljenosti med primeri A in B za $b/t=75$

$b/t=75$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{05}$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{04}$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{033}$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{025}$
A	5,138	3,927	3,097	2,558
B	5,138	3,975	3,272	2,636
razlika [%]	0,0	1,2	5,6	3,0

Preglednica 11: Primerjava ukrivljenosti med primeri A in B za $b/t=100$

$b/t=100$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{05}$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{04}$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{033}$	$\kappa_{Yield}/\kappa_{025}$
A	6,851	5,236	4,129	3,411
B	6,851	5,300	4,363	3,515
razlika [%]	0,0	1,2	5,6	3,0

Opazimo, da se z večanjem vitkosti panela velikost ukrivljenosti manjša. To je razvidno že iz primerjave slik (Slika 12a in b), ter slik (Slika 13a in b). Razlika med κ_{Yield} in ukrivljenostmi dobljenimi iz funkcij F05, F04, F033 in F025 pa je z večanjem razmerja b/t vedno večja. Lahko bi rekli, da se vrednost ukrivljenosti za $t=10$ mm krivulj κ_{04} , κ_{033} , κ_{025} približuje

vrednosti K_{05} , ki je definirana kot sinusna funkcija. Velikost ukrivljenosti na mestu največje nepopolnosti rdeče, zelene in oranžne funkcije je vedno večja od modre krivulje. V preglednicah (Preglednica 8, Preglednica 9, Preglednica 10 in Preglednica 11) je v četrti vrstici izračunana razlika v vrednosti ukrivljenosti med naboroma oblik A in B. Ta se v odvisnosti od vitkosti ne spreminja. Očitno je tudi, da je vrednost ukrivljenosti iz oblik nepopolnosti B v vseh primerih vitkosti manjša od ukrivljenosti iz nabora oblik A. Razlika znaša med 1,2% in 5,6%. Z večanjem vitkosti je odstopanje od krivulje K_{Yield} vedno večje.

Zanima nas kje med krivuljama ukrivljenosti K_{Yield} in K_{05} se nahajajo vrednosti izmaknjenih funkcij. Deleži razdalje med K_{05} in $K_{Polinom}$ od razlike med K_{Yield} in K_{05} so prikazani v preglednici (Preglednica 12).

$$delež = \frac{K - K_{05}}{K_{Yield} - K_{05}} \quad (25)$$

Lahko bi enostavno rekli, da je primerna omejitev vrednosti ukrivljenosti kar srednja vrednost med K_{Yield} in K_{05} . Za bolj natančno določitev si pogledjmo spodnjo tabelo (Preglednica 12).

Preglednica 12: Vrednost ukrivljenosti med največjo in najmanjšo vrednostjo za $t=10$ mm

	b/t	35	50	75	100
A	K_{04} [1/mm]	0,221	0,127	0,075	0,053
	K_{033} [1/mm]	0,471	0,272	0,159	0,113
	K_{025} [1/mm]	0,721	0,416	0,244	0,172
B	K_{04} [1/mm]	0,209	0,121	0,071	0,050
	K_{033} [1/mm]	0,408	0,235	0,138	0,097
	K_{025} [1/mm]	0,679	0,391	0,229	0,162

Lahko potrdimo preteklo ugotovitev, da so vrednosti ukrivljenosti za B v vseh primerih vitkosti manjše od A. Tako npr. pri vitkosti $b/t=35$ vrednost oranžne ukrivljenosti preseže srednjo vrednost med največjo in najmanjšo ukrivljenostjo, in znaša 0,721. Ta vrednost se z večanjem vitkosti manjša, saj se krivulja vedno bolj približuje modri krivulji ukrivljenosti funkcije F05, in pri vitkosti $b/t=100$ znaša le še 0,172. Vrednosti v naboru B so manjše v skladu z izračuni prikazani v preglednicah: Preglednica 8, Preglednica 9, Preglednica 10 in Preglednica 11.

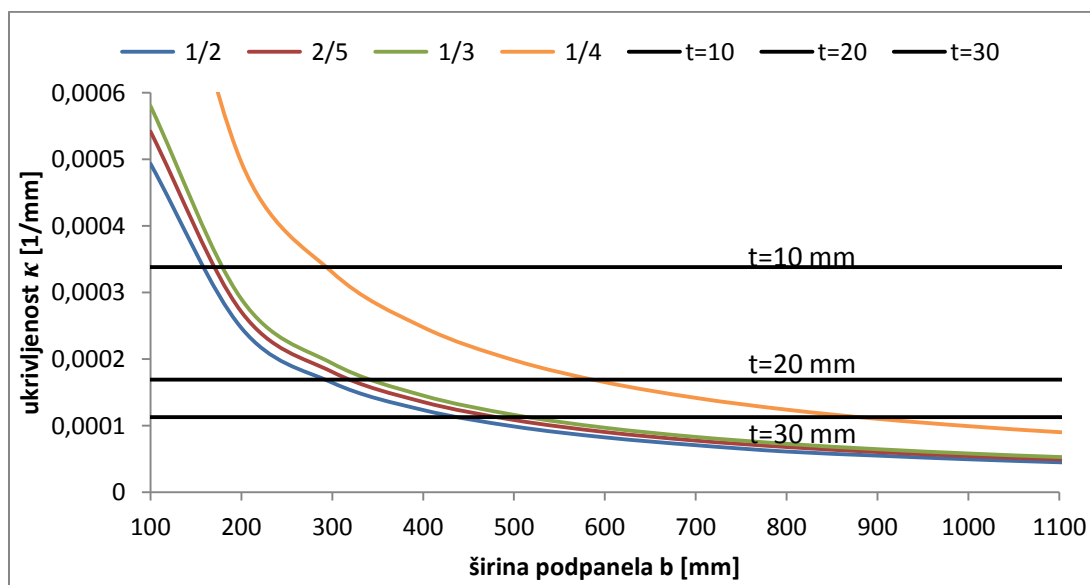
Zanimal nas je vpliv omejitve ukrivljenosti na določitev najbolj neugodne nepopolnosti, zato smo omejitev povečali in za smeselno vrednost izbrali največjo ukrivljenost oranžne krivulje, ki je večja od vrednosti, ki jo dobimo iz oblike nepopolnosti predlagane v Evrokodu (naša interpretacija) in manjša od največje ukrivljenosti na meji tečenja. Vrednost je višja zaradi izbire izmaknjene sinusne krivulje, ki da v primerjavi z navadno sinusno krivuljo večjo ukrivljenost. Poleg tega je ta vrednost največja izmed vseh obravnavanih krivulj in predstavlja najbolj neugodno omejitev (dovoljuje največjo ukrivljenost ob nespremenjeni omejitvi amplitude nepopolnosti). Višja vrednost omejitve ukrivljenosti pri reševanju optimizacijskega

problema dovoljuje prispevke oblik višjih redov (bolj gosto nagubani nastavki z večjim številom polvalov).

4.2.2 Krivulje ukrivljenosti v odvisnosti od širine panela v primerjavi z ukrivljenostjo na meji tečenja (alternativni prikaz)

Za določitev ukrivljenosti v odvisnosti od širine panela b smo uporabili nabor oblik A iz prejšnjega poglavja (Slika 10) in izračunali odvode teh funkcij v vrhu. Pri sinusni funkciji je mesto največje ukrivljenosti na mestu, kjer funkcija doseže maksimum. Ukrivljenosti polinomov četrtega reda pa maksimuma ne dosežejo ravno na mestu največje, čeprav bi iz oblike funkcije (Slika 10) to pričakovali. V nadaljevanju smo prikazovali kar ukrivljenosti na mestu maksimuma funkcije, ki se od največjih vrednosti ukrivljenosti ne razlikujejo veliko. V grafu (Slika 14) so prikazani samo primeri do širine 1100 mm, saj nas najbolj zanima območje, kjer krivulje ukrivljenosti polinomov sekajo ukrivljenost na meji tečenja.

Barve krivulj ukrivljenosti sovpadajo z barvami v prejšnjem poglavju (Preglednica 7). Vodravne črte (Slika 14) so vrednosti ukrivljenosti na meji tečenja, ki so izračunane z enačbo (23). Te ukrivljenosti so od širine panela neodvisne, odvisne so samo od materialnih karakteristik in debeline pločevine. Modra krivulja predstavlja ukrivljenost za sinusno funkcijo z vrhom na sredini pločevine. Rdeča, zelena in oranžna krivulja so vrednosti ukrivljenosti polinomov četrtega reda. V primeru rdeče in zelene krivulje ukrivljenosti vidimo, da večjega odstopanja od modre krivulje ukrivljenosti, pri kateri je vrh polinoma na sredini pločevine, ni. Najbolj odstopa oranžna krivulja, kar je posledica tako večje izmaknitve vrha iz sredine pločevine, kakor tudi same oblike polinoma. Na sliki primerjave oblik A (Slika 10) je vidno, da polinom na nekem območju definira konkavno obliko, kar tudi nekoliko poveča ukrivljenost na mestu največje amplitude nepopolnosti.



Slika 14: Krivulje ukrivljenosti v odvisnosti od širine

Za zgornjo omejitev smo privzeli mejo tečenja, spodnja meja pa je vrednost ukrivljenosti sinusne funkcije na sredini panela. Iz slike (Slika 14) vidimo, da pri majhnih širinah pločevin

presežemo mejno ukrivljenost na meji tečenja. V primeru oranžnega polinoma, je ta širina precej večja kot pri ostalih polinomih. V preglednici (Preglednica 13) so prikazane širine pločevin za različne polinome, ko je dosežena ukrivljenost na meji tečenja. Tako širino panela imenujemo kritična širina, pripadajoča vitkost pa je kritična vitkost. Vrednosti iz preglednice služijo namenu predstavitve rezultatov in jih v obravnavanih primerih nismo uporabljali. Poleg kritičnih širin panelov so v preglednici (Preglednica 13) podane tudi pripadajoče kritične vitkosti pločevin. Opazimo, da se vitkost pločevine znotraj enega polinoma (npr. modrega) ne spreminja. Če med seboj primerjamo polinome, pa se kritična vitkost pločevin z odmikanjem vrha amplitude od sredine pločevine večja. Pri oranžni funkciji je kritično vitkost $b/t=29$. V obravnavanih vitkosti (poglavje 4.2.1) vrednosti nižje od kritične vitkosti nismo uporabili. To pomeni, da pri naših obravnavanih pločevinah izbranih vitkosti, največje ukrivljenosti na meji tečenja nikoli nismo presegli.

Preglednica 13: Kritične širine in vitkosti pločevin

		K=K _{Yield}							
		modra		rdeča		zelena		oranžna	
t [mm]		b [mm]	b/t	b [mm]	b/t	b [mm]	b/t	b [mm]	b/t
10		146	15	160	16	183	18	293	29
20		292	15	321	16	366	18	586	29
30		438	15	481	16	548	18	879	29

4.2.3 Uporaba omejitev ukrivljenosti na računskih primerih

V analizo smo vključili dva primera pločevin: pločevino z eno ojačitvijo na sredini in pločevino z dvema simetričnima ojačitvama. V preglednici (Preglednica 14) so prikazane geometrijske karakteristike analiziranih pločevin. Baza oblik so Fourierjevi nastavki reda 5 (25 nastavkov, NFouRed=5). Mreža končnih elementov je M20, kar pomeni, da je v vsaki smeri 20 končnih elementov.

Preglednica 14: Geometrijske karakteristike analiziranih pločevin

Št.ojačitev	B [cm]	t [cm]	b/t	I _p [cm ⁴]	H _{st} [cm]	T _{st} [cm]	I _{st} [cm ⁴]	γ
1	150	1	50	13,74	11,70	1,17	511,89	37,27
2	200	1	66,7	18,32	14,28	1,43	997,19	54,45

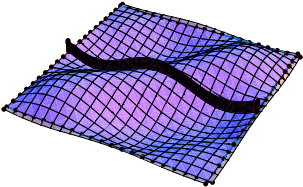
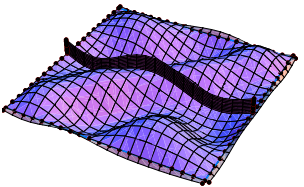
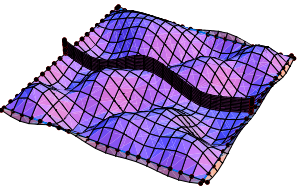
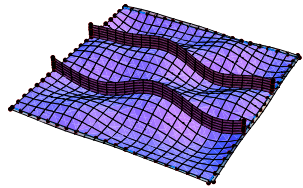
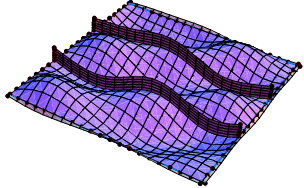
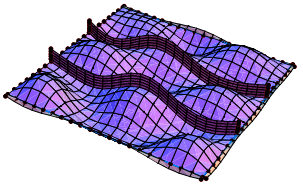
Naredili smo šest analiz z različnimi omejitvami največje ukrivljenosti (K_{05} , K_{025} , $1,5 \cdot K_{025}$, K_{Yield} in $2 \cdot K_{Yield}$ ter brez omejitve). Opazovali, smo kako velik vpliv ima ta vrednost na določitev najbolj neugodne oblike nepopolnosti.

Ukrivljenost je odvisna od največjega odmika nepopolnosti od idealne lege in oblike funkcije. V Evrokodu je odmik omejen s kombinacijo globalne in lokalne omejitve. Prav tako smo tudi mejno ukrivljenost zapisali kot kombinacijo globalne in lokalne ukrivljenosti. Zavedati se moramo, da je to samo neka vrednost, ki v nobeni točki mreže končnih elementov na pločevini ne sme biti presežena.

Iz preglednice (Preglednica 15) je razvidno, da z večanjem dovoljene ukrivljenosti, nosilnost pada. Razlika med nosilnostjo pločevine, kjer je omejitev ukrivljenosti oranžna krivulja (krivulja z vrhom na $\frac{1}{4}$ širine panela), in nosilnostjo pločevine, kjer je omejitev dvakratna vrednost ukrivljenosti na meji tečenja, je skoraj 10% v primeru pločevine z eno ojačitvijo in približno 6% v primeru pločevine z dvema ojačitvama. Če si ogledamo oblike najbolj neugodnih oblik nepopolnosti, vidimo, da se z večanjem dovoljene ukrivljenosti bolj izrazito pokažejo nepopolnosti višjega reda (vali s krajšo dolžino). Tako imenujemo nepopolnosti, kjer je globalna oblika nepopolnosti enaka tisti pri oranžni krivulji, lokalno pa na nekaterih mestih pride do vidno višjih ukrivljenosti (glej sliko oblike pri $2 \cdot Y_{\text{ield}}$). Analiza z omejitvijo ukrivljenosti v vrednosti dvakratne vrednosti ukrivljenosti na meji tečenja smo naredili samo z namenom preiskave. Dopustitev ukrivljenosti preko meje elastičnosti bi bilo v realnosti nesmiselno pričakovati.

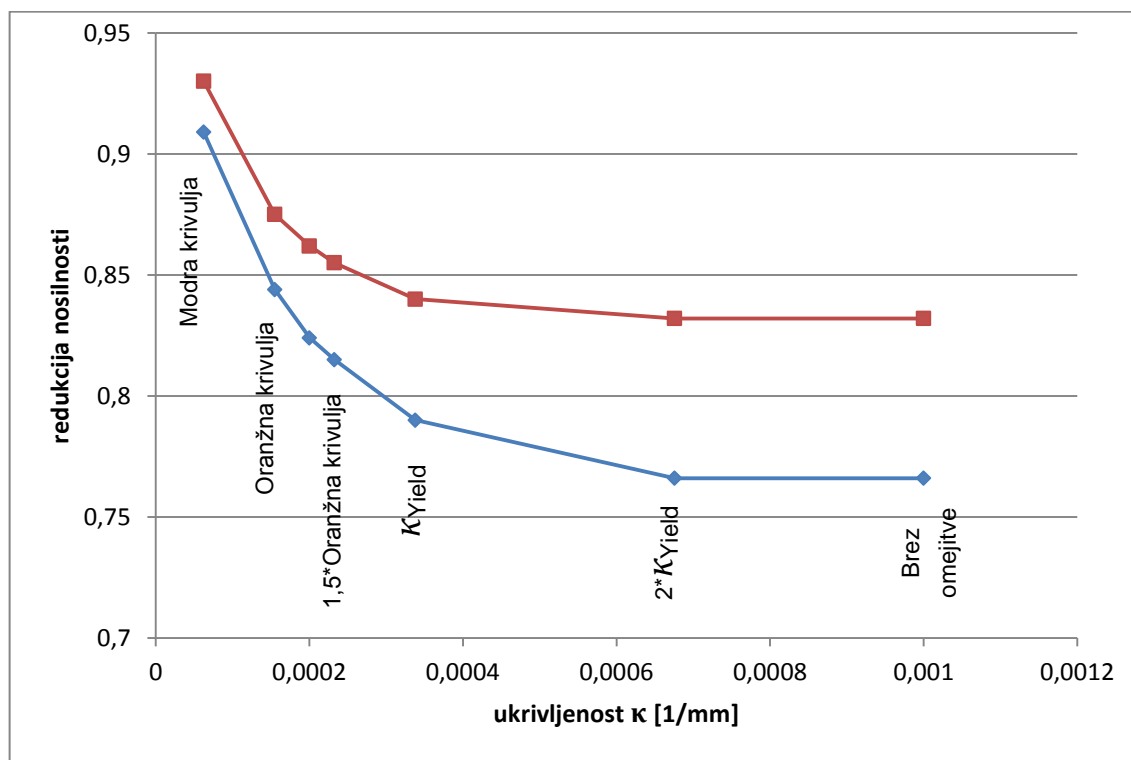
V preglednici (Preglednica 15) in v nadaljevanju smo obtežni faktor poimenovali kar nosilnost konstrukcije. To pomeni tudi delež polnoplastične nosilnosti pločevine, ki se zaradi strižne ali normalne obremenitve izboči. Poimenujemo ga lahko tudi redukcijski faktor ali faktor nosilnosti.

Preglednica 15: Primerjava oblik nepopolnosti pri različnih omejitvah ukrivljenosti

		oranžna krivulja	$1 \cdot K_{\text{Yield}}$	$2 \cdot K_{\text{Yield}}$
1	omejitev ukrivljenosti [1/mm]	0,000155	0,000338	0,000676
	Faktor nosilnosti	0,844	0,790	0,766
	najbolj neugodna oblika nepopolnosti			
2	omejitev ukrivljenosti [1/mm]	0,000161	0,000338	0,000676
	Faktor nosilnosti	0,877	0,837	0,828
	najbolj neugodna oblika nepopolnosti			

Iz slike odvisnosti nosilnosti pločevine od omejitve ukrivljenosti (Slika 15) je razvidno, da se nosilnost z večanjem največje dovoljene ukrivljenosti manjša. Prva točka na grafu (Slika 15)

se nanaša na pločevino, pri kateri smo ukrivljenost omejili z ukrivljenostjo modre krivulje (Slika 14), ki smo jo interpretirali kot omejitev Evrokod standarda za tanke pločevine. Ta predstavlja ukrivljenost pločevine, katere oblika je zapisana s sinusno funkcijo, z vrhom na sredini pločevine. Zadnja točka na zgornji krivulji pa predstavlja nosilnost pločevine, kjer ukrivljenosti nismo niti omejili. Opazimo, da sta nosilnosti pločevine dveh analiz, kjer ukrivljenosti nismo omejili in kjer smo dovolili plastifikacijo na mestu največje amplitude nepopolnosti v vrednosti dvojne ukrivljenosti na meji tečenja, enaki.



Slika 15: Odvisnost nosilnosti pločevine od omejitve ukrivljenosti

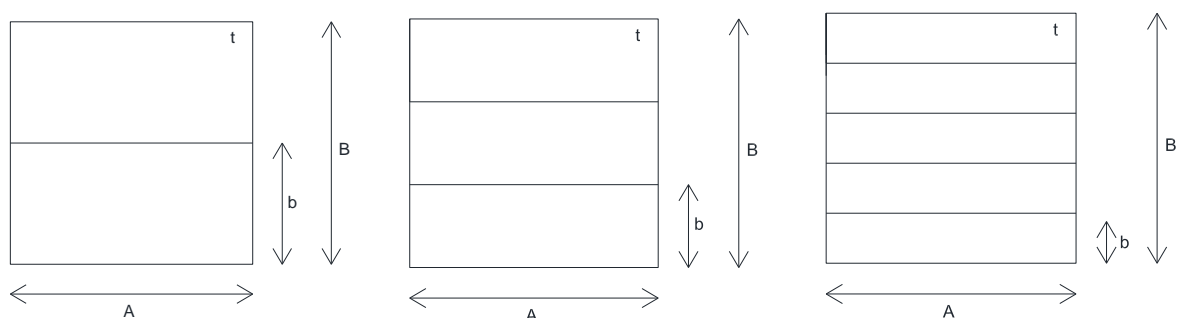
Želeli bi čim manjšo nosilnost pločevine, saj je le tak primer najbolj neugoden v projektiranju. Z zelo mehкими omejitvami (to je omejitev ukrivljenosti je majhna ali pa je sploh ni), bi dobili velike redukcije polnosplastične nosilnosti pločevine, vendar takih primerov v realnosti ne moremo pričakovati. Zato smo vrednost največje začetne ukrivljenosti omejili z vrednostjo, ki je po našem mnenju realno možna. Izmed vseh zgoraj analiziranih oblik nepopolnosti (Slika 10), je najbolj neugodna oranžna krivulja (vrh na $\frac{1}{4}$ širine panela). V izvedenih analizah smo opazili, da pri manjših vrednostih omejitve največje ukrivljenosti (v tem primeru oranžna krivulja), ne dosežemo največje amplitude nepopolnosti konstrukcije. Iz tega lahko sklepamo, da je vrednost ukrivljenosti v tem primeru strožja omejitev od vrednosti največje nepopolnosti. V analizi določanja najbolj neugodne začetne oblike nepopolnosti smo omejili največjo odmik od idealne lege in največjo ukrivljenost v pločevini. Z ukrivljenostjo oranžne krivulje smo omejili maksimalno dovoljeno začetno ukrivljenost pločevine v vseh točkah končnih elementov.

5 ANALIZA NAJBOLJ NEUGODNE ZAČETNE NEPOPOLNOSTI PLOČEVIN OBREMENJENIH S ČISTIM STRIGOM

5.1 Opis modela

5.1.1 Geometrija

Obravnavali smo pločevine z eno, dvema in štirimi ojačitvami. Za vsak primer smo posebej določili dimenzije, ki so točneje predstavljene v preglednicah Preglednica 28, Preglednica 29 in Preglednica 30 (poglavje 5.3). V občutljivostni analizi smo dimenzije izbrali poljubno. Slika 16 prikazuje parametre geometrijskih lastnosti pločevin.



Slika 16: Geometrija in oznake dimenzij obravnavanih primerov ojačanih pločevin

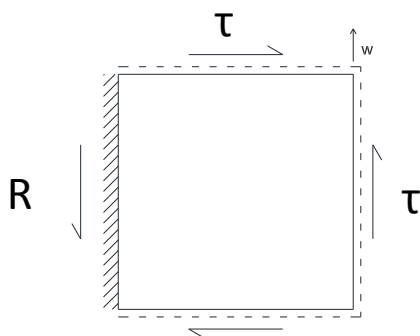
5.1.2 Material

Materialne karakteristike je potrebno modelirati kot karakteristične vrednosti. Glede na zahtevano natančnost in dovoljene deformacije pri analizi, so v EN 1993-1-5 predlagane štiri možnosti. V našem primeru smo uporabili material z majhno utrditvijo. Utrditev zanemarljivo vpliva na nosilnost obravnavanih priemerov pločevin.

5.1.3 Robni pogoji

Podpore pločevine smo definirali tako, da smo en rob podprli togo v ravnini pločevine, ostale pa členkasto. S tem smo dovolili horizontalne pomike pločevine in omogočili tvorbo nateznega pasu. Konstrukcija je togo podprta na robu, ki z direktno obtežbo ni omejen.

5.1.4 Obtežba



Slika 17: Shema strižne obtežbe

Z obtežbo dosežemo napetostno stanje, ki ustreza čistemu strigu v panelu. Obtežbo smo normirali na vrednost plastične strižne nosilnosti panela. Na ta način je definiran tudi obtežni faktor (delež polne plastične nosilnosti), ki ga v diplomski nalogi včasih poimenujemo še redukcijski faktor nosilnosti ali nosilnost. Konstrukcijo smo iz ravnotežne lege izmikali s kontroliranjem pomika v enem od vogalov (Slika 17).

5.2 Občutljivostna analiza

Občutljivostna analiza znotraj obravnave strižno obremenjenih pločevin zajema študijo izbire najmanjšega števila nastavkov nepopolnosti in najbolj grobo mrežo končnih elementov, ki še daje primerno natančnost rezultatov. Nastavke smo definirali na dva načina, ki sta bila v poglavju 3.7 tudi podrobneje prikazana.

Reprezentativne dimenzije pločevine in ojačitev smo izbrali brez posebnih omejitev, saj je bil namen raziskave samo določitev števila nastavkov in gostote mreže, na kar pa togost ojačitev in razmerje stranic pločevine nimata vpliva. Dimenziji A in B sta celotna širina in dolžina pločevine, dimenzija t pa je debelina panela. Z oznakama h_{st} in t_{st} smo poimenovali širino in debelino vzdolžne ojačitve. Dimenzija b je širina podpanela. V preglednici (Preglednica 16) so prikazane geometrijske lastnosti pločevin, na katerih smo izvedli občutljivostne analize. V spodnjem delu tabele so odebeljene vrednosti togost ojačitev, vitkost pločevine in razmerje stranic pločevine, ki najbolje opisujejo geometrijske lastnosti ojačene pločevine.

Preglednica 16: Geometrijske karakteristike obravnavanih pločevin v občutljivostni analizi

	Število ojačitev		
	1	2	4
A [mm]	2000	2000	2000
B [mm]	2000	2000	2000
b [mm]	1000	666,7	400
h_{st} [mm]	100	100	100
t [mm]	10	10	10
t_{st} [mm]	10	0	10
I_{sl} [cm ⁴]	300	300	300
I_{pl} [cm ⁴]	18,32	18,32	18,32
γ	16,4	16,4	16,4
b/T	100,0	66,7	40
α	1,0	1,0	1,0

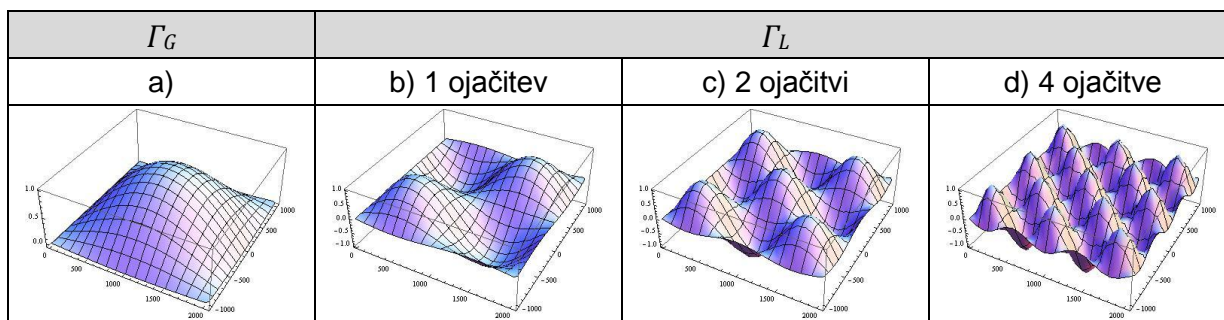
Hkrati smo za primerjavo vzeli vrednost, ki jo določa Evrokod. Le-ta pravi, da je število nastavkov v bazi oblik odvisno od števila ojačitev. Veljata enačbi:

$$\Gamma_{EC} = 1,0 * \Gamma_G + 0,7 * \Gamma_L \quad (26)$$

$$\Gamma_{EC} = -1,0 * \Gamma_G + 0,7 * \Gamma_L \quad (27)$$

Γ_G predstavlja globalno nepopolnost, brez upoštevanja ojačitev. Ta predstavlja en sam polval nad celotno pločevino v obeh smereh. Γ_L pa predstavlja lokalno obliko nepopolnosti, ki je definirana na vsakem podpanelu posebej (Preglednica 17). Izmed enačb (26, 27) je merodajna tista, ki da manjšo vrednost. V preglednici so grafično prikazani primeri oblik nepopolnosti za določeno število ojačitev, kot to določa standard Evrokod.

Preglednica 17: Grafičen prikaz aplikacije globalne in lokalne oblike nepopolnosti na pločevine



Občutljivostna analiza ne upošteva omejitev ukrivljenosti, kot smo jih določili v poglavju 4.2. Omejitve največjih nepopolnosti so določene po standardu Evrokod, ukrivljenosti pa so omejene z vrednostjo modre krivulje (poglavje 4.2, Slika 10 in Slika 11), ki je določena na sredini panela (podpanela) s sinusno krivuljo.

5.2.1 Primer ene vzdolžne ojačitve ($\alpha=1$; $\gamma=16,4$; $b/t=100$)

5.2.1.1 Število Fourierjevih nastavkov

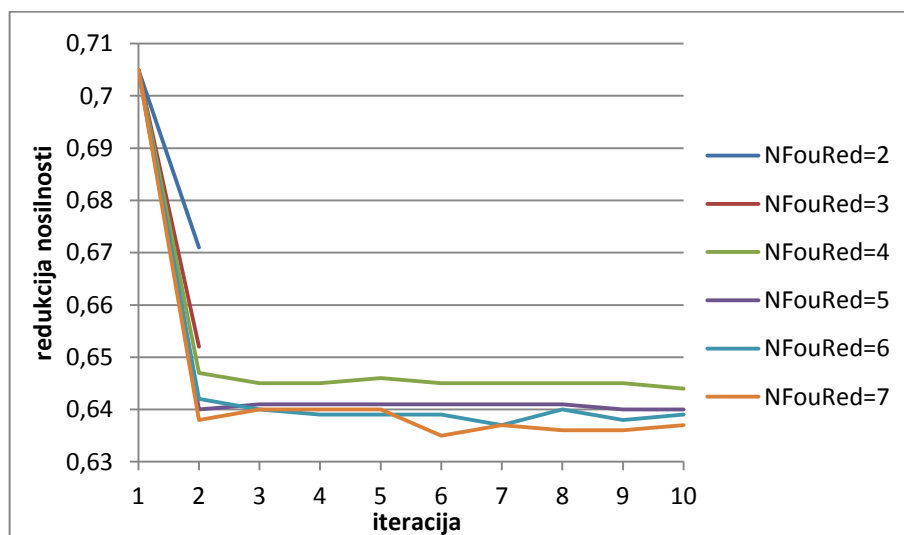
Določene preglednice s prikazom oblik nepopolnosti in redukcijskimi faktorji so prikazane v Prilogi A tega dokumenta.

Red nastavkov (v nadaljevanju tudi NFouRed) je enak številu polvalov v vsaki smeri. Število nastavkov (osnovnih oblik) pa je enako kartezijskemu produktu reda nastavkov v vsaki smeri. Število nastavkov uporabljenih v analizi določa število oblik v bazi oblik. Od tega je odvisna tudi zanesljivost in točnost rezultatov, saj vemo, da več nastavkov kot imamo, bolj točen bo rezultat.

Gostoto mreže končnih elementov smo izbrali relativno redko, saj bi z definicijo zelo goste mreže za izračun potrebovali precej več časa. V analizah smo uporabili tip mreže M20 (glej poglavje 5.2.1.3). Podrobno študijo vpliva gostote mreže smo naredili ločeno od študije določitve potrebnega števila nastavkov.

Nosilnost, ki jo izpiše algoritem kot rezultat analize, pomeni delež polne plastične nosilnosti pločevine obremenjene z neko obtežbo. V našem primeru je to čisti strig. Slika 18 prikazuje spremembo faktorja nosilnosti pločevine po iteracijah v odvisnosti od števila nastavkov. Opazimo, da v primeru štirih Fourierjevih nastavkov (red nastavkov v tem primeru je 2; NFouRed=2) algoritem reši optimizacijski problem iskanja najbolj neugodne oblike

nepopolnosti v zgolj dveh iteracijah. Nosilnost pločevine je kljub temu nekoliko nižja od nosilnosti dobljene po Evrokodu, vseeno pa analiza s samo štirimi Fourierjevimi nastavki ni zadostna. Z večjim številom nastavkov lahko veliko bolje opišemo obliko nepopolnosti, kar se dobro vidi iz primerjave končnih oblik nepopolnosti (Preglednica 101). Z večanjem števila nastavkov se oblika nepopolnosti ne spreminja več veliko, spreminja pa se dobljena nosilnost konstrukcije. Umiri se padanje nosilnosti pločevine, tako glede na število nastavkov kot med iteracijami znotraj analize.



Slika 18: Faktorji nosilnosti po iteracijah za primer pločevine z eno ojačitvijo

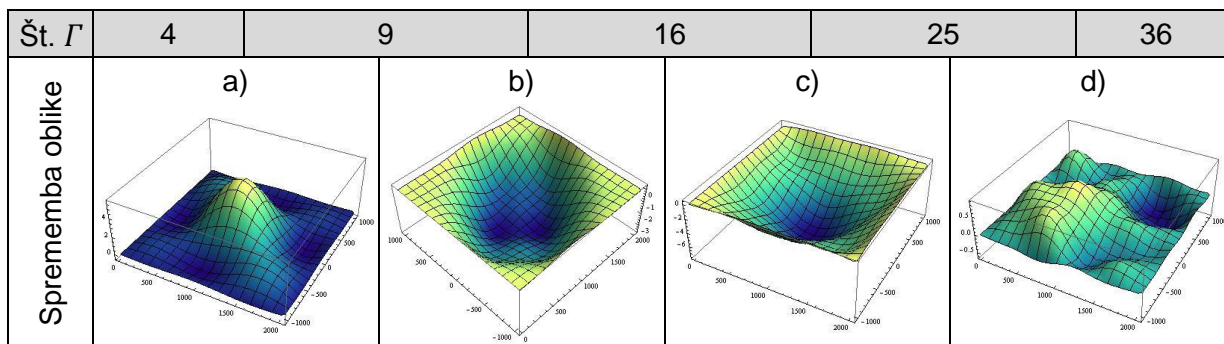
Naredili smo tudi enostavno primerjavo oblik z različnimi redi Fourierjevih nastavkov. Red nastavkov pomeni število polvalov sinusne oblike v vsaki smeri pločevine. Tako smo lahko zelo natančno spremljali kje se zgodijo največje spremembe v obliki pri večanju števila Fourierjevih nastavkov. Sprememba oblike je izražena kot razlika z-koordinat vozlišč končnih elementov, ki jo dobimo tako, da od z-koordinat vozlišč j-te analize odštejemo z-koordinato i-te analize, pri čemer i in j v našem primeru predstavljata občutljivostno analizo glede na število Fourierjevih nastavkov (oznaka i je število Fourierjevih nastavkov):

$$\Delta z = z_j - z_i, \quad (28)$$

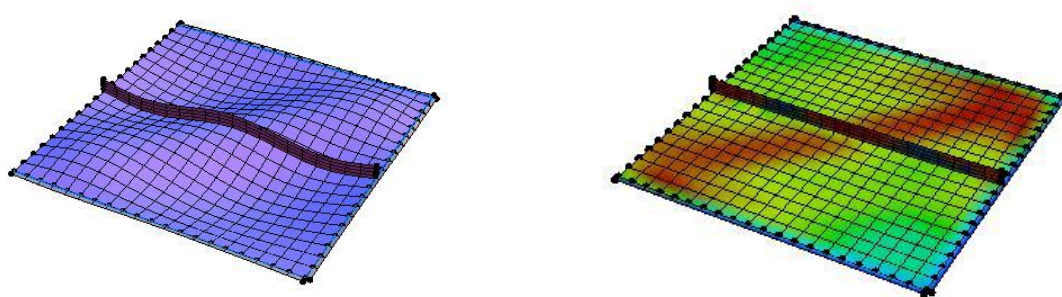
kjer velja $i < j$. V tem primeru vedno dobimo spremembo oblike med analizo z večjim številom Fourierjevih nastavkov in predhodno analizo z manjšim številom nastavkov.

Slika 19 nazorno prikazuje lokacijo največje spremembe oblike med dvema analizama. Kot primer se sklicujmo na sliko a) (Slika 19a), kjer smo prikazali razliko z-koordinat med analizama z devetimi in štirimi nastavki ($i=4, j=9$). Opazno je največja sprememba na sredini pločevine na mestu ojačitve (≈ 6 mm), saj smo v analizi z devetimi Fourierjevimi nastavki zajeli tudi obliko, ki ravno na tem mestu definira nepopolnost. Kar pa ni veljalo za analizo s štirimi nastavki. Če se sklicujemo še na izgled oblike nepopolne pločevine (Preglednica 101), vidimo, da se pri analizi z vsaj devetimi Fourierjevimi nastavki kot najbolj neugodna oblika nepopolnosti izkaže oblika, ki ima val v nateznem pasu. To je tudi smiselno, saj se pri strižni

obremenitvi koncentracije nateznih napetosti formirajo na podobnem odseku kot val nepopolnosti (Slika 20). Čeprav izgled najbolj neugodne oblike imperfekcije pri analizah s 16, 25 in 36-imi nastavki ostaja enak, pa iz slike (Slika 19) razberemo, da se spremembe v obliki dogajajo na drugih mestih kot v predhodni primerjavi. Spremembe v obliki med analizami s 25 in 36-imi nastavki ni več mogoče opaziti. To potrjuje tudi slika (Slika 19d), kjer do sprememb pride na več mestih največ $\pm 0,9$ mm.



Slika 19: Razlika med oblikami z različnim številom Fourierjevih nastavkov



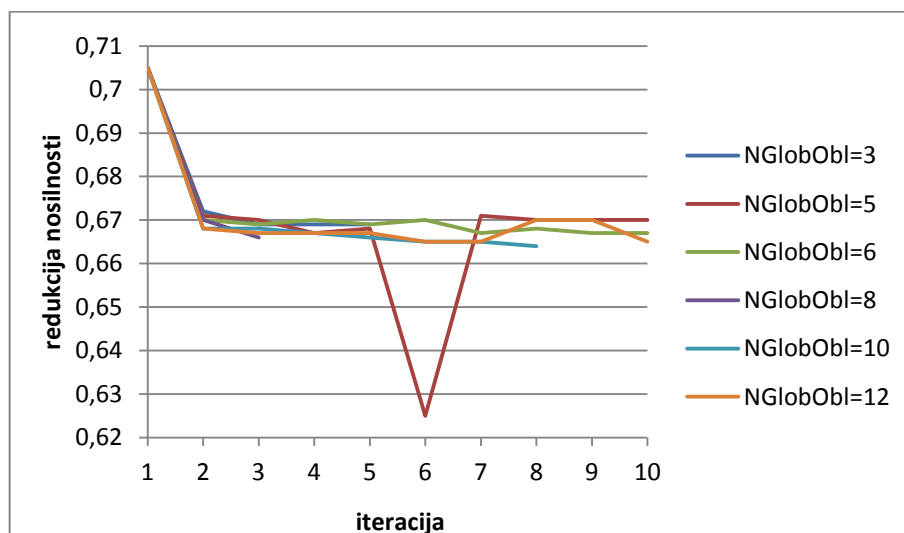
Slika 20: Primerjava najbolj neugodne oblike nepopolnosti in Misesovih napetosti za $N_{FouRed}=16$

Na podlagi vseh izvedenih analiz smo se odločili, da z zadostno natančnostjo obliko najbolj neugodne začetne nepopolnosti opišemo s 25 Fourierjevimi nastavki ali t.i. nastavki reda 5 ($N_{FouRed}=5$). Sprememba v nosilnosti v primerjavi z analizo s 36-imi nastavki je le 0,3%. Kljub temu, da je bilo dokazano da zadostujejo nastavki reda 5, bi bilo računsko sprejemljivo uporabiti tudi večje število nastavkov.

5.2.1.2 Število ročnih nastavkov

Gostoto mreže končnih elementov smo določili enako kot v primeru Fourierjevih nastavkov, kjer smo izbrali tip mreže M20 (glej poglavje 5.2.1.3). V občutljivostno analizo smo zajeli le oblike določenega reda nepopolnosti ($NGlobObl$), saj bi bile analize vseh stopenj preveč dolgotrajne (pri eni ojačitvi npr. 4,7,9,11). Z analiziranim številom oblik smo dobili zadostno število rezultatov. V preglednici (Preglednica 102) so prikazane oblike globalne nepopolnosti za vsako izračunano analizo. Opazimo, da se oblike z večanjem števila nastavkov ne spreminjajo veliko. Iz primerjave z oblikami nepopolnosti pri Fourierjevih nastavkih pa je očitno, da se v tem primeru ne tvori izrazit val v območju nateznega pasu. Iz primerjave nosilnosti pločevin (Preglednica 102 in Slika 21) vidimo, da so vrednosti nosilnosti v vseh

primerih približno enake. Največje odstopanje sicer dobimo pri analizi z redom števila nastavkov oblik $NGlobObl=5$, kjer v eni iteraciji nosilnost pade, v vseh ostalih iteracijah pa dobimo vrednosti podobne vrednostim ostalih analiz. Rezultat je sicer eden izmed rešitev najbolj neugodne oblike nepopolnosti, vendar zaradi tako velikega odstopanja od ostalih rešitev, rezultatu optimizacijskega problema v tej iteraciji ne zaupamo. V primerjavi z nosilnostjo izračunano po priporočilu standarda Evrokod, se odstopanje giblje med 0,7 in 1,5%, z izjemo analize $NGlobObl=5$, kjer je odstopanje 7,3%.



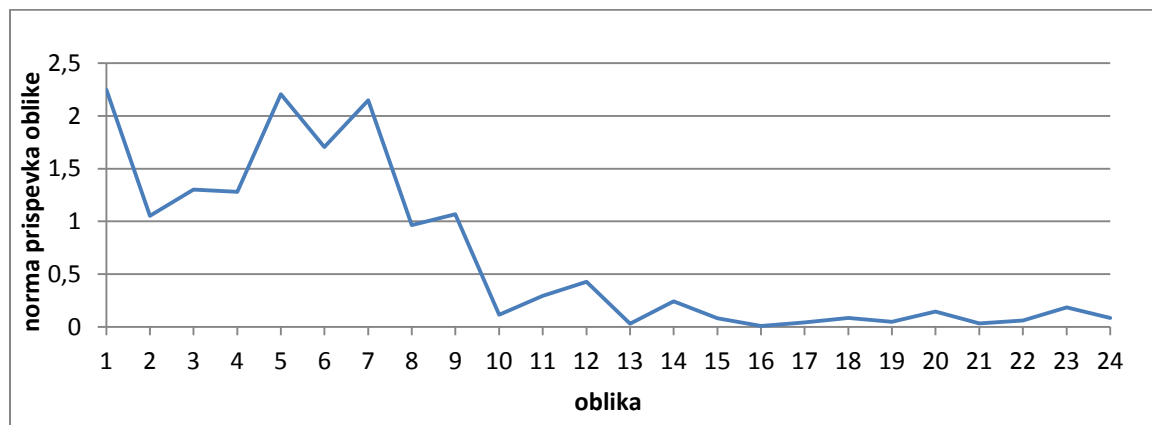
Slika 21: Faktorji nosilnosti po iteracijah za primer pločevine z eno ojačitvijo

Kljub temu da nosilnost z večanjem števila nastavkov pada, pa je iz slike (Slika 22) moč opaziti, da se lokalna oblika ves čas ohranja. Pri Fourierjevih nastavkih smo prišli do ugotovitve, da pri večjem številu nastavkov pride do izraza lokalno spreminjanje oblike, medtem ko je globalna oblika ves čas ostajala enaka. V primeru z ročnimi nastavki pa se spreminja le z-koordinata oblike pločevine na način, da oblika ves čas ostaja enaka, vse izbočitve in vbočitve pa se enakomerno poglobljajo ali dvigajo. Opazimo, da lokalno niso pomembne nobene oblike višjega reda (oblike z večjim številom polvalov).

Št. Γ	9	15	18	24	30
Sprememba oblike	a)	b)	c)	d)	
max z [mm]	5,75	-5,68	8,57	-8,07	

Slika 22: Razlika med oblikami z različnim številom ročnih nastavkov za primer pločevine z eno ojačitvijo

Na grafu (Slika 23) so prikazani prispevki posameznega nastavka h končni obliki nepopolnosti. Vidimo, da imajo velik vpliv oblike od 1 do 9. To so oblike, ki bi jih zajeli z ročnimi nastavki reda 3 (NGlobObl=3) in imajo po tri polvalove v vzdolžni smeri pločevine. Vse višje oblike, kot kaže Slika 23, imajo prispevek zelo majhen, kar še dodatno potrjuje izjavo, da oblike višjega reda nimajo velikega vpliva. To lahko vidimo pri oblikah nepopolnosti, kjer ni lokalnih izbočitev oz. vbočitev (Preglednica 102).



Slika 23: Prispevek posamezne oblike ročnih nastavkov h končni obliki geometrijske nepopolnosti

5.2.1.3 Gostota mreže

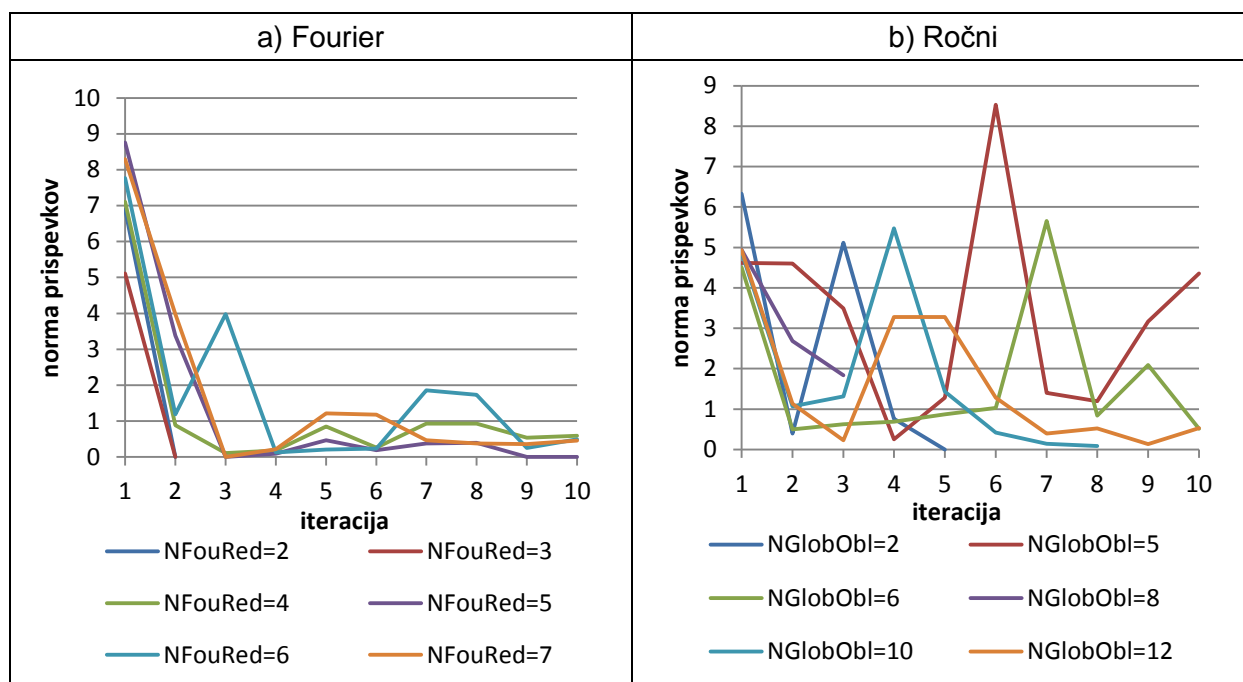
Od gostote mreže končnih elementov je odvisna zanesljivost rezultatov. Z večanjem gostote pridobimo na natančnosti a ob tem povečamo zahtevnost računa. Naredili smo 4 analize z različnimi gostotami mreže; M10, M20, M40 in M80 za vsak primer. Število pomeni koliko končnih elementov je definiranih vzdolž ene stranice panela. Ker je panel kvadraten smo v obeh smereh definirali enako število končnih elementov. V primeru lihega števila podpanelov smo pazili samo na to, da je bila količina končnih elementov na enem podpanelu vedno sodo število. Izkuštvno priporočilo je uporaba vsaj petih končnih elementov v prečni smeri podpanela. Z oznako LPF smo označili nosilnost pločevine (delež polne plastične nosilnosti). V primeru mreže M10 je nosilnost v primerjavi z mrežo M20 za 11,7% večja. Nosilnost pločevine na kateri je definirana mreža končnih elementov M40 pa je za 4,1% manjša od M20 (Preglednica 18). Kot referenčno vrednost smo vzeli nosilnost mreže tipa M20. Tako mrežo smo aplicirali tudi na pločevine v analizah za določanje potrebnega števila Fourierjevih in ročnih nastavkov. Opazimo, da nosilnost z zgoščanjem mreže eksponentno pada. Pri analizi pločevine z mrežo M80 je sprememba nosilnosti v primerjavi z mrežo M40 samo še 1%. Vemo da taka sprememba v nosilnosti jeklenih konstrukcij ni tako majhna, vendar smo zaradi prezahtevnosti računa z najgostejšo mrežo izbrali tip mreže M40.

Preglednica 18: Nosilnost pločevine za različne tipe mrež končnih elementov (ena ojačitev)

Tip mreže	M10	M20	M40	M80
LPF_{Mx}/LPF_{M20}	1,12	1,00	0,96	0,95
ΔLPF [%]	11,7	0,0	-4,1	-5,5

5.2.1.4 Primerjava in zaključki

Graf (Slika 24) prikazuje krivulje norm prispevkov uteži nastavkov geometrijskih nepopolnosti. Normirana je vrednost prispevkov uteži nastavkov na koncu aktualne in prejšnje iteracije. Vrednost pri prvi iteraciji pomeni primerjavo rezultata optimizacijskega problema iz prve iteracije in začetne oblike nepopolnosti. Začetno obliko nepopolnosti v algoritmu ročno podamo. V naših primerih smo vedno za začetno obliko izbrali kar prvo obliko globalnih nepopolnosti, ki ima globalno en polval v vzdolžni in en polval v prečni smeri, neozirajoč se na geometrijo in število ojačitev. Torej spodnje krivulje prikazujejo spremembo oblike med iteracijami. Večja kot je vrednost norme, bolj se je oblika v tej iteraciji spremenila. V primerih, kjer je iteracij manj kot 10, se je algoritem predhodno zaustavil, saj smo zadostili pogoju tolerance. Toleranca je dosežena takrat, ko je norma prispevkov dveh zaporednih iteracij dovolj majhna, da lahko smatramo, da se oblika več ne spremeni. Takrat se je račun zaustavil in zadnja oblika je po navadi tudi tista, kjer dosežemo najnižjo nosilnost. Toleranco smo izkustveno omejili na 0,1. Poglejmo si primer pločevine z eno ojačitvijo in primerjajmo med seboj spremembo norme prispevkov ko kombiniramo nastavke definirane s Fourierjevo vrsto ali pa jih določimo ročno (ročni nastavki). Opazimo, da pri Fourierjevih nastavkih poleg nosilnosti z večanjem iteracij k vrednosti 0 konvergirajo norme prispevkov. Drugače pa se dogaja v primeru ročnih nastavkov. Tam se vrednost norm z iteracijami ne umiri tako kot v primeru Fourierjevih nastavkov. Razlog za tako obnašanje je ta, da so nastavki definirani na podpanelih, kjer se spreminja samo število polvalov v vzdolžni smeri. Pri Fourierjevih nastavkih pa so nastavki definirani na celotni pločevini, kjer se število polvalov spreminja hkrati v vzdolžni in prečni smeri. Zato v primeru ročnih nastavkov v večji meri vplivamo na obliko nepopolnosti na lokalni ravni.



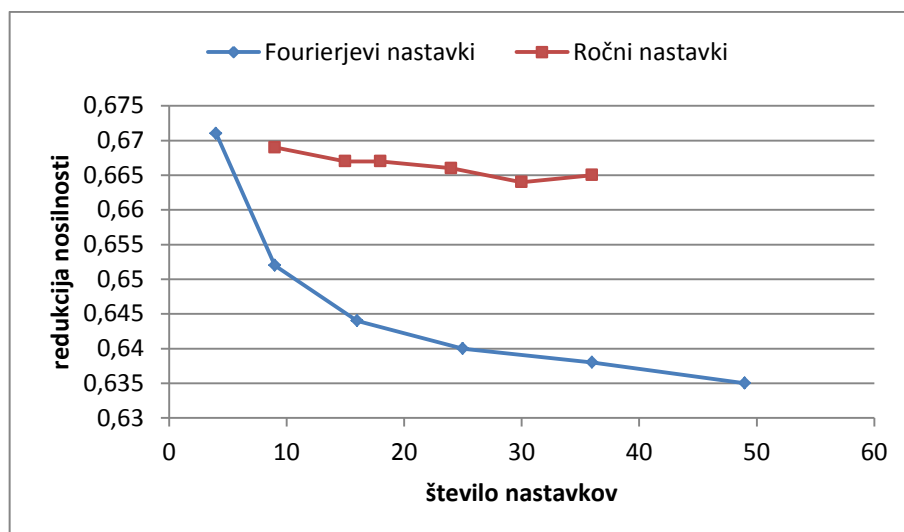
Slika 24: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevine z eno ojačitvijo

To pomeni da lahko v eni sami iteraciji velik vpliv dobi neka oblika, ki globalno oblike ne spremeni, samo lokalno, se pa zato spremeni norma prispevkov. Nazoren primer je rdeča krivulja (NGlobObl=5) na grafu norm prispevkov uteži ročnih nastavkih (Slika 24b). Dodatno si še enkrat oglejmo rdečo krivuljo spreminjanja nosilnosti skozi iteracije iste analize (Slika 21). Vidimo da v obeh primerih krivulji nenadoma spremenita vrednost. Razlog je ravno v tem, da prispevek nekega sicer nepomembnega nastavka zraste v primerjavi s prejšnjo iteracijo. Prispevek tega nastavka vpliva na zmanjšanje nosilnosti in na skok norme prispevkov uteži nastavkov.

Preglednica 19 prikazuje število nastavkov oblik nepopolnosti za primera Fourierjevega ali ročnega zapisa nastavkov oblike. Ker v nadaljevanju želimo primerjati odziv konstrukcije glede na način zapisa nastavkov oblike, moramo v obeh primerih za smiselno primerjanje vzeti približno enako število nastavkov v bazi oblik. Opazimo, da za enako število nastavkov v primeru ročnega zapisa oblik potrebujemo veliko večji red oblik. Za npr. 36 nastavkov potrebujemo v Fourierjevem načinu nastavke reda 6, medtem ko v ročnem načinu reda 12. Analiza z ročnimi nastavki je dolgotrajnejša, nosilnost pločevine pa je nižja (Slika 25). Iz primerjave nosilnosti z večanjem števila nastavkov ugotovimo, da v obeh primerih nosilnost pada. Padanje je veliko bolj očitno v načinu s Fourierjevim zapisom nastavkov. V preglednici (Preglednica 20) je poleg nosilnosti pločevine za posamezen način zapisa nastavkov prikazana tudi procentualna razlika nosilnosti. Le-ta se z večanjem števila nastavkov oblik nepopolnosti večja, in umiri pri 3,9%.

Preglednica 19: Tabele računsko približno ali popolno ekvivalentnih Fourierjevih in ročnih nastavkov za eno ojačitev

Fourier		Ročni	
Red (št. polvalov)	Št. nastavkov	Red (št. polvalov)	Št. nastavkov
2	4	2	6
3	9	3	9
4	16	4	12
5	25	5	15
6	36	6	18
7	49	7	21
8	64	8	24
9	81	9	27
10	100	10	30
11	121	11	33
12	144	12	36
13	169	13	39



Slika 25: Faktorji nosilnosti glede na način zapisa nastavkov nepopolnosti pločevine z eno ojačitvijo

Preglednica 20: Primerjava faktorjev nosilnosti nepopolnih pločevin z eno ojačitvijo

Fourier		Ekvivalentni ročni		Razlika [%]
Št. nastavkov	Nosilnost	Št. nastavkov	Nosilnost	
9	0,652	9	0,669	2,5
16	0,644	15	0,667	3,4
25	0,640	24	0,666	3,9
36	0,638	36	0,664	3,9

Iz vseh zgornjih primerjav in analiz za pločevino z eno ojačitvijo smo izbrali zadostno število nastavkov za določitev najbolj neugodne geometrijske nepopolnosti ojačitve. Analize so pokazale, da zadošča 25 Fourierjevih nastavkov (NFouRed=5) in 24 ročnih nastavkov (NGlobObl=8). Za zadostno število ročnih nastavkov bi za nadaljnje analize lahko vzeli že red oblik 3 (trije polvalovi v vzdolžni smeri), vendar smo iz vidika primerjave s Fourierjevimi nastavki izbrali večje število oblik. Analize bomo izvajali na mreži končnih elementov M40.

5.2.2 Primer dveh vzdolžnih ojačitev ($\alpha=1$; $\gamma=16,4$; $b/t=66,7$)

5.2.2.1 Število Fourierjevih nastavkov

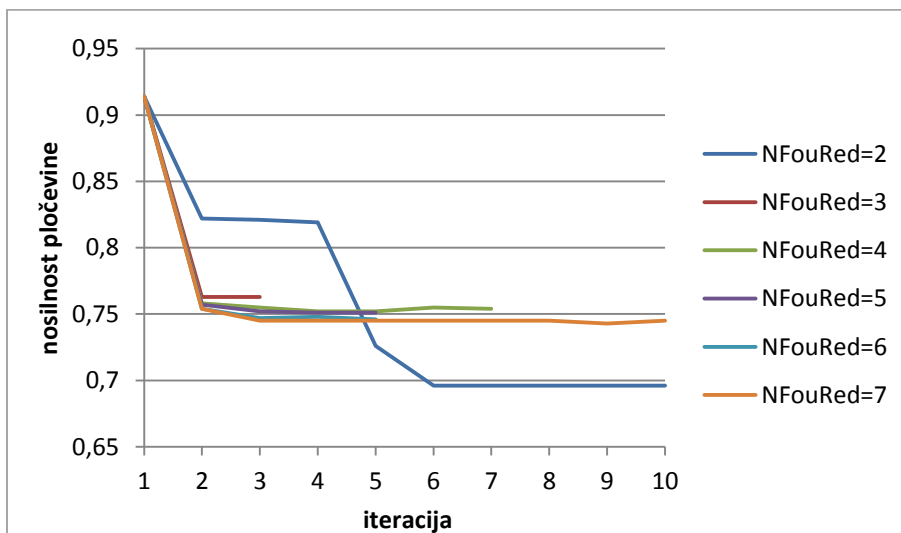
Iz preglednice (Preglednica 103) razberemo, da se nosilnost v primerjavi s priporočilom standarda razlikuje veliko bolj kot v primeru z eno vzdolžno ojačitvijo. Največje odstopanje je sicer v primeru z najnižjim številom nastavkov, vendar le-ta ni verodostojna. V primerjavi z analizami z večjim številom nastavkov se iterativno določena oblika geometrijskih nepopolnosti pri štirih Fourierjevih nastavkih (NFouRed=2) močno razlikuje (Slika 26, Slika 27). Nosilnosti pločevine pri četrtem iteracijskem koraku še zaupamo, nadaljnim rešitvam pa zaradi prevelikega odstopanja ne več. Tam je nosilnost 0,819 in se od standarda razlikuje za 3,2%. Videti je, da se na območju nateznega pasu val ne tvori (nezadostno število oblik, prenizek red nastavkov). V primerjavi s pločevino z eno vzdolžno ojačitvijo, sta pozitiven in negativen val ravno obratna. Oglejmo si primerjavo prispevka določene oblike h končni obliki

nepopolnosti (Preglednica 21). Prispevek prve, druge in tretje oblike je v vseh primerih enak. Do razlike pride samo pri prispevku četrte oblike nepopolnosti, ki v primeru z dvema ojačitvama dobi negativen predznak. To je tudi eden od razlogov za takšno obliko nepopolnosti (Preglednica 103) in toliko manjšo nosilnost pločevine.

Preglednica 21: Primerjava oblike nepopolnosti za NFouRed=2

Oblika nastavka		Vrednost prispevka uteži nastavkov			
		1	2	3	4
Število ojačitev	1	-5	0	0	4,75
	2	-5	0	0	-6,5
	4	-5	0	0	6,4

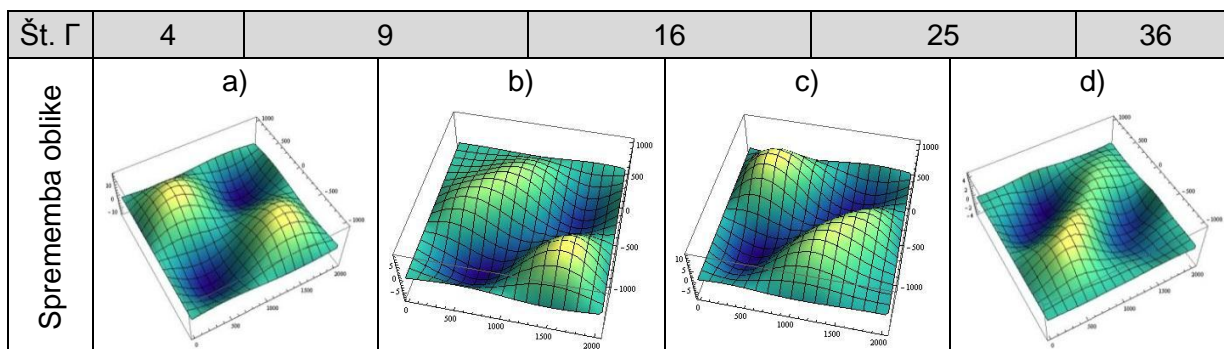
V izbor zadostnega števila nastavkov smo zajeli vse analize razen prve z NFouRed=2. Iz grafa (Slika 26) je razvidno, da se vrednost nosilnosti med analizami z redi nastavkov med 4 in 7 ne spreminja več veliko. Izjema je le analiza z NFouRed=3, kjer je nosilnost od ostalih večja za 1,5%. Pri analizah z večjim redom nastavkov pa nosilnost skozi iteracije konvergira, razlika v padcu nosilnosti pa med analizami znaša od 0,2% do 0,7%.



Slika 26: Faktorji nosilnosti po iteracijah za primer pločevine z eno ojačitvijo

Izmed prikazanih sprememb oblik najbolj izstopa sprememba med analizama s 4-imi in 9-imi Fourierjevimi nastavki (Slika 27). Največja sprememba z-koordinate je več kot 10 mm (135% e_0). Razlika je podobna zrcalni obliki nepopolne konstrukcije s štirimi Fourierjevimi nastavki. Pri naslednjih dveh primerjavah oblik (Slika 27b in Slika 27c) do tako velikega spreminjanja ne pride (največja sprememba z-koordinate je 4 mm, kar je 54% največje dovoljene nepopolnosti e_0). Najbolj očitno je poglobljanje celotnega panela, medtem ko sama oblika in

pozicija nateznega vala ostaja enaka. Sprememba med oblikama s 25-imi in 36-imi nastavki je majhna.

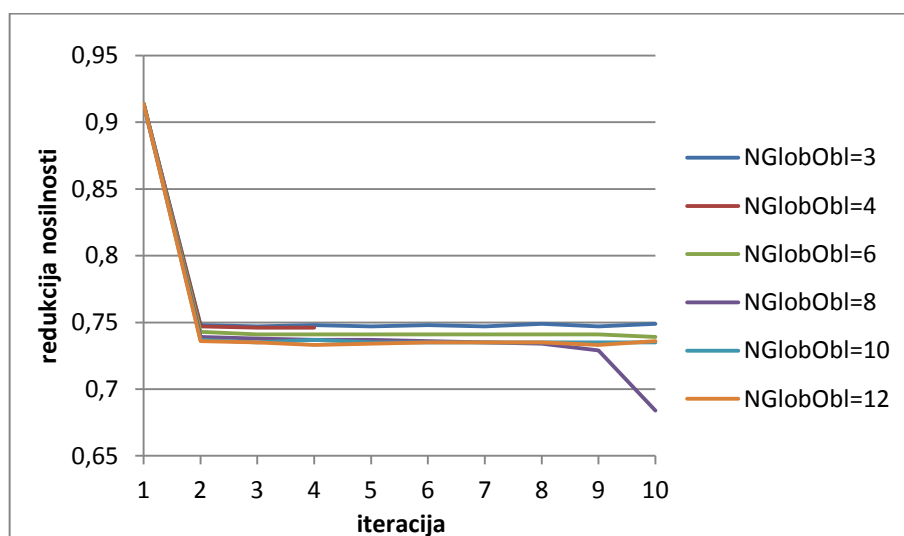


Slika 27: Razlika med oblikami z različnim številom Fourierjevih nastavkov

Na podlagi vseh izvedenih analiz smo se odločili, da z zadostno natančnostjo najbolj neugodno obliko začetne nepopolnosti opišemo s 25 Fourierjevimi nastavki ali t.i. nastavki reda 5. V primerjavi z analizo z NFourRed=6 sprememba faktorja nosilnosti znaša 0,7%. Kljub temu, da je bilo dokazano da zadostujejo nastavki reda 5, bi bilo računsko sprejemljivo uporabiti tudi večje število nastavkov.

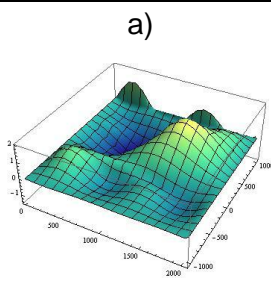
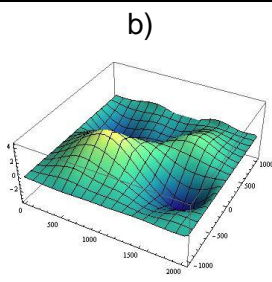
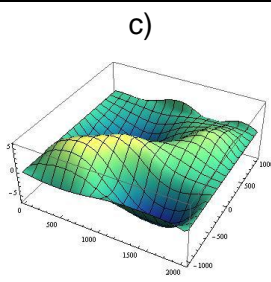
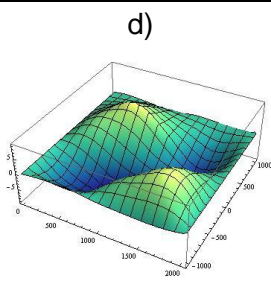
5.2.2.2 Število ročnih nastavkov

V vseh primerih (Preglednica 104) se val tvori v območju nateznega pasu, katerega oblika je na eni strani izboklina, na drugi pa vboklina. Opazimo pa, da je v primerjavi s standardom Evrokod nosilnost precej manjša, razlika pa se giblje v območju med 11,7 in 13,4%. Izjema je analiza z redom NGlobObl=8, kjer razlika znaša 19,1%. Slika 28 pokaže, da v tem primeru najnižjo nosilnost dobimo v zadnji, deseti iteraciji. Ta vrednost od ostalih odstopa za 6% v samo eni rešitvi, zato rešitvi v tej itearciji ne moremo zaupati. Domnevamo, da bi vrednost faktorja nosilnosti v naslednjem iteracijskem koraku dosegla vrednost iz prejšnjih korakov.



Slika 28: Faktorji nosilnosti po iteracijah za primer pločevine z dvema ojačitvama

Slika 29 prikazuje razliko z-koordinat med oblikami nepopolnosti dveh analiz različnih redov nastavkov. Opazimo, da pri slikah a), b) in c) z-koordinata v absolutni vrednosti narašča v območju nateznega pasu (izboklina in vboklina), kar je posledica uvedbe večjega števila oblik, ki lahko natančneje opišejo obliko. Pri zadnji primerjavi razlike (Slika 29d) se zgodi, da se na območju vala z-koordinata zmanjša, tako izbokline, kot vbokline. To pomeni da se celoten val poglubi glede na koordinato robov pločevine. Na območjih izven nateznega pasu se dogajajo lokalne spremembe, ki so zelo majhne in na nosilnost vplivajo razmeroma malo. Iz grafa (Slika 28) in preglednice (Preglednica 104) je ta razlika med obliko z največjo in najmanjšo nosilnostjo le 1,6%.

Št. Γ	18	24	36	48	60
Sprememba oblike	a) 	b) 	c) 	d) 	
mm	1,89	4,45	6,46	9,39	

Slika 29: Razlika med oblikami z različnim številom ročnih nastavkov za primer pločevine z eno ojačitvijo

Glede na to kako majhne so razlike med nosilnostmi pločevin z večanjem števila nastavkov bi kot zadostno število nastavkov lahko določili že red nastavkov 3 ($NGlobObl=3$).

5.2.2.3 Gostota mreže

Opazimo znatno nižanje nosilnosti pločevine z večanjem gostote mreže (Preglednica 22). Tako se nosilnost med analizama z mrežo M10 in mrežo M20 zmanjša za 20%, med M20 in M40 za 9% in med M40 in M80 za 2%. Za dovolj gosto mrežo smo izbrali mrežo M40, saj zagotavlja zadostno natančnost analize pri sprejemljivo dolgem času računanja.

Preglednica 22: Nosilnost pločevine za različne tipe mrež končnih elementov (dve ojačitvi)

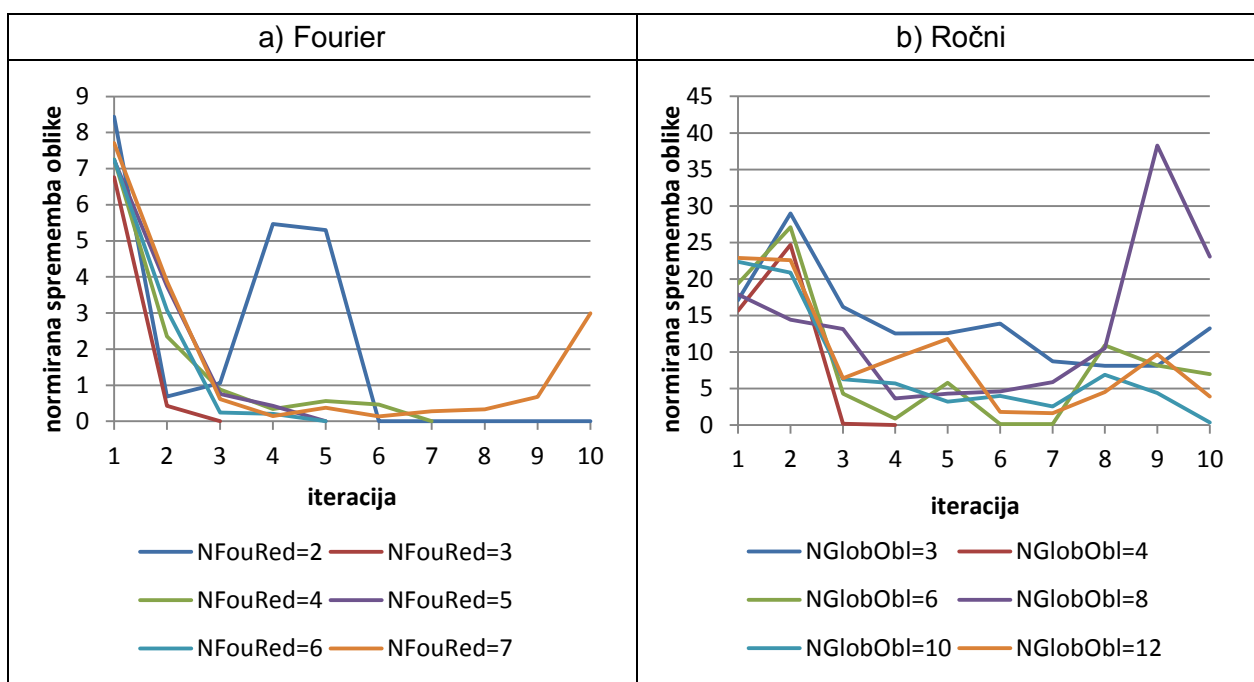
Tip mreže	M10	M20	M40	M80
LPF_{Mx}/LPF_{M20}	1,21	1,00	0,91	0,89
ΔLPF [%]	20,68	0,00	-8,91	-10,80

5.2.2.4 Primerjava in zaključki

Slika 30 prikazuje norme prispevkov uteži nastavkov k obliki geometrijske nepopolnosti za primera obeh načinov zapisa nastavkov. Pri Fourierjevih nastavkih v večini analiz vrednost norme prispevkov konvergira k 0. V nekaterih primerih pride do odstopanj, kjer norma v določenih iteracijah naraste. Dobro opazen primer pri Fourierjevih nastavkih je primer reda nastavkov 2 ($NFouRed=2$). Kot vidimo vrednosti norme v četrti iteraciji poskočijo, in se nato

umirijo po šesti iteraciji. Če si še enkrat ogledamo spremembo nosilnosti po iteracijah za ta primer (Slika 26), vidimo, da je v tej analizi dosežena najnižja nosilnost izmed vseh. Povedali smo že, da bi v tem primeru kot verodostojno nosilnost vzeli rešitev četrte iteracije. Če pa pogledamo graf spreminjanja norm vidimo, da v četrti iteraciji algoritem najde neko obliko, ki precej odstopa od prejšnje. To pomeni, da je že pri tej iteraciji algoritem zašel s poti, in naprej samo še nadaljeval po napačni poti. Potrdimo prejšnjo ugotovitev, da je razlog za tako obnašanje prenizko število nastavkov in prenizko število oblik v bazi oblik. Naslednja izjema pa je zadnja analiza z redom NFouRed=7, kjer algoritem zopet najde neko obliko (kombinacija nastavkov), ki precej odstopa ob oblike iz prejšnje iteracije, vendar v tem primeru ne pride do spreminjanja nosilnosti.

Na grafu b) pa so prikazane vrednosti norm prispevkov v primeru ročnih nastavkov, kjer so spremembe med oblikami dveh iteracij večje. Največjo spremembo oblike zaznamo v primeru z NGlobObl=8, kjer algoritem v deveti iteraciji najde neko novo obliko. S to obliko potem vstopi v deseto iteracijo, kjer doseže najnižjo nosilnost. Če bi analizo nadaljevali, bi se po vsej verjetnosti nosilnost dvignila na raven devete iteracije, norma prispevkov pa bi se spet bolj približala ničli. Razlog za tako obnašanje je veliko število polvalov v vzdolžni smeri pločevine, kjer v algoritmu optimizacije nepopolnosti nekemu nastavku pripiše velik prispevek. Taka oblika lahko obstaja z enako verjetnostjo kot druge, vendar rešitvi ne moremo zaupati, saj je tak le en primer izmed desetih (10 iteracij).



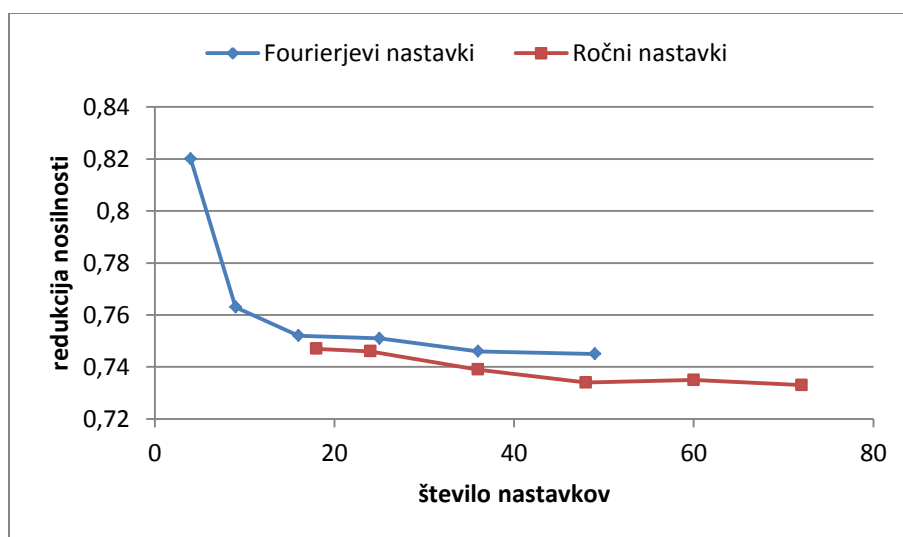
Slika 30: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevine z dvema ojačitvama

Tako kot v primeru pločevine z eno ojačitvijo smo tudi v primeru pločevine z dvema ojačitvama naredili primerjavo števila nastavkov za oba načina zapisa nastavkov (Preglednica 23).

Preglednica 23: Tabele računsko približno ali popolno ekvivalentnih Fourierjevih in ročnih nastavkov za dve ojačitvi

Fourier		Ročni	
Red (št. polvalov)	Št. nastavkov	Red (št. polvalov)	Št. nastavkov
2	4	2	12
3	9	3	18
4	16	4	24
5	25	5	30
6	36	6	36
7	49	7	42
8	64	8	48
9	81	9	54
10	100	10	60

Iz primerjave nosilnosti pločevin glede na način zapisa nastavkov (Slika 31 in Preglednica 24) vidimo, da je vrednost nosilnosti pločevine z dvema ojačitvama, katere oblika nepopolnosti je definirana z ročnimi nastavki, manjša od nosilnosti pločevine, katere nepopolna oblika je kombinacija Fourierjevih nastavkov. Največja razlika nosilnosti je pri najvišjem primerljivem številu nastavkov in znaša 1,5%.



Slika 31: Faktorji nosilnosti glede na način zapisa nastavkov nepopolnosti pločevine z dvema ojačitvama

Preglednica 24: Primerjava faktorjev nosilnosti nepopolnih pločevin z dvema ojačitvama

Fourier		Ekvivalentni ročni		Razlika [%]
Št. nastavkov	Nosilnost	Št. nastavkov	Nosilnost	
16	0,752	18	0,747	0,7
25	0,751	24	0,746	0,7
36	0,746	36	0,739	0,9
49	0,745	48	0,734	1,5

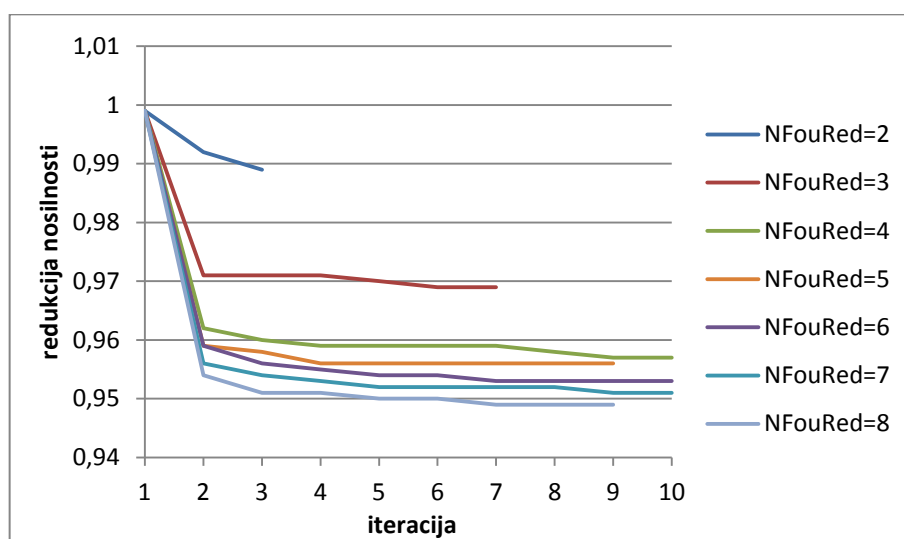
Za zadostno število nastavkov smo iz analiz in primerjav določili število 25 ($N_{FouRed}=5$ in $N_{GlobObl}=4$). Z izbiro višjega reda bi povečali zahtevnost računa, ne bi pa izboljšali natančnosti. V preglednicah (Preglednica 103 in Preglednica 104) smo prikazali, da se nosilnost z večanjem števila nastavkov bistveno ne spreminja več.

5.2.3 Primer štirih vzdolžnih ojačitev ($\alpha=1$; $\gamma=16,4$; $b/t=40$)

5.2.3.1 Število Fourierjevih nastavkov

Iz preglednice (Preglednica 105) je videti, da se oblika geometrijskih nepopolnosti z večanjem števila Fourierjevih nastavkov globalno ne spremeni veliko. Izjema je le analiza z najnižjim redom nastavkov ($N_{FouRed}=2$), kjer zaradi premajhnega števila oblik nepopolnosti končna oblika ni primerljiva z oblikami ostalih analiz. Pri analizah z večjim številom nastavkov do sprememb pride le na lokalnem nivoju, globalno pa se vedno na območju nateznega pasu ustvari val.

Če si pogledamo graf (Slika 32) vidimo, da z večanjem števila nastavkov nosilnost pločevine pada. Najnižjo nosilnost dosežemo pri analizi z najvišjim številom nastavkov, ki je glede na priporočilo Evrokoda manjša za 5,0%. Od analize z redom 2 je manjša za 4,0% in od analize z redom 3 za 2,1%. Razlika med analizami z redom 4 in z redom 8 znaša 0,8%. Že analiza z redom 4 zadosti izbiri števila nastavkov.



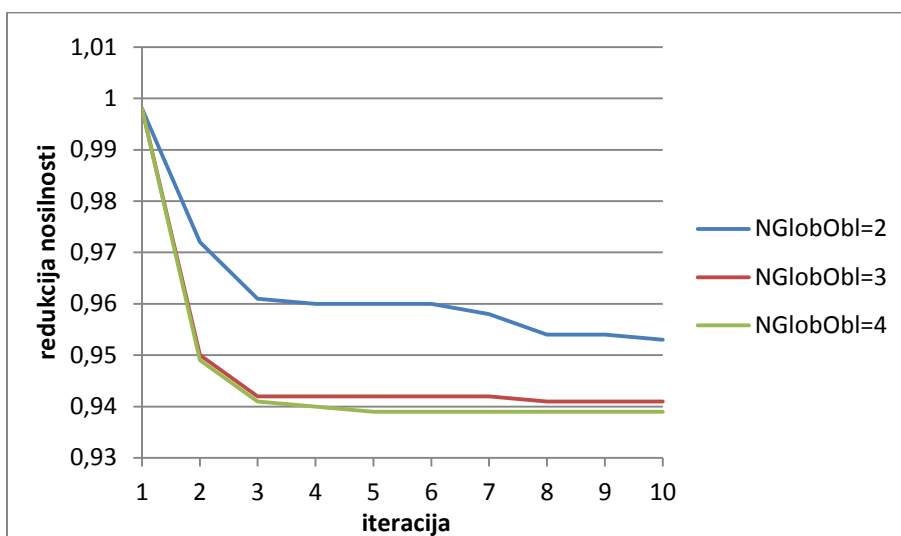
Slika 32: Faktorji nosilnosti po iteracijah za primer pločevine s štirimi ojačitvami

5.2.3.2 Število ročnih nastavkov

V primeru ročnih nastavkov na pločevini s štirimi vzdolžnimi ojačitvi smo naredili le tri analize. Analize z večjim številom nastavkov bi zahtevale preveč časa, zato smo se omejili le na analize z majhnim redom nastavkov (Preglednica 106), ki vseeno opišejo veliko število nastavkov. To pomeni, da je baza oblik, kljub nizkim redom nastavkov, velika. Pri analizi z redom nastavkov 2 opazimo, da se val v območju nateznega pasu formira le delno. Baza oblik je v tem primeru sicer velika, vendar so oblike v njej take, da natančnejšega opisa

oblike ni mogoče sestaviti. Pri analizah z redoma 3 in 4 se natezni pas formira, kar je posledica večjega števila polvalov v vzdolžni smeri.

V primerjavi s priporočilom iz standarda Evrokod je nosilnost obravnavanih pločevin manjša od 4,6 do 6,0%, kjer je najmanjša nosilnost dosežena pri analizi z najvišjim redom nastavkov. Vidimo (Slika 33), da v vseh treh primerih nosilnost med iteracijami, še posebej za reda nastavkov 3 in 4.



Slika 33: Faktorji nosilnosti po iteracijah za primer pločevine s štirimi ojačitvami

Za zadostno število nastavkov bi lahko vzeli že red nastavkov 3 (NGlobObl=3), saj se pri naslednji analizi nosilnost zmanjša zgolj za 0,2%. Zahtevnost analize z večjim številom nastavkov pa je večja, saj se čas računanja močno podaljša.

5.2.3.3 Gostota mreže

Ravno tako kot v primeru z eno in dvema ojačitvama, tudi v primeru s štirimi opazimo nižanje nosilnosti pločevine z večanjem gostote mreže. Tako se nosilnost med analizama z mrežo M10 in mrežo M20 zmanjša za 3, med M20 in M40 za 2% in med M40 in M80 za 2,4%. Za dovolj gosto mrežo smo izbrali mrežo M40, saj zagotavlja zadostno natančnost analize pri sprejemljivo dolgem času računanja.

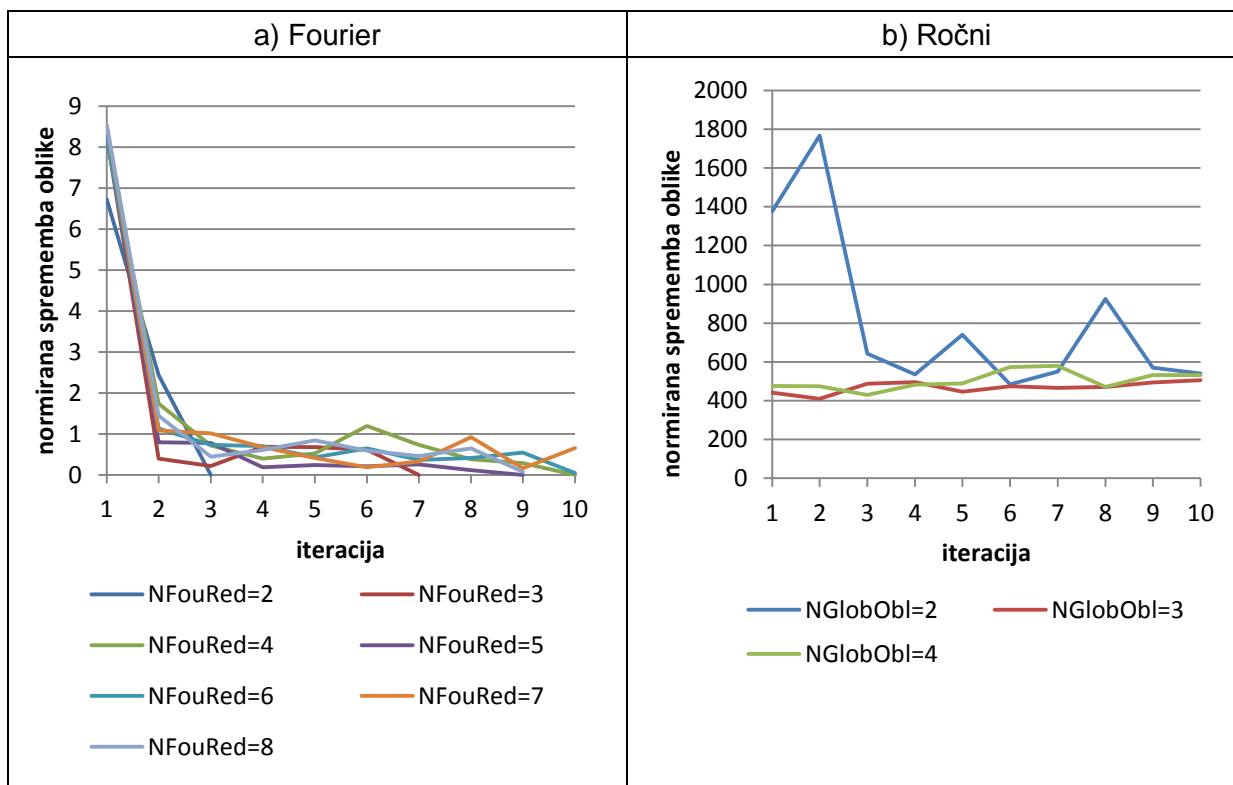
Preglednica 25: Nosilnost pločevine za različne tipe mrež končnih elementov (štiri ojačitve)

Tip mreže	M10	M20	M40	M80
LPF_{Mx}/LPF_{M20}	1,03	1	0,98	0,98
ΔLPF [%]	3,3	0	-2,0	-2,4

5.2.3.4 Primerjava in zaključki

Opazimo veliko razliko med normami prispevkov uteži nastavkov med iteracijami iskanja najbolj neugodne oblike nepopolnosti (Slika 34). Če pogledamo graf a) za Fourierjev način zapisa nepopolnosti vidimo, da vrednosti norm po drugi iteraciji ohranjajo nizko vrednost. To

pomeni, da se geometrija nepopolnosti v kasnejših iteracijah ne spreminja več veliko. Če pa pogledamo graf b), kjer so prikazane norme prispevkov ročnem načinu nastavkov, vidimo, da se oblika iz iteracije v iteracijo zelo spreminja. Vrednosti norm so v primerjavi s tistimi iz analize s Fourierjevimi nastavki veliko večje. To je posledica velike baze oblik, kjer je oblik veliko, čeprav je red nastavkov majhen. Vemo, da za red nastavkov $NGlobObl=2$, definiramo 32 oblik v bazi oblik. Pri tem pa imamo v vzdolžni smeri le dva polvala. S kombinacijo tako definiranih oblik geometrijo nepopolnosti zelo težko opišemo. Zanimivo je tudi, da se vrednost norm pri $NGlobObl=3$ in 4 z iteracijami ni veliko spreminjala. Razlog za tako velike vrednosti norm je ta, da z ročnimi nastavki definiramo veliko nepomembnih in nemerodajnih oblik. Kljub nihanju vrednosti norm prispevkov pa nosilnost pločevine konvergira. Analiz z večjim redom ročnih nastavkov nismo izvedli, saj algoritem v primeru baze oblik večje od 50 nastavkov ne najde pravih rešitev.

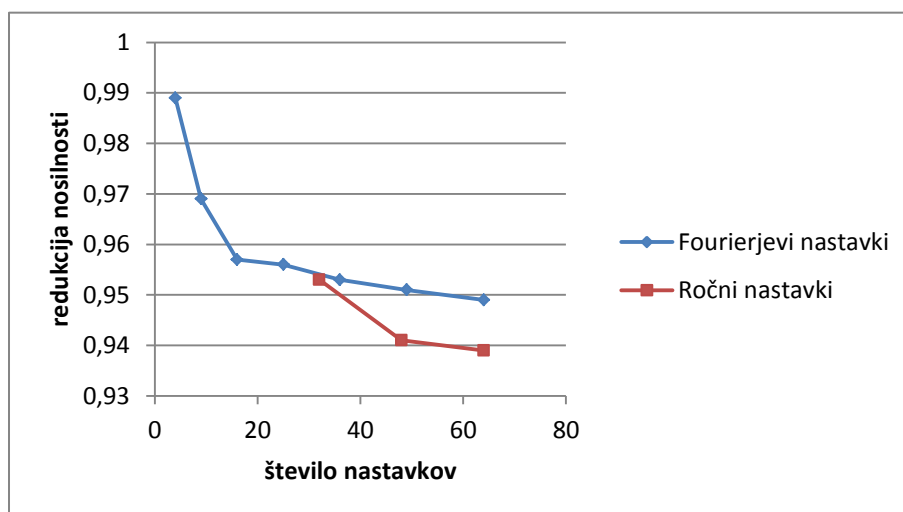


Slika 34: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevine s štirimi ojačitvami

Preglednica 26 prikazuje število nastavkov za oba načina zapisa nastavkov oblike nepopolnosti. Opazimo, da v primeru ročnih nastavkov za enako število oblik potrebujemo nižji red oblike kot v primeru Fourierjevih nastavkov. Podrobneje si pogledajmo primer, ko imamo okoli 50 nastavkov oblike. Torej, v primeru Fourierjevih nastavkov v vzdolžni in prečni smeri definiramo sedem polvalov, v primeru ročnih nastavkov pa le tri. To pomeni, da s Fourierjevimi nastavki, z enako velikostjo bazo oblik kot v primeru ročnih nastavkov, bolje opišemo geometrijo nepopolne konstrukcije.

Preglednica 26: Tabele računsko približno ali popolno ekvivalentnih Fourierjevih in ročnih nastavkov za štiri ojačitve

Fourier		Ročni	
Red (št. polvalov)	Št. nastavkov	Red (št. polvalov)	Št. nastavkov
2	4	2	30
3	9	3	45
4	16	4	60
5	25	5	75
6	36	6	90
7	49	7	105
8	64	8	120
9	81	9	135
10	100	10	150
11	121	11	175
12	144	12	200



Slika 35: Faktorji nosilnosti glede na način zapisa nastavkov nepopolnosti pločevine z dvema ojačitvama

Medsebojna primerjava Fourierjevih in ročnih nastavkov pokaže (Preglednica 27), da je nosilnost pločevin definiranih s Fourierjevimi nastavki v vseh treh primerih višja od nosilnosti pločevin definiranih z ročnimi nastavki. Razlika znaša od 0,3 do 1,1%. S Fourierjevimi nastavki reda 7 in ročnimi nastavki reda 3 dovolj dobro opišemo geometrijo nepopolne konstrukcije. Pri modeliranju mreže končnih elementov smo izbrali tip M40.

Preglednica 27: Primerjava faktorjev nosilnosti nepopolnih pločevin s štirimi ojačitvami

Fourier		ekvivalentni ročni		razlika [%]
št. nastavkov	nosilnost	št. nastavkov	nosilnost	
25	0,956	32	0,953	0,3
36	0,953	48	0,941	1,1
49	0,951	64	0,939	1,1

5.2.4 Zaključki občutljivostne analize

Da bi smiselno primerjali rezultate analiz s Fourierjevimi in ročnimi nastavki oblik nepopolnosti, smo izdelali tabele računsko približno ali popolno ekvivalentnih Fourierjevih in ročnih nastavkov. Tako smo v primeru ročnih nastavkov izvedli le analize s številom nastavkov nepopolnosti, ki je v preglednicah obarvan (Preglednica 19, Preglednica 23 in Preglednica 26).

Metoda deluje dobro, če kombinira do okoli 50 nastavkov. V kolikor je število nastavkov preveliko, rešitve ne najde. Iz preglednic (Preglednica 19, Preglednica 23) za eno in dve ojačitvi razberemo, da je uporaba ročnih nastavkov v analizi precej bolj primerna, saj za enako število oblik zajamejo več polvalov. V preglednici za štiri ojačitve (Preglednica 26) vidimo, da je pri enakem številu oblik potrebnih precej manj polvalov pri ročnih nastavkih, kot pa pri Fourierjevih nastavkih, zato je analiza z ročnimi nastavki v primeru štirih ojačitev manj primerna.

V vseh treh primerih ojačenih pločevin smo določili zadostno število nastavkov oblik nepopolnosti. V primeru ene ojačitve dajo Fourierjevi nastavki nižjo nosilnost, v primeru dveh oz. štirih ojačitev pa dajo nižjo nosilnost ročni nastavki. Čeprav bi lahko rekli, da je v nekaterih primerih bolj smiselna uporaba enega izmed obeh analiziranih načinov definicije nastavkov, smo v nadaljevanju vse pločevine analizirali tako s Fourierjevimi kot rudi ročnimi nastavki.

5.3 Parametrična študija

Z izvedenimi analizami smo preučevali vpliv vitkosti panelov in togosti vzdolžnih ojačitev na obliko najbolj neugodnih začetnih nepopolnosti strižno obremenjenih pločevin.

Analizirali smo primere pločevin z eno, dvema in štirimi ojačtvami. Poleg tega smo za vsak primer ojačenja določili tri primere vitkosti, in znotraj vsakega primera vitkost tri različne togosti, kot prikazujejo preglednice (Preglednica 28, Preglednica 29 in Preglednica 30). Pri različnih togostih ojačitev se zgodijo različni porušni mehanizmi. Standard Evrokod podaja zahtevo, da za izognitev torzijski podajnosti ojačitve omejimo minimalno debelino ojačitve. V preglednici 2.6 v priročniku Design of Plated Structures na strani 138 je zapisana omejitev:

$$\frac{h_{st}}{t_{st}} \leq 10,6, \quad (29)$$

ki velja za jekla kvalitete S355. V našem primeru smo izbrali omejitev $h_{st}/t_{st}=10$. Prvo togost smo določili tako, da je elastična kritična napetost podpanela enaka elastični kritični napetosti ojačene pločevine. To pomeni, da se obe porušitvi lahko zgodita hkrati. Pri tem smo uporabili program EBPlate, v katerem smo s poskušanjem določili tako višino in debelino ojačitve, da smo ugodili zgoraj omenjenemu pogoju. Kot je razvidno iz slike (Slika 36), v primeru a) popusti tako ojačitev, ki se ukloni, kot tudi pločevina, kjer je vidno izrazito izbočenje na območju nateznega pasu. Opazimo, da je amplituda pomika ojačitve na sredini panela in pomika v podpanelu različna, kar tudi kaže na hkratno delovanje obeh sistemov. Nato smo glede na izbrano višino in debeline ojačitve za prvi primer togosti določili faktor togosti γ_1 .

$$I_p = \frac{b \cdot t^3}{10,92} \quad (30)$$

$$I_{sl} = \frac{t_{st} \cdot h_{st}^3}{12} + t_{st} \cdot h_{st} \cdot \left(\frac{h_{st}}{2} + \frac{t}{2} - y_T \right)^2 + \frac{2 \cdot 15 \cdot \epsilon \cdot t \cdot t^3}{12} + 2 \cdot 15 \cdot \epsilon \cdot t^2 \cdot y_T^2 \quad (31)$$

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p} \quad (32)$$

Preko tako določene prve vrednosti togosti ojačitve smo določili še togosti za ostala dva primera in iz zgornje enačbe izrazili dimenzije ojačitev h_{st} in t_{st} . V primeru b) (Slika 36), kjer je togost ojačitve najmanjša, je moč opaziti, da pride do izrazitega uklona v vzdolžni ojačitvi (globalni uklonski mehanizem). Velikost pomika na sredini ojačitve je v primerjavi s sliko a) večja. Poleg tega pa je pomik v podpanelu na mestu nateznega pasu v primerjavi s pomikom na sredini ojačitve približno enak, kar je posledica uklona v ojačitvi. Če si ogledamo še primer c), kjer je ojačitev najbolj toga, pa do uklona pride v podpanelih (lokalni uklonski mehanizem), ojačitev pa ostane nedeformirana.

V preglednicah (Preglednica 28, Preglednica 29 in Preglednica 30) so v skrajnem desnem stolpcu prikazana poimenovanja primerov pločevin. V nadaljevanju se bomo na posamezen primer sklicevali s temi oznakami.

Preglednica 28: Primeri pločevin z eno ojačitvijo

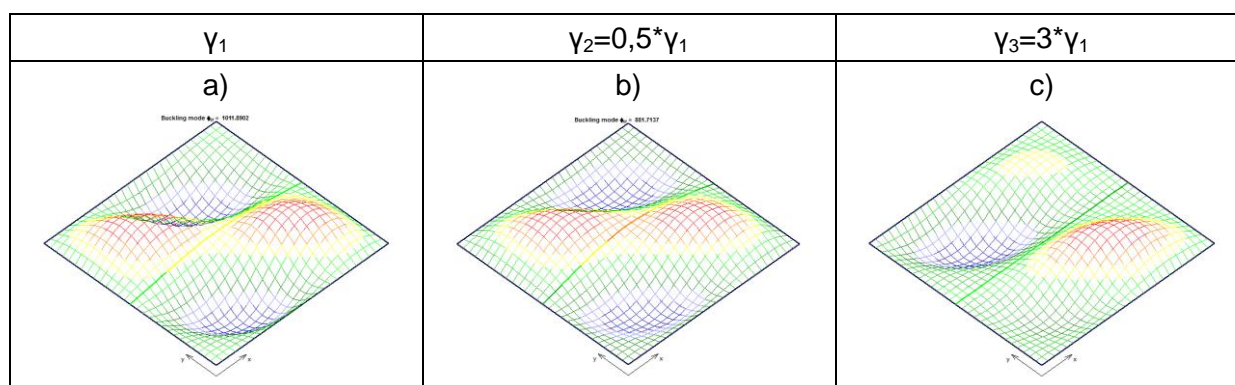
B [cm]	t [cm]	b/t	I_p [cm ⁴]	H_{st} [cm]	T_{st} [cm]	I_{sl} [cm ⁴]	γ	oznaka
70	1	35	6,41	9,36	0,94	239,01	37,28	10j_1_1
				7,66	0,77	119,50	18,64	10j_1_2
				12,93	1,29	717,02	111,85	10j_1_3
100	1	50	9,16	10,34	1,03	336,35	36,73	10j_2_1
				8,46	0,85	168,18	18,36	10j_2_2
				14,33	1,43	1009,05	110,19	10j_2_3
150	1	75	13,74	11,70	1,17	511,89	37,27	10j_3_1
				9,55	0,95	255,95	18,63	10j_3_2
				16,28	1,63	1535,67	111,80	10j_3_3
200	1	100	18,32	12,70	1,27	674,60	36,83	10j_4_1
				10,35	1,03	337,30	18,42	10j_4_2
				17,71	1,77	2023,80	110,50	10j_4_3

Preglednica 29: Primeri pločevin z dvema ojačitvama

B [cm]	t [cm]	b/t	I_p [cm ⁴]	H_{st} [cm]	T_{st} [cm]	I_{st} [cm ⁴]	γ	oznaka
100	1	33,3	9,16	11,75	1,18	519,32	56,71	2Oj_1_1
				9,59	0,96	259,66	28,35	2Oj_1_2
				16,35	1,64	1557,97	170,13	2Oj_1_3
150	1	50,0	13,74	13,15	1,32	757,96	55,18	2Oj_2_1
				10,71	1,07	378,98	27,59	2Oj_2_2
				18,36	1,84	2273,88	165,54	2Oj_2_3
200	1	66,7	18,32	14,28	1,43	997,19	54,45	2Oj_3_1
				11,61	1,16	498,60	27,22	2Oj_3_2
				19,97	2,00	2991,57	163,34	2Oj_3_3
250	1	83,3	22,89	15,22	1,52	1231,10	53,77	2Oj_4_1
				12,36	1,24	615,55	26,89	2Oj_4_2
				21,30	2,13	3693,30	161,32	2Oj_4_3

Preglednica 30: Primeri pločevin s štirimi ojačitvami

B [cm]	t [cm]	b/t	I_p [cm ⁴]	H_{st} [cm]	T_{st} [cm]	I_{st} [cm ⁴]	γ	oznaka
200	1	40	18,32	15,05	1,51	1186,33	64,77	4Oj_1_1
				12,22	1,22	593,17	32,39	4Oj_1_2
				21,06	2,11	3558,99	194,32	4Oj_1_3
300	1	60	27,47	16,90	1,69	1736,31	63,20	4Oj_2_1
				13,70	1,37	868,16	31,60	4Oj_2_2
				23,68	2,37	5208,93	189,61	4Oj_2_3
400	1	80	36,63	18,30	1,83	2251,72	61,47	4Oj_3_1
				14,81	1,48	1125,86	30,74	4Oj_3_2
				25,63	2,56	6755,16	184,42	4Oj_3_3



Slika 36: Prikaz lastnih uklonskih oblik za različne primere togosti vzdolžnih ojačitev (ena ojačitev)

Omejili smo največjo dovoljeno amplitudo odmika in največjo dovoljeno ukrivljenost nepopolne pločevine. Največjo dovoljeno amplitudo odmika omejuje standard Evrokod (Preglednica 3). Vrednost omejitve ukrivljenosti pa smo določili sami, s pomočjo ročno definiranih krivulj, med katerimi je najbolj neugodno, a še vedno realno, predstavljala

oranžna krivulja z vrhom na $\frac{1}{4}$ širine panela (Slika 10). Vrednost ukrivljenosti smo z aplikacijo te krivulje na panel oziroma podpanel določili z enačbama (33) in (34):

$$\kappa_X = \kappa_{GX} + 0,7 \kappa_{LX} \quad (33)$$

$$\kappa_Y = \kappa_{GY} + 0,7 \kappa_{LY} \quad (34)$$

Optimizacijski problem določanja najbolj neugodne oblike nepopolnosti smo omejili na največ deset iteracijskih korakov, oz. do zadostitve pogoja tolerance, ki je znašala 0,1. Toleranca predstavlja spremembo norme prispevkov uteži nastavkov dveh zaporednih iteracij. Omejitev na deset korakov je smiselna, saj bi se v nasprotnem primeru lahko zgodilo, da algoritem rešitve znotraj omejitve vrednosti tolerance ne najde. V tem primeru je omejitev iteracijskih korakov časovno preventivni ukrep, saj pri velikem številu korakov rešitve ne bi bile boljše, časovna obremenitev pa bi bila velika.

5.3.1 Analiza pločevin z eno vzdolžno ojačitvijo

Preglednica 28 podaja izbrane primere pločevin. Iz izbranih vitkosti smo določili dimenzije osnovne pločevine, dimenzije ojačitev pa smo določili z že razloženim postopkom na začetku tega poglavja. Za primerjavo redukcije nosilnosti pločevin s standardom Evrokod, smo v preglednici (Preglednica 31) prikazali redukcijske faktorje pločevin zaradi strižne obtežbe.

Preglednica 31: Redukcija strižne nosilnosti po postopku iz Evrokoda za pločevine z eno ojačitvijo

	oznaka pločevine	X_w	nadaljnje analize
1	1Oj_1_1	1,00	NE
	1Oj_1_2	1,00	NE
	1Oj_1_3	1,00	NE
2	1Oj_2_1	0,96	DA
	1Oj_2_2	0,92	DA
	1Oj_2_3	1,00	DA
3	1Oj_3_1	0,69	DA
	1Oj_3_2	0,67	DA
	1Oj_3_3	0,72	DA
4	1Oj_4_1	0,56	DA
	1Oj_4_2	0,55	DA
	1Oj_4_3	0,60	DA

V izbor obravnavanih pločevin smo zajeli pločevine različnih vitkosti panelov in togosti vzdolžnih ojačitev. V nekaterih primerih pločevin (Preglednica 28) redukcije strižne nosilnosti praktično ni. To pomeni, da so pločevine zaradi strižne obremenitve ne izbočijo. Določanje najbolj neugodne oblike nepopolnosti takih pločevin je nesmiselno, zato te pločevine v nadaljevanju izključimo iz analize in primerjave rezultatov (oznaka NE v preglednici Preglednica 31).

5.3.1.1 Pločevine 1Oj_2

V izvedenih analizah smo ugotovili, da je zmanjšanje nosilnosti zaradi oblike nepopolnosti zanemarljivo majhno, oziroma ga sploh ni. Razlog za to je majhna vitkost podpanela. Algoritem najde rešitev, torej najbolj neugodno obliko nepopolne konstrukcije, vendar ta oblika ni podobna deformacijski obliki konstrukcije. Izbokline in vbokline so brez kakršnegakoli reda razporejene po celotnem panelu. Iz iteracije v iteracijo se oblike spreminjajo, uteži posameznega nastavka skačejo iz ene vrednosti na drugo, vrednost standardne deviacije je velika in z iteracijami strmo narašča. Rezultatov analiz pločevine 1Oj_2 nismo posebej prikazovali, saj z vidika določevanja najbolj neugodne oblike nepopolnosti niso zanimive.

5.3.1.2 Pločevine 1Oj_3

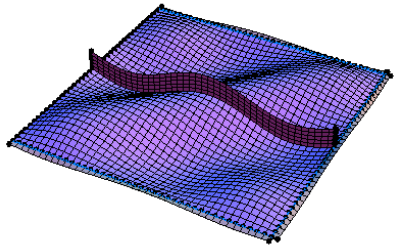
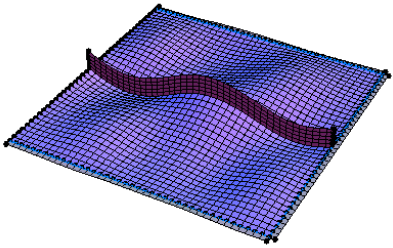
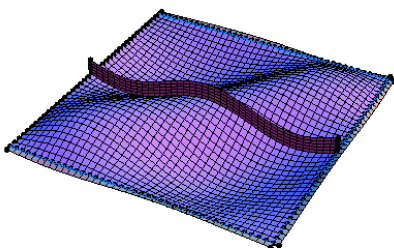
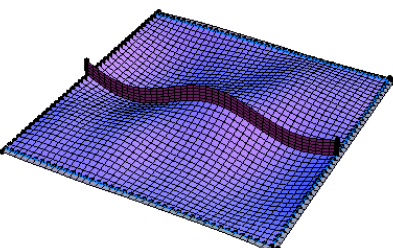
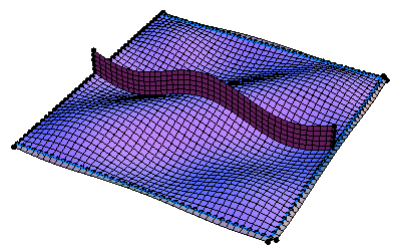
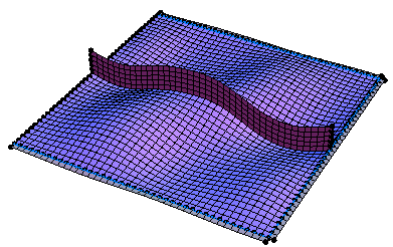
V preglednici (Preglednica 32) so zbrane dimenzije pločevin in ojačitev, ki smo jih v tem poglavju podrobneje analizirali in med seboj primerjali.

Preglednica 32: Pločevine 1Oj_3

B [cm]	t [cm]	b/t	I_p [cm ⁴]	H_{st} [cm]	T_{st} [cm]	I_{st} [cm ⁴]	γ	oznaka
150	1	75	13,74	11,70	1,17	511,89	37,27	1Oj_3_1
				9,55	0,95	255,95	18,63	1Oj_3_2
				16,28	1,63	1535,67	111,80	1Oj_3_3

Primerjava najbolj neugodne oblike nepopolnosti pokaže očitno razliko končnih oblik, ki so definirane s kombinacijo Fourierjevih ali ročnih nastavkov. Oblike nepopolnosti so za vsak posamezen primer prikazane v preglednici (Preglednica 33). V vseh treh primerih analiz, kjer je oblika nepopolnosti kombinacija Fourierjevih nastavkov, se v nateznem polju izoblikuje izbočitev panela. Natezno polje je posledica rotacije napetostnega polja v postkritičnem stanju. V primeru ročnih nastavkov se neka približna formacija diagonalne izbokline sicer zgodi, vendar ne tako očitno kot v primeru Fourierjevih nastavkov. V primeru 1Oj_3_3 sta obliki ročnih in Fourierjevih nastavkov najbolj podobni.

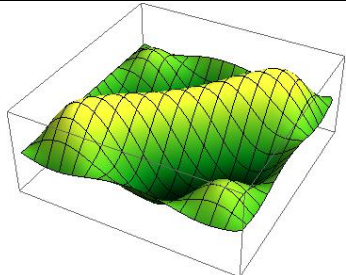
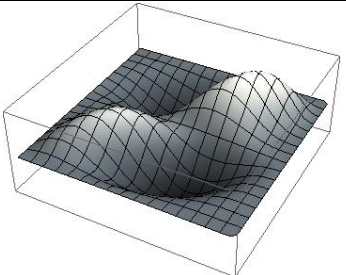
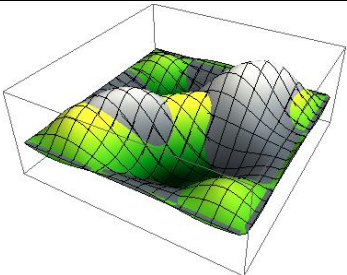
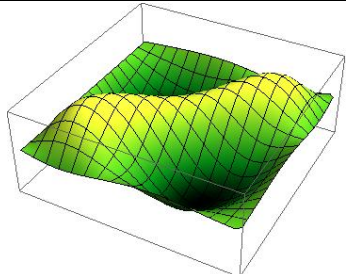
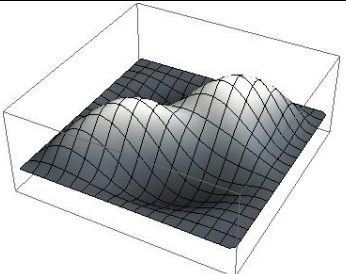
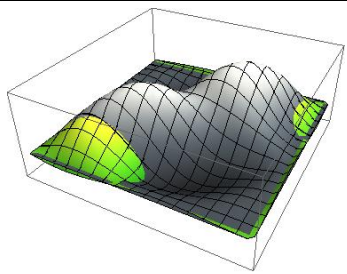
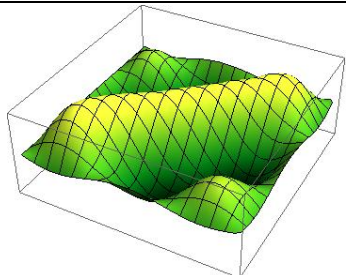
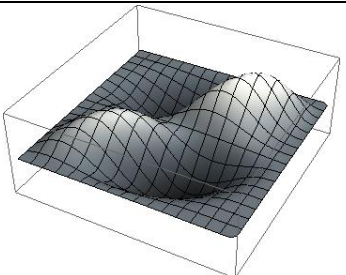
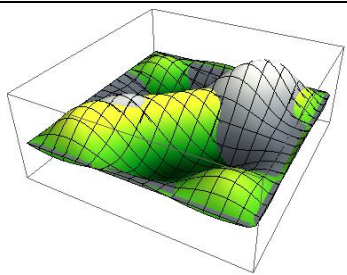
Preglednica 33: Najbolj neugodne oblike nepopolnosti pločevine 10j_3

10j_3	Fourierjevi nastavki	Ročni nastavki
10j_3_1		
10j_3_2		
10j_3_3		

V preglednici (Preglednica 34) smo med seboj primerjali obliko nepopolnosti in deformacijsko obliko posameznih pločevin. Prikazana so največja odstopanja in velikost razlike v z-koordinati. Ker so pomiki zaradi nepopolnosti pločevine in pomiki zaradi deformacij drugačnega velikostnega reda, smo med seboj primerjali normi pomikov. Vrednosti pomikov smo v vsakem vozlišču mreže končnih elementov delili z vsoto vseh pomikov in tako dobili absolutne normirane vrednosti pomikov. Kot smo ugotovili že v preglednici (Preglednica 33) se v vseh treh primerih na območju nateznega polja formira izboklina. Opazimo pa, da se v primerih 10j_3_1 in 10j_3_3 lokalno v vogalih izbokline neka izboklina. Tovrstna lokalna nepopolnost se pojavi v primeru večje togosti ojačitev, kjer do večjega izraza pridejo nepopolnosti na lokalnem nivoju. Primerjava deformacijskih oblik pokaže vpliv togosti ojačitev na amplitudo deformacij na mestu ojačitev. Vidimo, da je pri pločevinah z bolj togo ojačitvijo izbočenje manjše, saj je deformiranje pločevino neposredno pod vzdolžno ojačitvijo ovirano. Globalno deformacijske oblike vseh analiziranih pločevin izgledajo enako, spreminjajo se le amplitude nepopolnosti in deformacij pod ojačitvijo. V skrajnem desnem stolpcu (Preglednica 34) pa sta na isti sliki prikazani obliki normiranih pomikov (nepopolnosti in deformacije). Razvidno je, da pri različnih pločevinah pride do različne razlike pomikov nepopolnosti in deformacijskih pomikov. Vidimo, da je razlika močno odvisna od togosti

vzdolžne ojačitve. Pri najmanj togi ojačitvi 1Oj_3_2, so normirani pomiki zaradi deformacij pločevine večji od pomikov zaradi nepopolnosti pločevine na večjem delu konstrukcije, kot pri bolj togih pločevinah. To je nekako logično, saj bolj toga ojačitev ovira pločevino pri izbočenju izven ravnine. Pri najmočnejši ojačitvi pa so normirani pomiki zaradi nepopolnosti na večjem delu pločevine večji od normiranih pomikov deformacij.

Preglednica 34: Primerjava oblike nepopolnosti in deformacijske oblike za 1Oj_3 s Fourierjevimi nastavki

1Oj_3	Oblika nepopolnosti	Deformacijska oblika	Absolutna razlika norme pomikov
1Oj_3_1_Fourier			
1Oj_3_2_Fourier			
1Oj_3_3_Fourier			

Oglejmo si še primerjavo pomikov zaradi nepopolnosti in deformacij na istih pločevinah, le da so nastavki opisani na ročni način (Preglednica 35). Najprej opazimo, da se oblike nepopolnosti zelo razlikujejo od oblik deformacijskih pomikov. Oblike nepopolnosti so bolj "zveržene" oblike in ne tvorijo opaznega izbočenja na mestu nateznega polja. Deformacijska oblika je primerljiva z deformacijskimi oblikami iz preglednice (Preglednica 34). Pomiki na mestu ojačitev so manjši kadar je ojačitev bolj toga. V primeru šibke ojačitve pa so pomiki na mestu vzdolžne ojačitve večji. V desnem stolpcu (primerjava normiranih pomikov zaradi nepopolnosti in deformacij) vidimo, da v primeru ročnih nastavkov, neke splošne trditve za vse primere pločevin ne moremo podati. V enem primeru so deformacijski pomiki večji na enem podpanelu, v drugem primeru na drugem podpanelu. Pomiki zaradi nepopolnosti so na podpanelih ravno tako različnih velikosti, zato je tudi primerjava z normiranimi pomiki zaradi deformacij nejasna.

Preglednica 35: Primerjava oblike nepopolnosti in deformacijske oblike za 1Oj_3 z ročnimi nastavki

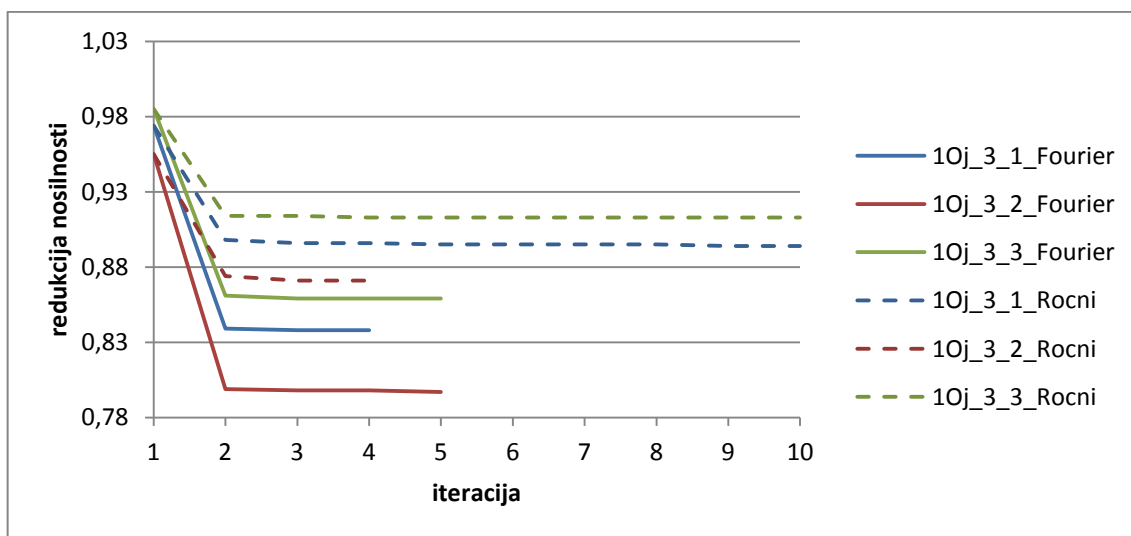
1Oj_3	Oblika nepopolnosti	Deformacijska oblika	Absolutna razlika norme pomikov
1Oj_3_1_Ročni			
1Oj_3_2_Ročni			
1Oj_3_3_Ročni			

Iz primerjave nosilnosti (Preglednica 36) razberemo, da je nosilnost najbolj neugodne nepopolne pločevine Fourier veliko manjša od nosilnosti pločevine Ročni. Povejmo še enkrat, da je v bazi oblik za oba načina zapisa oblike nepopolnosti približno računsko ekvivalentno število nastavkov. Določili smo tudi faktor nosilnosti pločevine, kjer smo začetno nepopolnost definirali po predlogu standarda. Nosilnosti najbolj neugodnih oblik pločevin s Fourierjevimi in ročnimi nastavki so nižje od nosilnosti po Evrokodu. V primeru Fourierjevih nastavkov (Preglednica 36 levo) ta razlika znaša do 11,3% (v primeru pločevine z najšibkejšo vzdolžno ojačitvijo 1Oj_3_2). Manjša nosilnost je posledica oblike nepopolnosti. Nosilnost pločevin, katerih nepopolnost je opisana z ročnimi nastavki, je od nosilnosti pločevin z nepopolnostmi iz standarda manjša za 3,5%.

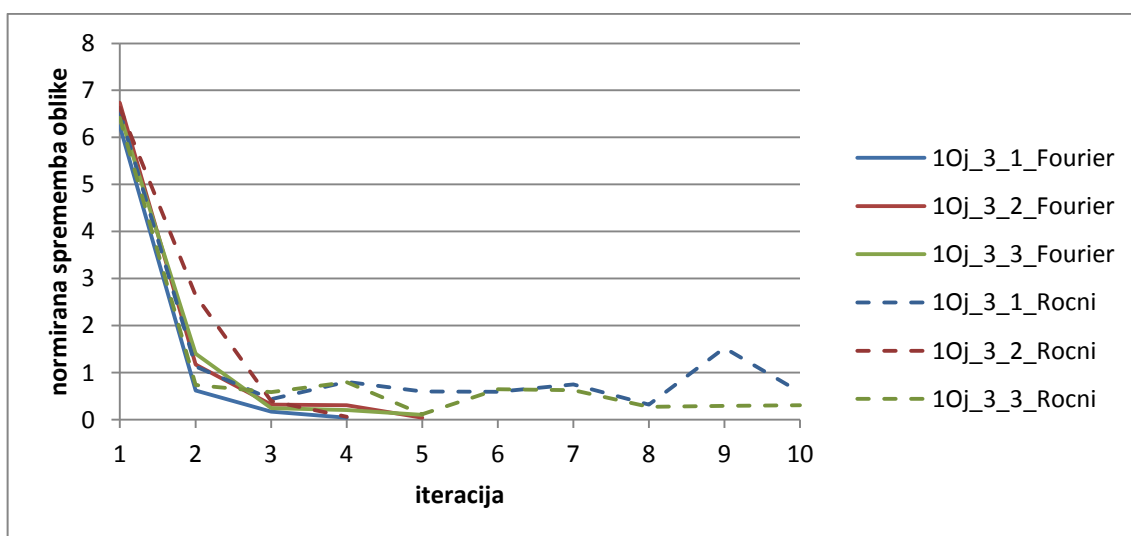
Preglednica 36: Primerjava nosilnosti pločevin 1Oj_3

oznaka	nosilnost pločevine Fourier	razlika od EC	oznaka	nosilnost pločevine Ročni	razlika od EC
1Oj_3_1	0,838	9,5	1Oj_3_1	0,894	3,5
1Oj_3_2	0,797	11,3	1Oj_3_2	0,871	3,1
1Oj_3_3	0,859	8,9	1Oj_3_3	0,913	3,2

Na grafu (Slika 37) so prikazane krivulje spremembe nosilnosti nepopolnih pločevin. Na tem mestu lahko potrdimo prejšnjo ugotovitev, da so nosilnosti nepopolnih pločevin s Fourierjevimi nastavki nižje od nosilnosti pločevin z ročnimi nastavki. Vidimo, da v primeru Fourierjevih nastavkov algoritem najde rešitev znotraj omejitve števila iteracij. Tudi iz tega vidiku je analiza s Fourierjevimi nastavki bolj primerna. Na sliki (Slika 38) pa so prikazane norme prispevkov uteži nastavkov po iteracijah. Prispevki uteži ročnih nastavkov bolj nihajo kot v primeru Fourierjevih nastavkov. Prispevki nekatere nemerodajne oblike se spreminjajo, pri tem pa nimajo nobenega vpliva na spremembo nosilnosti pločevine (Slika 37). Vplivajo pa na norme prispevkov, ki zato, v vsaj desetih korakih, ne pade pod vrednost tolerance. Vrednost faktorja nosilnosti v analizah z ročnimi nastavki je od analiz s Fourierjevimi nastavki višja pri 10j_3_1 za 6,3%, pri 10j_3_2 za 8,5% in pri 10j_3_3 za 5,9%. Vidimo, da je največja razlika v nosilnosti pri pločevini z najšibkejšo ojačitvijo in najmanjša pri pločevini z najmočnejšo ojačitvijo.



Slika 37: Faktorji nosilnosti po iteracijah za pločevine 10j_3



Slika 38: Norma prispevkov uteži nastavkov analize pločevin 10j_3

Raziskali smo tudi spreminjanje oblike nepopolnosti glede na deformacijsko obliko z naraščanjem iteracijskih korakov (Preglednica 37). Primerjavo delamo, ker nas zanima koliko je najbolj neugodna začetna nepopolnost podobna deformacijski obliki v mejnem stanju nosilnosti. Vrednosti prikazane na krivuljah v preglednici (Preglednica 37) so vrednosti standardne deviacije normiranih pomikov zaradi nepopolnosti in deformacij. Standardno deviacijo smo izračunali s sledečo formulo:

$$s_N = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{imp,i} - x_{def,i})^2} \quad (35)$$

Kjer je N število vozlišč končnih elementov, x_{imp} normirana vrednost pomika nepopolne konstrukcije, x_{def} pa normirana vrednost pomika deformirane konstrukcije. Večja kot je vrednost standardne deviacije, bolj se obliki med seboj razlikujeta. Vrednosti deviacij obravnavanih pločevin (Preglednica 37) v primeru Fourierjevih nastavkov konvergirajo k vrednosti 0. To pomeni, da se oblika nepopolne konstrukcije iz koraka v korak bolj približuje obliki deformirane konstrukcije.

Preglednica 37: Deviacija oblike po iteracijah za 10j_3

oznaka	Fourierjevi nastavki	Ročni nastavki
10j_3_1		
10j_3_2		
10j_3_3		

Če bazo oblik določimo z ročnimi nastavki, vrednosti standardne deviacije z iteracijami ne konvergirajo, vendar, kakor vidno iz grafov (Preglednica 37), najnižjo vrednost dosežejo že v drugi iteraciji. Vrednost faktorja nosilnosti v drugi iteraciji (Slika 37) je enaka faktorju iz zadnje iteracije. To pomeni, da je algoritem že v drugem koraku tako rekoč našel najbolj neugodno obliko nepopolne konstrukcije. V vseh naslednjih korakih s spreminjanjem prispevkov nemerodajnih oblik se je oblika nepopolne konstrukcije samo še bolj razlikovala od deformirane oblike. Ob vsem tem pa se nosilnost konstrukcije ni spreminjala. Spet lahko potrdimo zgornjo trditev, da analiza s Fourierjevimi nastavki bolje deluje na primeru pločevine z eno vzdolžno ojačitvijo. Pri tej analizi se oblika iz koraka v korak bolj približuje deformirani obliki, medtem ko se pri analizi z ročnimi nastavki oblika nepopolnosti iz koraka v korak bolj oddaljuje od deformirane oblike konstrukcije. Opazimo pa, da so vrednosti standardnih deviacij na ordinati vedno v istem velikostnem redu.

Pločevine 1Oj_4

V spodnji preglednici (Preglednica 38) so prikazane geometrijske karakteristike obravnavanih pločevin.

Preglednica 38: Pločevine 1Oj_4

B [cm]	t [cm]	b/t	I_p [cm ⁴]	H_{st} [cm]	T_{st} [cm]	I_{st} [cm ⁴]	γ	oznaka
200	1	100	18,32	12,70	1,27	674,60	36,83	1Oj_4_1
				10,35	1,03	337,30	18,42	1Oj_4_2
				17,71	1,77	2023,80	110,50	1Oj_4_3

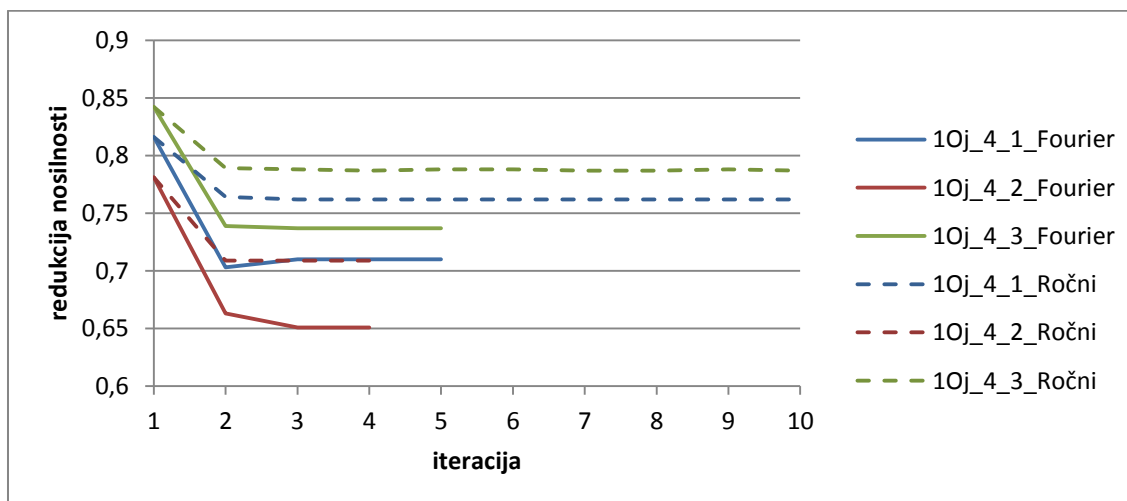
Iz primerjave najbolj neugodnih oblik nepopolnosti smo ugotovili, da so oblike precej podobne oblikam iz prejšnjega poglavja. Tako kot v primerih 1Oj_3, se tudi v primeru 1Oj_4_Fourier tvori val v nateznem polju, ki je zelo dobro viden. V primeru ročnih nastavkov se zgodi podobno kot v primerih 1Oj_3, kjer val ni povsem izrazito oblikovan, samo na nekaterih delih panela oz. podpanela. Primerjava oblik nepopolnosti in deformacijskih oblik prav tako pokaže veliko podobnost s prejšnjim poglavjem. Do največjih sprememb pride v območju nateznega pasu, kjer odvisno od togosti ojačitve v nekaterih primerih normirana vrednost deformacijskih pomikov preseže normirano vrednost pomikov zaradi nepopolnosti.

Nosilnost pločevin v tem primeru pokaže vpliv vitkosti podpanela na nosilnost. V primerjavi s pločevinami 1Oj_3 so v tem primeru nosilnosti manjše. Prav tako so nosilnosti pločevin, kjer smo nepopolnost opisali z ročnimi nastavki, nižje od nosilnosti pločevin, kjer je nepopolnost opisana s Fourierjevimi nastavki (Preglednica 39). Razlika za pločevino 1Oj_4_1 znaša 7,7%, za pločevino 1Oj_4_2 8,2% in za pločevino 1Oj_4_3 6,4%. Vidimo, da tako kot pri pločevinah 1Oj_3 najvišjo razliko v nosilnosti dobimo pri pločevini z najšibkejšo ojačitvijo, najmanjšo razliko pa pri pločevini z najmočnejšo ojačitvijo. V primerjavi s standardom Evrokod, so nosilnosti vseh pločevin, ne glede na način opisa oblik nepopolnosti, nižje. Tako kot v primeru 1Oj_3 tudi v primeru pločevin 1Oj_4 višjo razliko glede na Evrokod dobimo v primeru Fourierjevih nastavkov. Najvišje odstopanje znaša 11,3% za pločevino 1Oj_4_1.

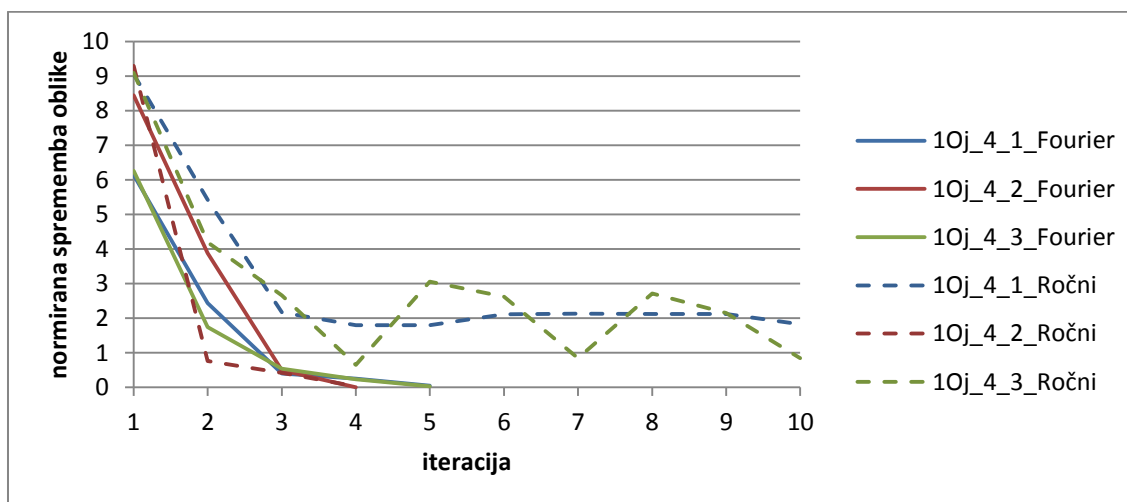
Preglednica 39: Primerjava nosilnosti pločevin 10j_4

oznaka	nosilnost pločevine Fourier	razlika od EC	oznaka	nosilnost pločevine Ročni	razlika od EC
10j_4_1	0,703	11,3	10j_4_1	0,762	3,9
10j_4_2	0,651	11,2	10j_4_2	0,709	3,3
10j_4_3	0,737	9,8	10j_4_3	0,787	3,7

Na sliki (Slika 39) vidimo, da nosilnost pločevin konvergira k neki vrednosti. Pri tem se v primeru ročnih nastavkov pri pločevinah 10j_4_1 in 10j_4_3 prispevki posameznih oblik h končni obliki nepopolnosti spreminjajo, nosilnost pa ohranja vrednost iz drugega iteracijskega koraka. Če si ogledamo še vrednosti standardne deviacije med iteracijskimi koraki, dobimo približno enake vrednosti in obliko diagrama kot v primeru pločevin 10j_3, kjer v drugem iteracijskem koraku dobimo najnižjo vrednost. Spet se potrdi ugotovitev, da se po drugem iteracijskem koraku nosilnost pločevine ne spreminja, spreminjajo pa se uteži posameznih oblik in vrednost odstopanja oblike nepopolnosti od deformacijske oblike.



Slika 39: Faktor nosilnosti po iteracijah za pločevine 10j_4



Slika 40: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevin 10j_4

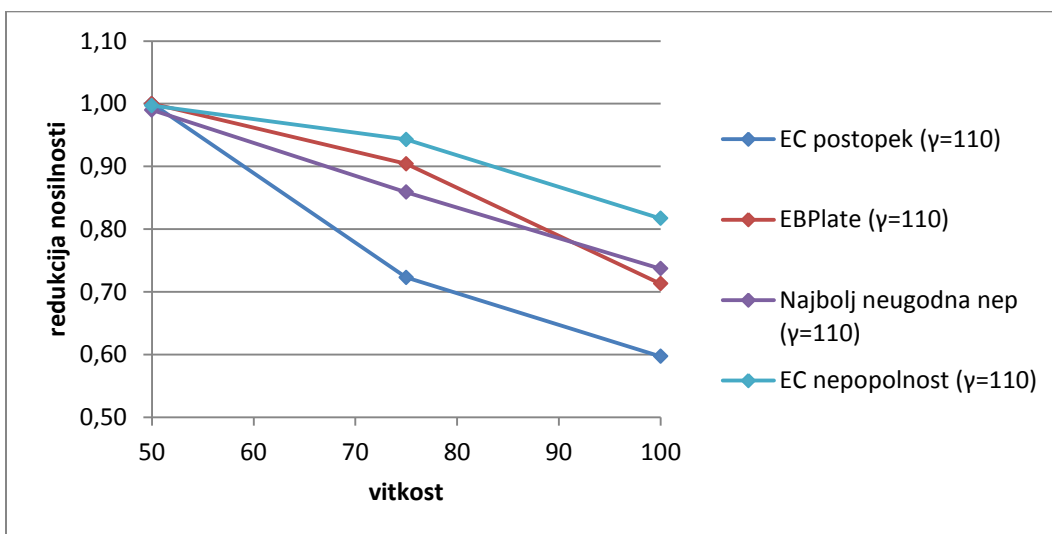
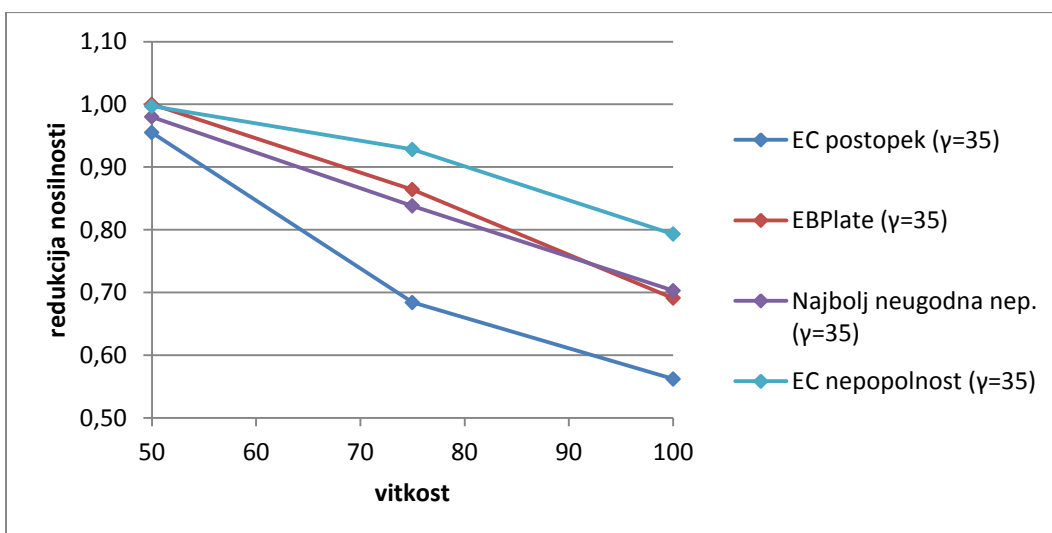
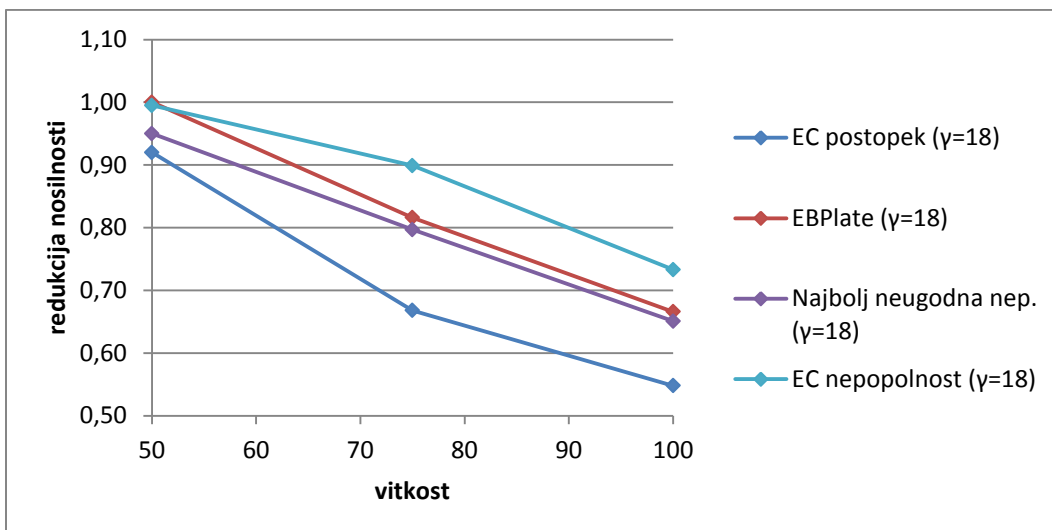
5.3.1.3 Primerjava faktorja nosilnosti

Primerjavo redukcij strižnih nosilnosti obravnavanih pločevin smo prikazali v preglednici (Preglednica 40). Nosilnost pločevine (oz. redukcijske faktorje) z najbolj neugodno nepopolnostjo, ki je rešitev optimizacijskega problema, smo primerjali s še tremi vrednostmi redukcije nosilnosti, ki smo jih določili na različne načine. Prvo vrednost smo določili s postopkom, ki je predstavljen v priročniku Design of Plated Structures (Beg, 2010), ki smo jo poimenovali EC postopek. Drugo vrednost smo določili s programom EBPlate, kjer je rezultat analize kritična strižna napetost pločevine. Na podlagi te napetosti pa lahko izračunamo relativno vitkost in redukcijo nosilnosti. Zadnji primer redukcijskega faktorja nosilnosti pa smo dobili z numerično analizo pločevine, kateri smo pripisali z Evrokodom predlagano začetno nepopolnost (EC nepopolnost).

Po postopku iz Evrokoda je za vse naše primere pločevin veljalo, da je merodajna globalna relativna vitkost pločevine, iz katere nato izračunamo redukcijski faktor strižne nosilnosti. Isto pločevino smo analizirali s programom EBPlate, kjer pa je bilo merodajno lokalno obnašanje. Kritična napetost τ_{cr} iz programa EBPlate je bila precej višja od vrednosti, ki jo dobimo z EC postopkom, kjer enačbe ne upoštevajo položaja ojačitve. Vitkost in redukcija nosilnosti sta odvisni od kritične strižne napetosti in meje tečenja. Postopek v priročniku za projektiranje vitkih pločevin je na varni strani, vendar je odstopanje od rezultatov numeričnih analiz in analiz s programom EBPlate veliko (Preglednica 40), saj enačbe v standardu uporabijo strižni izbočitveni koeficient, ki velja za pločevino z ojačitvijo na robu panela. Rezultati nosilnosti numeričnega izračuna se ujemajo tudi z rezultati iz programa EBPlate. Nekoliko večje odstopanje zaznamo pri pločevinah z višjo togostjo vzdolžnih ojačitev, ki znaša okoli 5% (primera 1Oj_3_3 in 1Oj_4_3). Najbolj konzervativne rezultate dobimo pri analizah konstrukcije z EC nepopolnostjo, ki od redukcije nosilnosti pločevine z najbolj neugodno obliko nepopolnosti odstopa za največ 11,3% (primera 1Oj_3_2 in 1Oj_4_2).

Preglednica 40: Primerjave nosilnosti vseh obravnavanih primerov pločevin 1Oj

	vitkost	togost	Najbolj neugodna nepopolnost	EC postopek	EBPlate	EC nepopolnost
1Oj_2_1	50	36,73	0,98	0,96	1,00	1,00
1Oj_2_2	50	18,36	0,95	0,92	1,00	1,00
1Oj_2_3	50	110,2	0,99	1,00	1,00	1,00
1Oj_3_1	75	37,27	0,84	0,68	0,86	0,93
1Oj_3_2	75	18,63	0,80	0,67	0,82	0,90
1Oj_3_3	75	111,8	0,86	0,72	0,90	0,94
1Oj_4_1	100	36,93	0,70	0,56	0,69	0,79
1Oj_4_2	100	18,42	0,65	0,55	0,67	0,73
1Oj_4_3	100	110,5	0,74	0,60	0,71	0,82



Slika 41: Grafičen prikaz redukcijskih faktorjev v odvisnosti od vitkosti podpanela za 10j

5.3.2 Analiza pločevin z dvema vzdolžnima ojačitvama

V parametrično študijo obravnavanih pločevin z dvema vzdolžnima ojačitvama smo vključili primere, katerih geometrijske karakteristike smo prikazali v preglednici (Preglednica 29). Zanima nas kako formacija nateznega polja, kjer spreminjamo togost ojačitev in vitkost panela, vpliva na obliko najbolj neugodne začetne nepopolnosti.

Preglednica 41: Redukcija strižne nosilnosti po Evrokodu za pločevine z dvema ojačitvama

	oznaka pločevine	χ_w	nadaljnje analize
1	2Oj_1_1	1,00	DA
	2Oj_1_2	0,95	DA
	2Oj_1_3	1,00	DA
2	2Oj_2_1	0,72	DA
	2Oj_2_2	0,69	DA
	2Oj_2_3	0,8	DA
3	2Oj_3_1	0,6	DA
	2Oj_3_2	0,57	DA
	2Oj_3_3	0,66	DA
4	2Oj_4_1	0,51	DA
	2Oj_4_2	0,49	DA
	2Oj_4_3	0,56	DA

5.3.2.1 Pločevine 2Oj_1

Po izvedenih analizah smo ugotovili, da je zmanjšanje nosilnosti zaradi oblike nepopolnosti zanemarljivo majhno, oziroma ga sploh ni. Razlog za to je majhna vitkost podpanela. V nateznem polju se val ne tvori. Izbokline in vbokline so brez kakršnegakoli reda razporejene po celotnem panelu. Rečemo, da je v primeru malo vitkih, celo kompaktnih pločevin, oblika nepopolnosti lahko kakršnakoli. Iz iteracije v iteracijo se oblike spreminjajo, uteži posameznega nastavka skačejo iz ene vrednosti na drugo, vrednost standardne deviacije je velika in z iteracijami strmo narašča. Ker je rezultate pločevin 2Oj_1 nesmiselno primerjati z ostalimi, smo te primere pločevin izločili iz nadaljnje obravnave.

5.3.2.2 Pločevine 2Oj_2

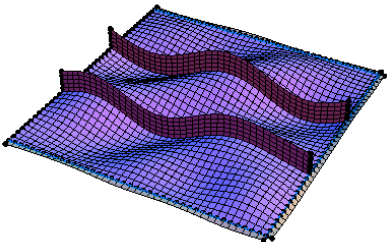
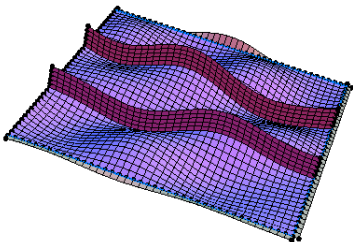
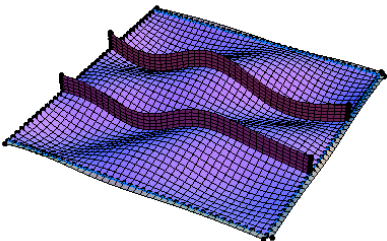
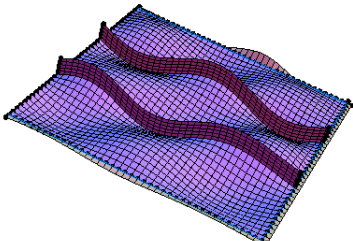
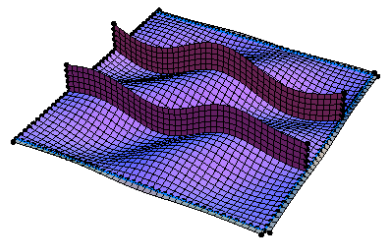
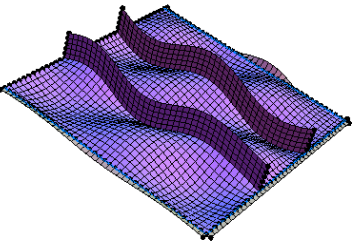
V preglednici (Preglednica 42) so prikazane geometrijske karakteristike v tem poglavju obravnavanih in primerjanih pločevin.

Preglednica 42: Pločevine 2Oj_2

B [cm]	t [cm]	b/t	I_p [cm ⁴]	H_{st} [cm]	T_{st} [cm]	I_{st} [cm ⁴]	γ	oznaka
150	1	50,0	13,74	13,15	1,32	757,96	55,18	2Oj_2_1
				10,71	1,07	378,98	27,59	2Oj_2_2
				18,36	1,84	2273,88	165,54	2Oj_2_3

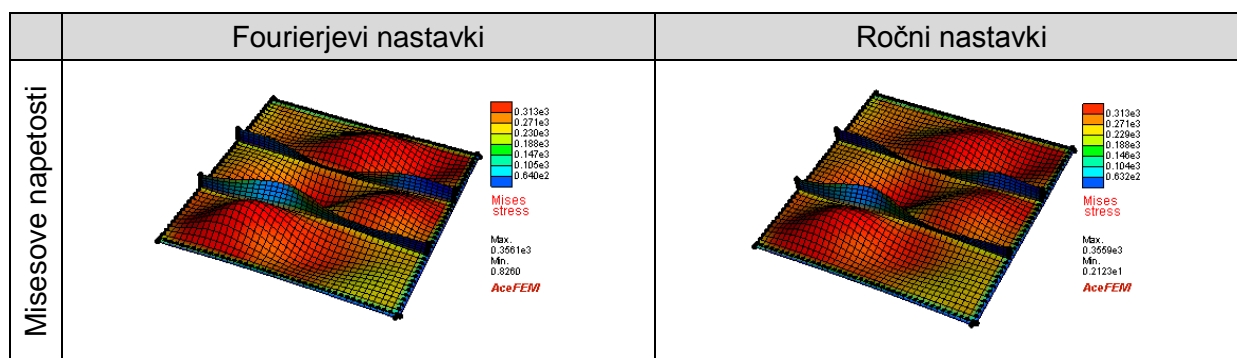
Primerjava oblik nepopolnosti pločevin (Preglednica 43), kjer so oblike opisane s Fourierjevimi ali ročnimi nastavki nam pokaže, da sta obliki iste pločevine zelo podobni. V obeh primerih se na mestu nateznega pasu tvori izboklina oz. vboklina. Če obliko nepopolnosti za pločevine z dvema ojačitvama primerjamo z obliko pločevin z eno ojačitvijo (Preglednica 33) opazimo, da najbolj neugodna oblika nepopolnosti izgleda drugače. Tvorita se dve diagonalni izboklini oz. vboklini, kar je posledica formacije nateznega pasu v postkritičnem stanju (Preglednica 44). Na mestu koncentracije nateznih napetosti je amplituda nepopolnosti največja (Preglednica 43). Največje razlike v obliki nepopolnosti so opazne v vogalih pločevine (lokalno), globalno pa je oblika nepopolnosti v vseh primerih podobna. Amplitude nepopolnosti so v vseh treh primerih približno enake, glede na način zapisa nastavkov nepopolnosti pa se razlikujejo največ 4%. Dodatna razlika v obliki nepopolnosti glede na zapis nastavkov je, da sprememba amplitude pri Fourierjevih nastavkih poteka zvezno. V poglavju 3.7 smo opisali oba načina nastavkov in definicijo le-teh na pločevino. V primeru pločevine z dvema vzdolžnima ojačitvama se lepo vidi, da ročni nastavki obliko nepopolnosti na mestu vzdolžnih ojačitev prelomijo (Preglednica 46); prvi stolpec Oblika nepopolnosti), kar označimo kot nezvezen potek amplitude.

Preglednica 43: Najbolj neugodne oblike nepopolnosti pločevine 2Oj_2

2Oj_2	Fourierjevi nastavki	Ročni nastavki
2Oj_2_1		
2Oj_2_2		
2Oj_2_3		

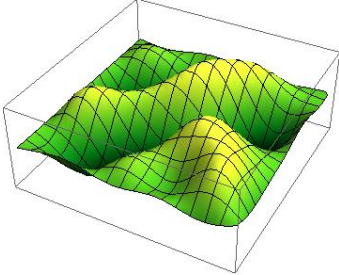
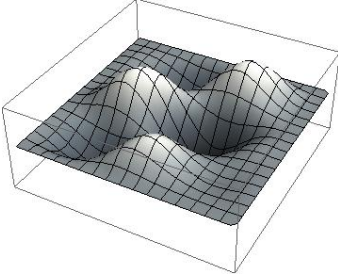
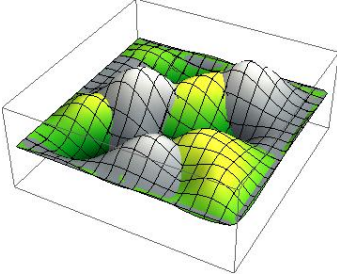
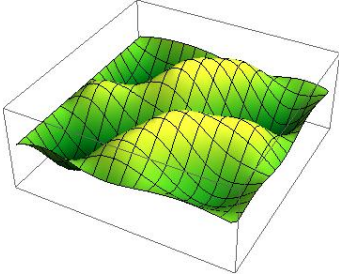
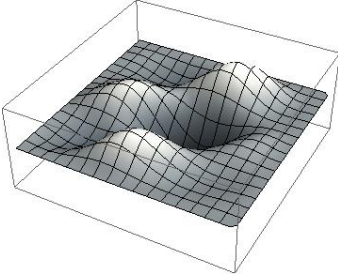
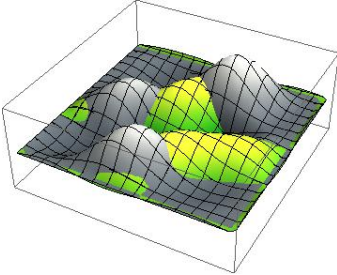
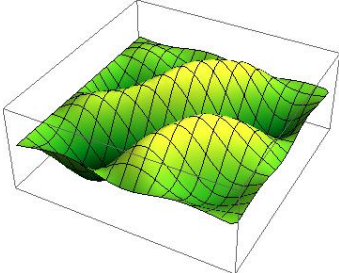
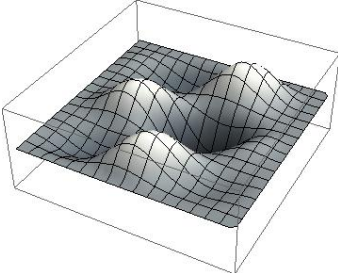
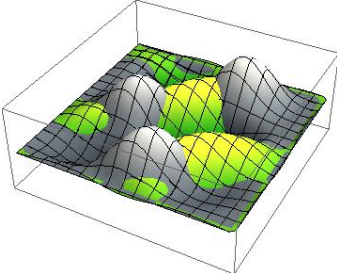
Misesove napetosti v pločevini z dvema ojačitvama v postkritičnem stanju tvorijo dve diagonali koncentriranih napetosti. Prva diagonala poteka od spodnjega levega vogala preko prve vzdolžne ojačitve do desnega vogala podpanela pri drugi vzdolžni ojačitvi. Druga diagonala pa poteka od levega vogala podpanela pri prvi vzdolžni ojačitvi, preko druge ojačitve do zgornjega desnega vogala pločevine. V primeru ene ojačitve se tvori le ena diagonala. Kot smo že omenili, sta oblika nepopolnosti in oblika deformacij pločevine podobni. Napetosti so posledica deformacij pločevine, koncentrirane misesove napetosti v obliki dveh diagonal (Preglednica 46) so posledica deformacije pločevine zaradi strižne obležbe. Če primerjamo obliki misesovih napetosti in oblike deformacij (Preglednica 45 in Preglednica 46) opazimo podobnost. Kjer pride do izbočitve panela, so koncentracije napetosti največje.

Preglednica 44: Misesove napetosti za pločevino 2Oj_2_1



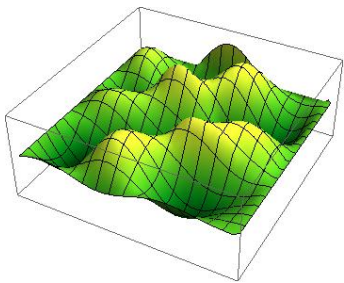
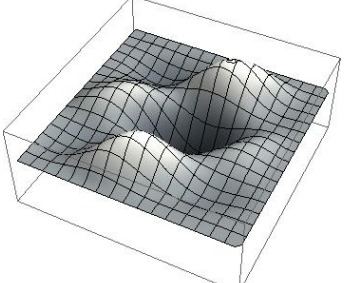
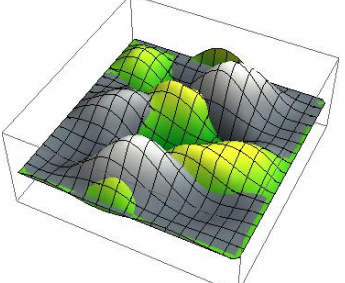
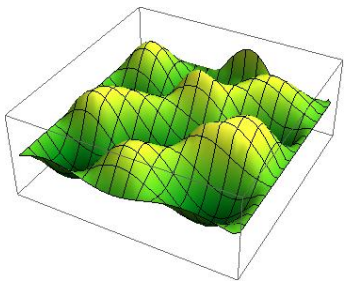
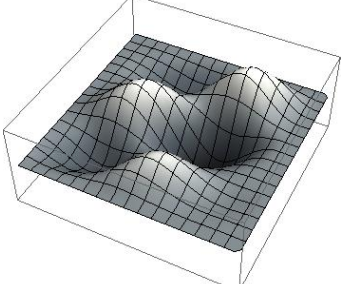
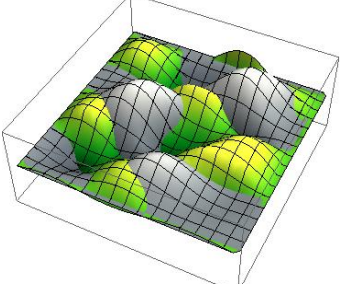
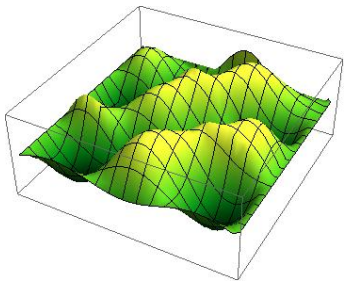
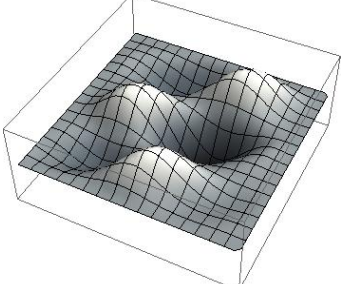
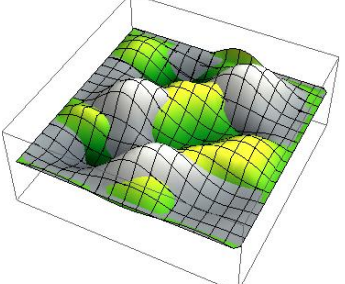
Primerjava oblik nepopolnosti s Fourierjevimi nastavki in deformacijskih oblik (Preglednica 45) za pločevino z dvema vzdolžnima ojačitvama pokaže neizogibno podobnost oblik. V primerjavi s pločevino z eno ojačitvijo (Preglednica 34) so tudi v tem primeru lepo vidne največje nepopolnosti na mestu nateznega polja. V primeru z dvema ojačitvama imamo dva vala največjih pomikov nepopolnosti (zaradi koncentracije napetosti v nateznem polju), pri eni ojačitvi pa le enega. Na mestu vzdolžnih ojačitev so pomiki deformirane pločevine manjši kot v podpanelih, ki so odvisni od togosti ojačitev. Na teh mestih so normirani pomiki zaradi nepopolnosti večji od normiranih pomikov zaradi deformacij. V podpanelih pa se zgodi ravno obratno, da so normirani pomiki deformirane oblike večji od normiranih pomikov zaradi oblike nepopolnosti. Če povzamemo: v preglednici (Preglednica 45) so v tretjem stolpcu prikazane primerjave normiranih pomikov. Pomiki oblike nepopolnosti (zeleno) so večji od pomikov deformacij (siva) na mestih vzdolžnih ojačitev, kar je vidno v vseh treh primerih. V primerjavi s pločevino z eno ojačitvijo 1Oj, so v primeru 2Oj bolj očitni vplivi pozicije vzdolžnih ojačitev, saj so normirane amplitude nepopolnosti v vseh treh primerih večje od normiranih pomikov zaradi deformacij na istih mestih pločevine. Pri pločevinah 1Oj to popolnoma ne drži, kjer tudi na mestih ojačitev normirani pomiki deformacij presežejo normirane amplitude nepopolnosti.

Preglednica 45: Primerjava oblike nepopolnosti in deformacijske oblike za 2Oj_2 s Fourierjevimi nastavki

2Oj_2	Oblika nepopolnosti	Deformacijska oblika	Primerjava normiranih pomikov
2Oj_2_1_Fourier			
2Oj_2_2_Fourier			
2Oj_2_3_Fourier			

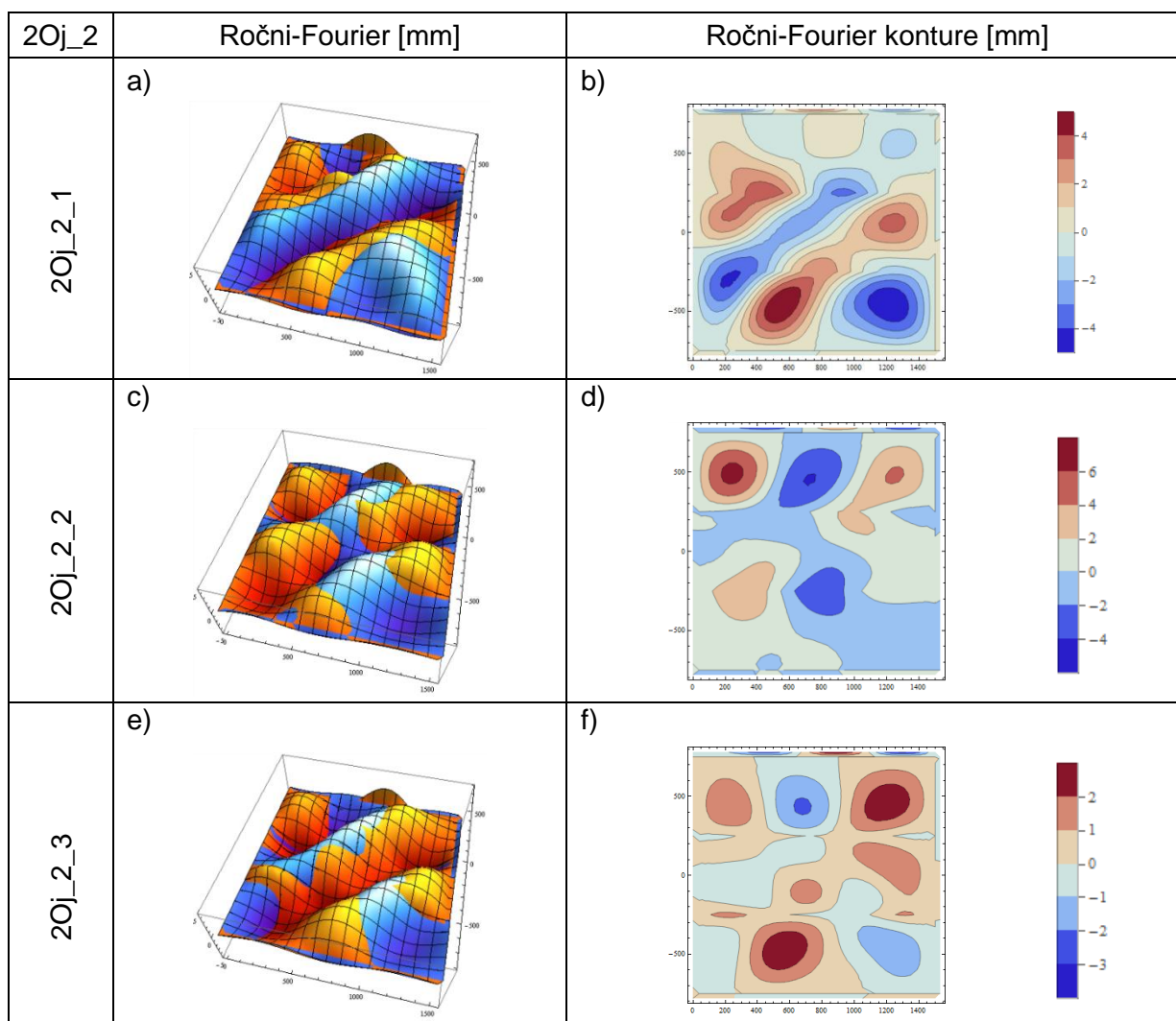
V preglednici (Preglednica 46) so prikazane primerjave oblik nepopolnosti in deformacijskih oblik, kjer so oblike nepopolnosti opisane z ročnimi nastavki. Prav tako kot v primeru Fourierjevih nastavkov (Preglednica 45) tudi tu opazimo podobnost oblike izbočitve zaradi nepopolnosti in deformacij. V vseh treh primerih se na mestu koncentriranih natezних napetosti v nateznem pasu tvorita dve izboklini/vboklini diagonalne oblike. Primerjava normiranih amplitud oblike v tretjem stolpcu prav tako pokaže podobnost s preglednico (Preglednica 45), kjer je na mestu vzdolžnih ojačitev normirana vrednost pomika nepopolnosti večja od normirane vrednosti pomika deformacij. Globalno so oblike nepopolnosti v vseh treh primerih togosti vzdolžnih ojačitev enake. Največje vrednosti normiranih pomikov zaradi deformacij so v vseh treh primerih na istih mestih večje od normiranih pomikov zaradi oblike nepopolnosti. Na tem mestu lahko še enkrat omenimo posebnost zapisa oblik z ročnimi nastavki; v levem stolpcu preglednice (Preglednica 46) je lepo vidna nezveznost (negladkost) oblike nepopolnosti na mestih pod vzdolžnimi ojačitvami.

Preglednica 46: Primerjava oblike nepopolnosti in deformacijske oblike za 2Oj_2 z ročnimi nastavki

2Oj_2	Oblika nepopolnosti	Deformacijska oblika	Primerjava normiranih pomikov
2Oj_2_1_Ročni			
2Oj_2_2_Ročni			
2Oj_2_3_Ročni			

Sama primerjava oblike nepopolnosti glede na način zapisa nastavkov je predstavljena v preglednici (Preglednica 47). Predno se lotimo razlage rezultatov, povejmo, da na slikah (Preglednica 47a, c in e) modra oblika nepopolne pločevine opisuje ročne nastavke, oranžna oblika nepopolnosti pa Fourierjeve nastavke. Desne slike (Preglednica 47b, d in f) prikazujejo razliko amplitud nepopolnosti (t.j. amplituda Ročni – amplituda Fourier) v vsakem vozlišču končnih elementov. Rdeča barva pomeni višji pomik nepopolne konstrukcije z ročnimi nastavki, modra pa višji pomik nepopolne konstrukcije s Fourierjevimi nastavki. Opazimo, da je razlika v amplitudi nepopolnosti največja v primeru z najšibkejšo ojačitvijo 2Oj_2_2, ki znaša 6 mm. Pri pločevini 2Oj_2_1 zasledimo rahel zamik diagonale izbočitve na mestu nateznega polja (Preglednica 47b). V vogalu izstopa lokalno izbočenje v primeru ročnih nastavkov, ki pa na nosilnost nima vpliva. Nepopolnosti pločevine 2Oj_2_2 sta skoraj popolnoma enaki za oba načina zapisa. Opazimo skoraj nično odstopanje na mestu diagonal. Spet do največje razlike v obliki pride v vogalih konstrukcije, kjer ročni nastavki lokalno neki obliki pripišejo velik prispevek. Pri pločevini 2Oj_2_3 so razlike v obliki nepopolnosti najmanjše. Iz primerjave samih oblik nepopolnosti ugotovimo, da v obeh načinih zapisa nastavkov algoritem kot rezultat optimizacijskega problema izbere zelo podobni obliki. Na tem mestu lahko rečemo, da sta oba načina zapisa nastavkov primerna za iskanje najbolj neugodne oblike nepopolnosti pločevine.

Preglednica 47: Primerjava oblik nepopolnosti

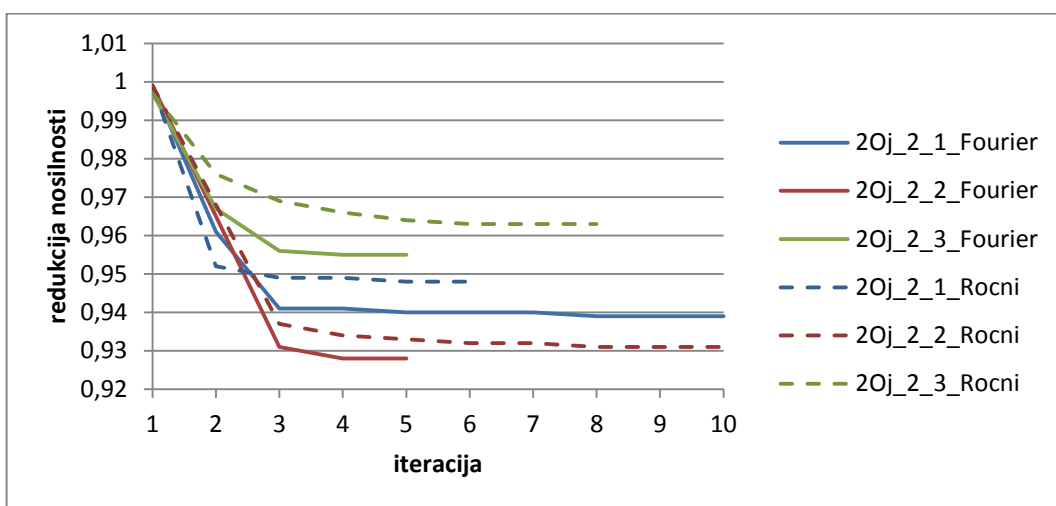


Nosilnosti pločevin, določene z našim algoritmom in posebej definiranimi nastavki oblik nepopolnosti, so v vseh primerih nižje od nosilnosti, ki jo predlaga Evrokod (Preglednica 48). Razlika s standardom ni tako velika kot je bila v primeru ene vzdolžne ojačitve. Največja razlika se zgodi v primeru z najmanjšo togostjo 20j_2_2, ki znaša 6,6% v primeru ročnih nastavkov in 6,9% v primeru Fourierjevih nastavkov. V primerih z močnejšima ojačitvama 20j_2_1 in 20j_2_3 je razlika v primerjavi z EC manjša. Če razliko glede na Evrokod za pločevine z dvema vzdolžnima ojačitvama primerjamo z razliko glede na Evrokod za pločevine z eno ojačitvijo opazimo, da je razlika slednje veliko večja v primeru Fourierjevih nastavkov. Odstopanje v primeru ročnih nastavkov je v obeh primerih približno enako.

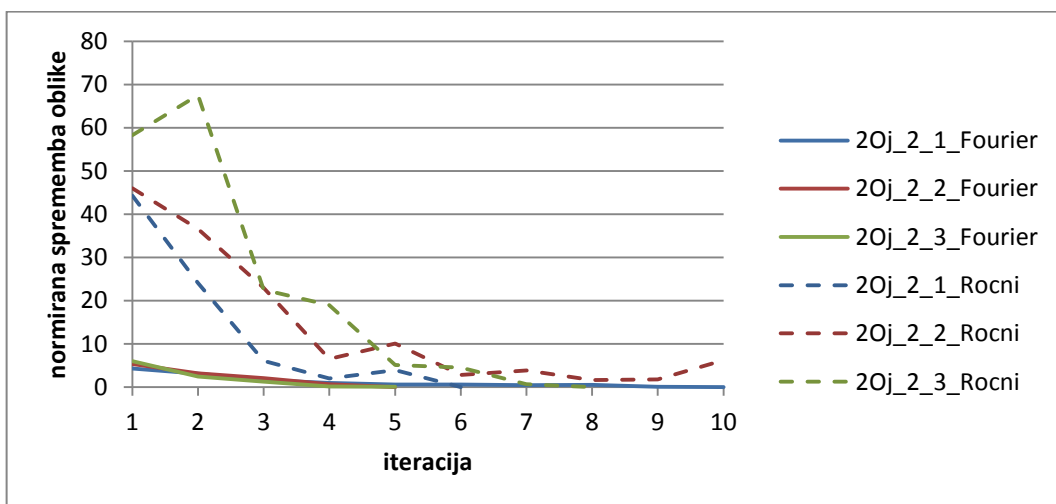
Preglednica 48: Primerjava nosilnosti pločevin 20j_2

oznaka	nosilnost pločevine Fourier	razlika od EC	oznaka	nosilnost pločevine Ročni	razlika od EC
20j_2_1	0,939	5,9	20j_2_1	0,948	5,0
20j_2_2	0,928	6,9	20j_2_2	0,931	6,6
20j_2_3	0,955	4,4	20j_2_3	0,963	3,6

Nosilnost pločevin, katerih nepopolnost je definirana kot kombinacija ročnih nastavkov, je v vseh primerih višja od nosilnosti pločevin, katerih nepopolnost je definirana kot kombinacija Fourierjevih nastavkov (Preglednica 48 in Slika 42). Razlika je v primeru pločevine 2Oj_2_1 1%, pločevine 2Oj_2_2 le 0,3% in v primeru 2Oj_2_3 0,8%. V primeru najmanjše togosti vzdolžnih ojačitev je razlika nosilnosti glede na način zapisa nastavkov najmanjša. V vseh primerih nosilnost v drugem ali tretjem koraku že skoraj doseže tisto najnižjo iz zadnje iteracije. Kar kaže na to, da je algoritem zelo učinkovit v iskanju najnižje nosilnosti ob spreminjanju oblike nepopolnosti. Glede na najnižjo se nosilnost iz druge/tretje iteracije razlikuje do 2%. V primeru ročnih nastavkov so norme prispevkov veliko višje od norm v primeru Fourierjevih nastavkov (Slika 43). Najvišje so v prvih iteracijah in z iteracijami padajo. To pomeni, da algoritem v iskanju najbolj neugodne oblike nepopolnosti, obliko v začetnih iteracijah močno spreminja. V nadaljevanju pa se norma prispevkov v primeru ročnih nastavkov (tudi Fourierjevih) umiri in zadosti pogoju tolerance. Domnevamo, da bi algoritem v nadaljevanju lahko našel še bolj neugodno obliko, nepopolnosti, vendar zaradi časovne prezahtevnosti takega računa nismo pognali.



Slika 42: Faktorji nosilnosti po iteracijah za pločevine 2Oj_2



Slika 43: Norma prispevkov uteži nastavkov analize pločevin 2Oj_2

V poglavju 5.3.1 smo natančneje opisali pomen in postopek določanja standardne deviacije, ki predstavlja neko mero, s katero lahko primerjamo vrednosti različnih velikostnih redov. Primerjali smo obliki najbolj neugodne nepopolnosti, ki jo kot rešitev poda algoritem, in deformacijsko obliko. Kot vidimo v preglednici spreminjanja standardne deviacije med iteracijami (Preglednica 49) v večini primerov vrednost le-te z iteracijami pada. Opazimo, da, tako kot tudi v primeru ene vzdolžne ojačitve, tudi v primeru dveh vzdolžnih ojačitev, najnižja vrednost standardne deviacije ni v zadnji iteraciji. Oblika nepopolnosti se najbolj približa deformacijski obliki v nekem vmesnem koraku. Kljub temu, da je vrednost standardne deviacije v tem koraku najmanjša, pa nosilnost še ni dosegla najnižje ravni. Ta se v naslednjih korakih še zmanjša, vendar pa se standardna deviacija poveča. Kot najbolj idealen primer bi lahko določili primer 2Oj_2_1 s Fourierjevimi nastavki, kjer standardna deviacija (med petim in osmim korakom malce naraste, vendar zanemarimo), nosilnost pločevine in norme prispevkov iz koraka v korak padajo. Vidimo, da so vrednosti standardnih deviacij za posamezen primer ojačitve 2Oj_2 glede na način zapisa nastavkov podobne. To je logično, saj je že sama primerjava oblik nepopolnosti in deformacij pokazala veliko podobnost (Preglednica 45, Preglednica 46 in Preglednica 47).

Preglednica 49: Deviacija oblike po iteracijah za 2Oj_2

oznaka	Fourierjevi nastavki	Ročni nastavki
2Oj_2_1		
2Oj_2_2		
2Oj_2_3		

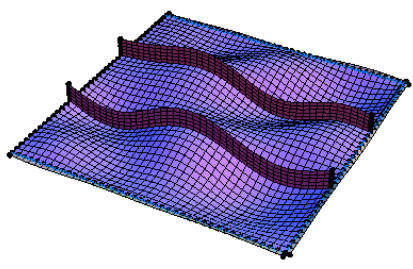
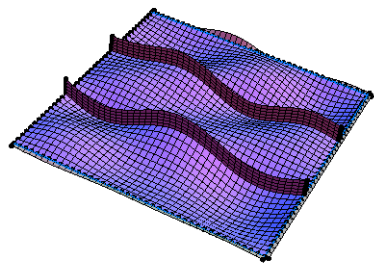
5.3.2.3 Pločevine 2Oj_3

Preglednica 50: Pločevine 2Oj_3

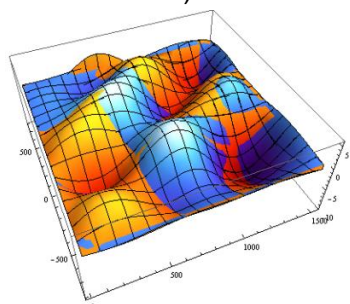
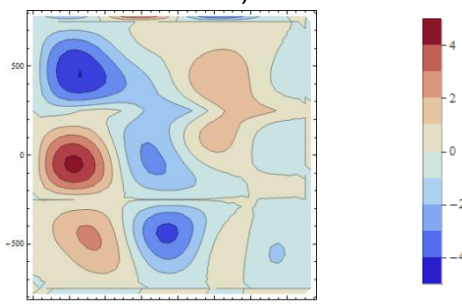
B [cm]	t [cm]	b/t	I_p [cm ⁴]	H_{st} [cm]	T_{st} [cm]	I_{st} [cm ⁴]	γ	oznaka
200	1	66,7	18,32	14,28	1,43	997,19	54,45	2Oj_3_1
				11,61	1,16	498,60	27,22	2Oj_3_2
				19,97	2,00	2991,57	163,34	2Oj_3_3

V vseh primerih se tvorita dve izbočitveni diagonalni na mestih koncentriranih nateznih napetosti. Izgled oblike nepopolnosti za pločevine, kjer so oblike opisane s Fourierjevimi nastavki, je podoben izgledu oblike pločevine, kjer so oblike opisane z ročnimi nastavki (Preglednica 51). V nadaljevanju smo prikazali le primerjavo oblik pločevine 2Oj_3_1 (pločevina s srednjo togostjo ojačitev), na kateri smo predstavili posebnosti oblik nepopolnosti v primerih 2Oj_3. Sama primerjava oblik (Fourierjevi in ročni nastavki) je prikazana v preglednici (Preglednica 52). Opazimo, da obliki na večjem delu pločevine sovpadata, le na nekaterih lokalnih mestih odstopata največ 4 mm (Preglednica 52b). Diagonali izbočitve za ročne in Fourierjeve nastavke sta na levem delu nekoliko zamaknjeni, zato tam tudi večje odstopanje z-koordinat nepopolne oblike pločevine. Ročni nastavki nekoliko bolje opišejo neugodno obliko nepopolnosti.

Preglednica 51: Najbolj neugodna oblika nepopolnosti pločevine 2Oj_3_1

	Fourierjevi nastavki	Ročni nastavki
2Oj_3_1		

Preglednica 52: Primerjava oblik nepopolnosti na pločevini 2Oj_3_1

	Ročni-Fourier [mm]	Ročni-Fourier konture [mm]
2Oj_3_1	a) 	b) 

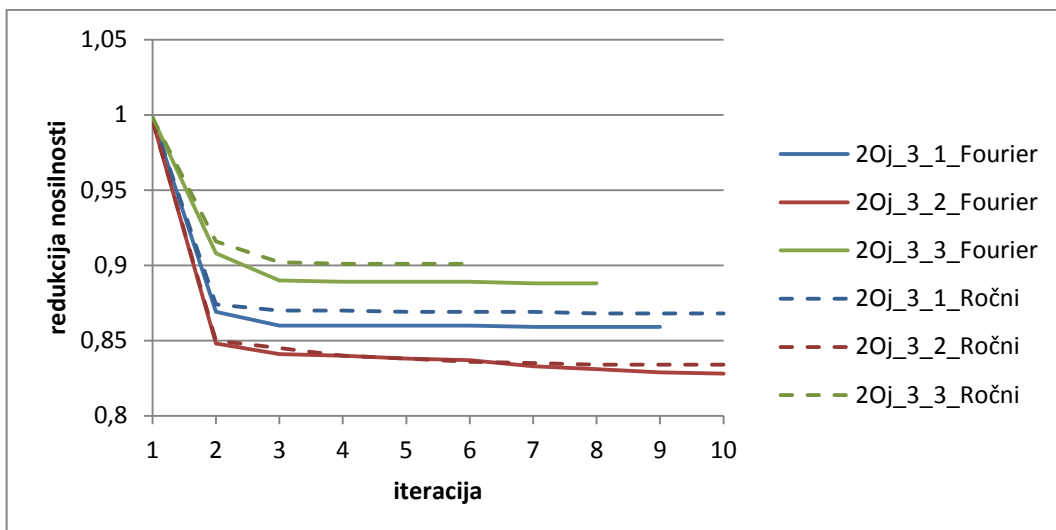
Nosilnost nepopolnih pločevin 2Oj_3 v primerjavi z nosilnostmi, predlaganih s standardom Evrokod, so prikazani v preglednici (Preglednica 53). Opazimo, da največja razlika nastane pri najšibkejši pločevini 2Oj_3_2, kjer so oblike definirane s Fourierjevimi nastavki, in znaša 15%. V ostalih primerih je nosilnost pločevin, katerih nepopolnost je opisana z ročnimi ali Fourierjevimi nastavki, tudi manjša od nosilnosti po Evrokodu za povprečno 12,5%. Sama primerjava med nosilnostmi pločevin z ročnimi oz. Fourierjevimi nastavki pokaže, da sta nosilnosti skoraj enaki in v primeru 2Oj_3_1 odstopata za 1%, v primeru 2Oj_3_2 za 0,7% in v primeru 2Oj_3_3 za 1,4% (Slika 44). V primerjavi s primerom 2Oj_2 je odstopanje nosilnosti med pločevinami z različnimi načini opisa nastavkov približno enako.

Preglednica 53: Primerjava nosilnosti pločevin 2Oj_3

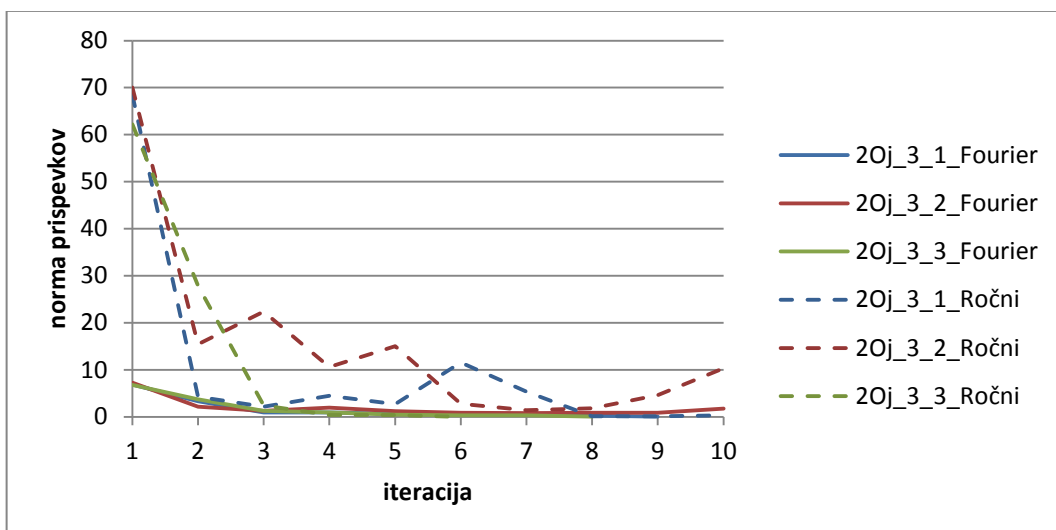
oznaka	nosilnost pločevine Fourier	razlika od EC	oznaka	nosilnost pločevine Ročni	razlika od EC
2Oj_3_1	0,859	13,1	2Oj_3_1	0,868	12,1
2Oj_3_2	0,828	15,0	2Oj_3_2	0,834	14,5
2Oj_3_3	0,888	10,5	2Oj_3_3	0,901	9,3

Spreminjanje faktorja nosilnosti (Slika 44) prikaže, kako majhna je razlika med vrednostmi nosilnosti za ročne in Fourierjeve nastavke. Ta je majhna skozi celoten potek reševanja optimizacijskega problema, in je najmanjša v primeru z najšibkejšo vzdolžno ojačitvijo. V tem primeru nosilnost z iteracijami vztrajno pada, medtem ko pri ostalih dveh primerih (2Oj_3_1 in 2Oj_3_3) konvergira pri tretjem iteracijskem koraku. Spreminjanje oblike nepopolnosti skozi iteracije je prikazano na sliki (Slika 45). Tako kot tudi v primeru pločevin 2Oj_2, je med reševanjem optimizacijskega problema spreminjanje oblike v večji meri prisotno pri pločevinah z ročnimi nastavki. Posebnost primera 2Oj_3_2 je, da je poleg nezadostitve pogoju tolerance vrednost norme prispevkov uteži nastavkov nepopolnosti v zadnjem koraku precej velika (1,735). Tako velike vrednosti v desetem koraku pri zapisu oblike s Fourierjevimi nastavki do sedaj še nismo imeli. Opazimo tudi, da med potekom računa v nobeni vmesni iteraciji ni dosežena nizka vrednost norme prispevkov uteži. Razlog je neka nemerodajna oblika iz baze oblik, katere prispevek h končni obliki se med iteracijami večja in manjša. Pri ročnih nastavkih smo že iz primerov pločevin 2Oj_2 vajeni visokih vrednosti norm v prvih iteracijah. V kasnejših iteracijah se ta vrednost še vedno spreminja, nima pa velikega vpliva na spremembo nosilnosti.

Preglednica (Preglednica 54) prikazuje standardno deviacijo normiranih pomikov nepopolnosti in deformacij pločevine. Opazimo, da je v primeru 2Oj_3_1 tudi pri Fourierjevih nastavkih potek te vrednosti veliko bolj nemiren kot v primeru 2Oj_2. V obeh primerih je vrednost najnižja v drugem iteracijskem koraku, v naslednjih korakih pa zopet naraste. V drugem koraku algoritem približno že najde najbolj neugodno obliko nepopolnosti (Slika 44), v naslednjih korakih pa jo samo še izpopolnjuje. Med izpopolnjevanjem se oddaljuje od deformacijske oblike, nosilnost pločevine pa se ne spreminja. Najnižji vrednosti sta primerljivi z najnižjimi vrednostmi od primerov 2Oj_2.



Slika 44: Faktorji nosilnosti po iteracijah za pločevine 20j_3



Slika 45: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevin 20j_3

Preglednica 54: Standardna deviacija oblike po iteracijah za 20j_3_1

oznaka	Fourierjevi nastavki	Ročni nastavki
20j_3_1		

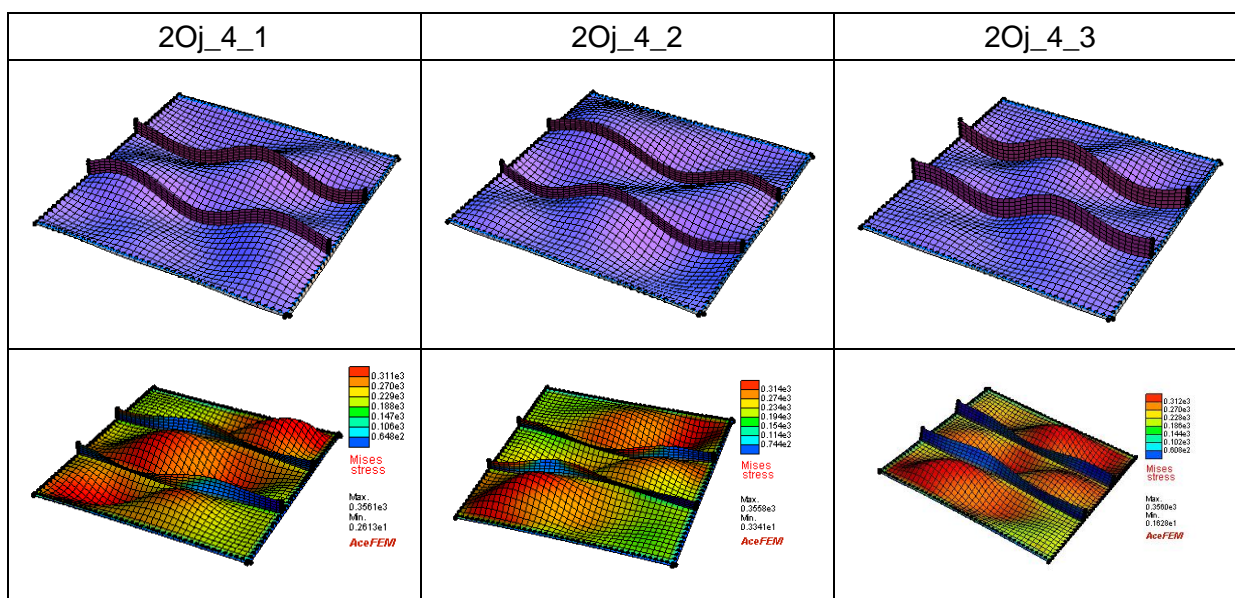
5.3.2.4 Pločevine 2Oj_4

Preglednica 55: Pločevine 2Oj_4

B [cm]	t [cm]	b/t	I_p [cm ⁴]	H_{st} [cm]	T_{st} [cm]	I_{st} [cm ⁴]	γ	oznaka
250	1	83,3	22,89	15,22	1,52	1231,10	53,77	2Oj_4_1
				12,36	1,24	615,55	26,89	2Oj_4_2
				21,30	2,13	3693,30	161,32	2Oj_4_3

Pri analizi reštev optimizacijskega problema pločevin 2Oj_4 smo prišli do pomembnega spoznanja. Oblike nepopolnosti za Fourierjev način definiranja nastavkov so po izgledu enake oblikam nepopolnosti za ročni način definiranja nastavkov. Pri analizah pločevin z različno togimi vzdolžnimi ojačitvami pa je prišlo do očitnih razlik. Ugotovili smo, da je vitkost pločevine $b/t=83,33$ zadostna, da pri različnih togostih pride do različnega porušnega sistema v postkritičnem stanju. Pri togih vzdolžnih ojačitvah (primer 2Oj_4_3) se ob porušitvi tvorita dva pasova koncentriranih nateznih napetosti. Tako obnašanje nam je znano že iz vseh prejšnjih primerov z dvema ojačitvama. Pri šibkih ojačitvah (v našem primeru 2Oj_4_1 in 2Oj_4_2) pa se tvori le en sam natezni pas po celotni diagonali panela pločevine (Preglednica 56). Opazimo podobnost deformacijskih oblik z rešitvami najbolj neugodne oblike nepopolnosti (Preglednica 56).

Preglednica 56: Oblika nepopolne pločevine s Fourierjevimi nastavki in Misesove napetosti za 2Oj_4

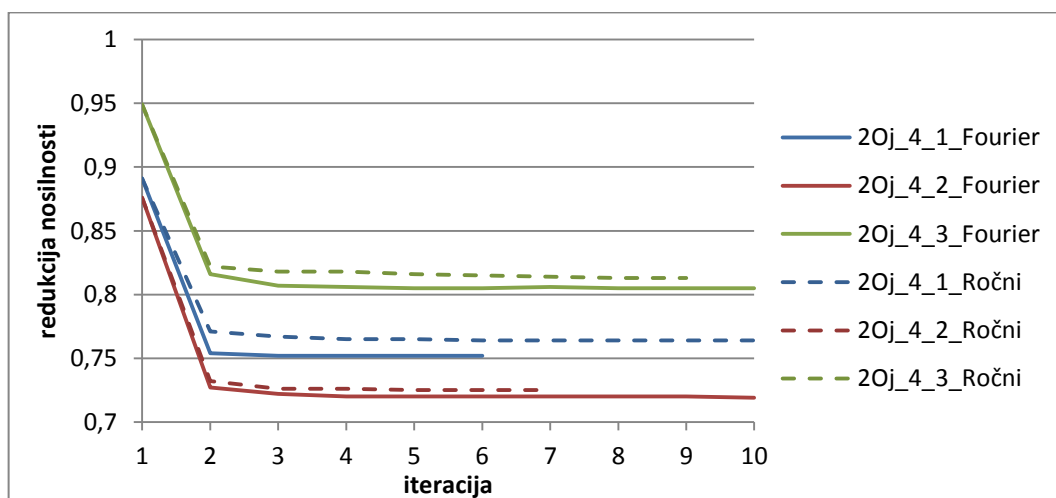


Nosilnost pločevin 2Oj_4 v primerjavi z nosilnostjo po priporočilu standarda Evrokod je v vseh primerih manjša. Največja razlika z Evrokodom nastane pri pločevini 2Oj_4_1, ki znaša 17,7% (Preglednica 57). Odstopanje od Evrokoda za pločevine 2Oj_4 je primerljivo z odstopanjem pločevin 2Oj_3. Razlika med nosilnostjo pločevine s Fourierjevimi oz. ročnimi nastavki v primeru pločevine 2Oj_4_1 znaša 1,6%, pločevine 2Oj_4_2 0,8% in v primeru pločevine 2Oj_4_3 1,0%.

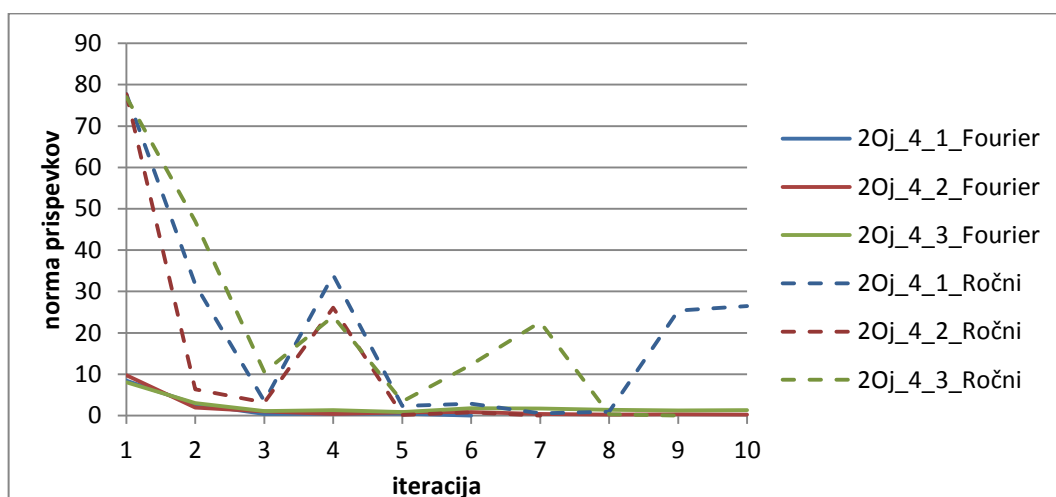
Preglednica 57: Primerjava nosilnosti pločevin 2Oj_4

oznaka	nosilnost pločevine Fourier	razlika od EC	oznaka	nosilnost pločevine Ročni	razlika od EC
2Oj_4_1	0,752	17,7	2Oj_4_1	0,764	16,4
2Oj_4_2	0,719	15,4	2Oj_4_2	0,725	14,7
2Oj_4_3	0,805	14,3	2Oj_4_3	0,813	13,4

Razlika med nosilnostmi obeh načinov zapisa nastavkov je majhna (Slika 46). Kljub spreminjanju norme prispevkov uteži nastavkov med iteracijami se nosilnost po drugem oz. tretjem iteracijskem koraku umiri.



Slika 46: Faktorji nosilnosti po iteracijah za pločevine 2Oj_4



Slika 47: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevin 2Oj_4

Krivulje standardne deviacije z naraščanjem števila iteracijskih korakov konvergirajo k vrednosti blizu 0. Za razliko od primera pločevin 2Oj_3, kjer je bila najnižja vrednost standardne deviacije v drugem iteracijskem koraku, pri pločevinah 2Oj_4 najnižjo vrednost dosežemo v zadnjem koraku. To pomeni, da se oblika najbolj neugodne nepopolnosti pločevine z iteracijami vedno bolj približuje deformacijski obliki konstrukcije.

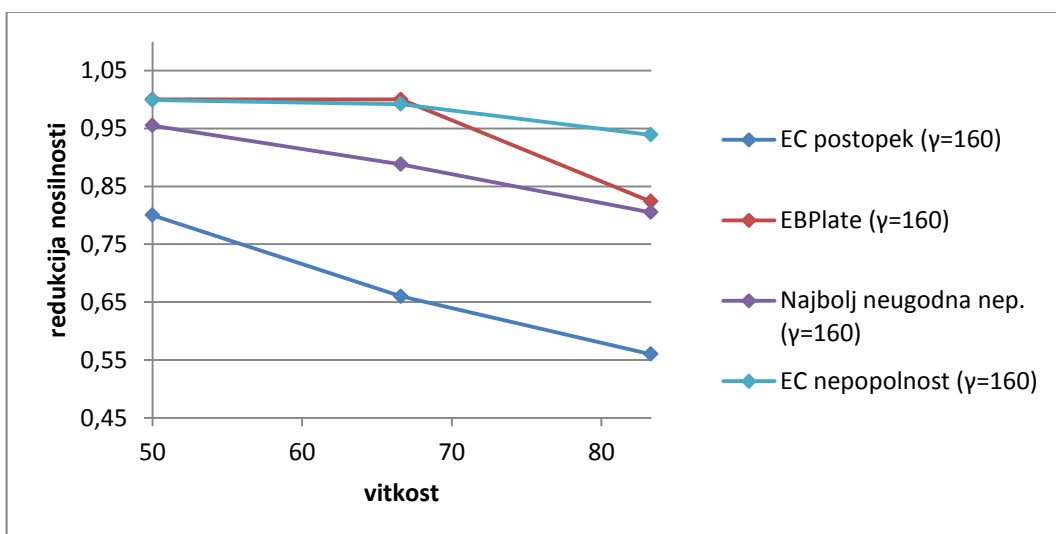
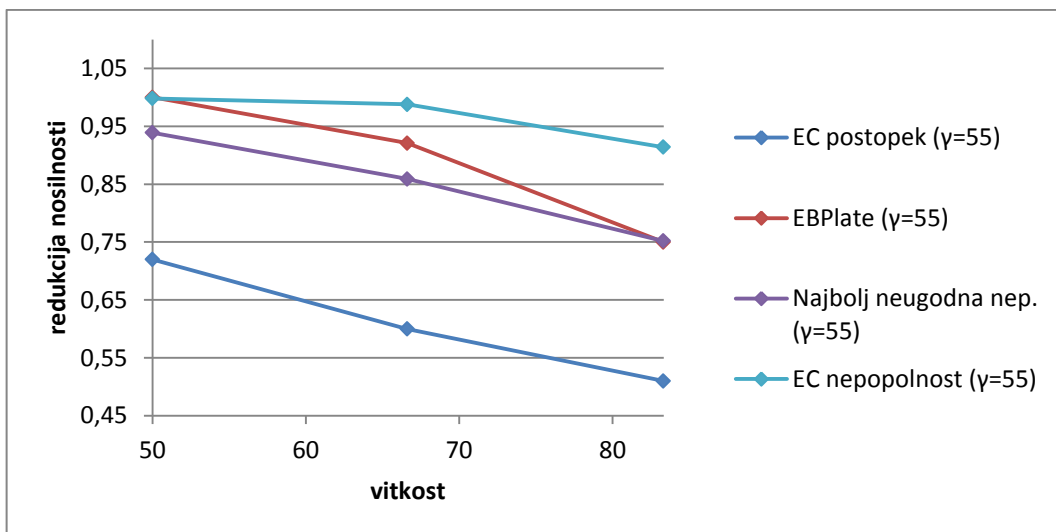
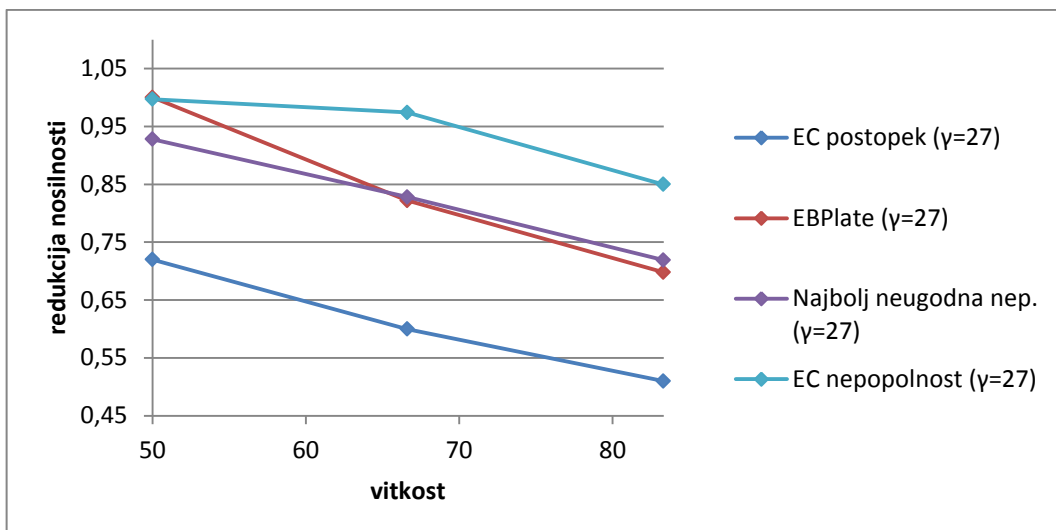
5.3.2.5 Primerjava faktorja nosilnosti

Tako kot v primeru ene ojačitve smo tudi v primeru dveh naredili primerjavo različnih načinov izrednotenja redukcijskih faktorjev (Preglednica 58). Razlika faktorjev nosilnosti iz EC postopka in EBPlate-a nastane zaradi enačb, ki so podane v priložniku za dimenzioniranje po standardu Evrokod, kot smo pojasnili že pri primeru ene vzdolžne ojačitve. Največjo razliko med nosilnostjo pločevine z najbolj neugodno nepopolnostjo in EBPlate-om zaznamo v primeru 2Oj_3_3 in znaša 11,2%. V ostalih primerih so razlike manjše, kar lahko razločno vidimo tudi iz grafov spreminjanja redukcijskih faktorjev nosilnosti glede na vitkost podpanelov pločevine za posamezno togost vzdolžnih ojačitev (Slika 48).

Preglednica 58: Primerjave nosilnosti vseh obravnavanih primerov pločevin 2Oj

	vitkost	togost	Najbolj neugodna nepopolnost	EC postopek	EBPlate	EC nepopolnost
2Oj_2_1	50	55,2	0,94	0,72	1,00	1,00
2Oj_2_2	50	27,6	0,93	0,69	1,00	1,00
2Oj_2_3	50	165,5	0,96	0,80	1,00	1,00
2Oj_3_1	66,6	54,5	0,86	0,60	0,92	0,99
2Oj_3_2	66,6	27,2	0,83	0,57	0,82	0,97
2Oj_3_3	66,6	163,3	0,89	0,66	1,00	0,99
2Oj_4_1	83,3	53,8	0,75	0,51	0,75	0,91
2Oj_4_2	83,3	26,9	0,72	0,49	0,70	0,85
2Oj_4_3	83,3	161,3	0,81	0,56	0,82	0,94

Na spodnjih grafih (Slika 48) lahko razločno vidimo, da z večanjem togosti vzdolžnih ojačitev odstopanje med redukcijo najbolj neugodne začetne nepopolnosti in redukcijo EBPlate narašča. Rdeča krivulja (EBPlate) se z večanjem togosti približuje svetlo modri krivulji (EC nepopolnost). Vrednost redukcije iz analiz najbolj neugodne nepopolnosti (vijolična krivulja) z večanjem vitkosti podpanela linearno pada, medtem ko pri ostalih analizah padec ni povsem linearen.



Slika 48: Grafičen prikaz redukcijskih faktorjev v odvisnosti od vitkosti podpanela za 10j

5.3.3 Analiza pločevin s štirimi vzdolžnimi ojačitvami

V preglednici (Preglednica 59) so zbrane vrednosti redukcije strižne nosilnosti vzdolžno ojačanih pločevin, kot to določa Evrokod. Pločevin 4Oj_1 v nadaljnjih analizah nismo upoštevali, saj redukcije strižne nosilnosti po postopku Evrokod ni. Poleg tega je določanje najbolj neugodne oblike nepopolnosti take pločevine nesmiselno, saj pri kakršnikoli obliki nepopolnosti do redukcije nosilnosti ne pride. V tem primeru se oblika iz koraka v korak močno spreminja (velike vrednosti norm prispevkov uteži nastavkov).

Preglednica 59: Redukcija strižne nosilnosti po Evrokodu za pločevine s štirimi ojačitvami

	oznaka pločevine	χ_w	nadaljnje analize
1	4Oj_1_1	1,00	NE
	4Oj_1_2	1,00	NE
	4Oj_1_3	1,00	NE
2	4Oj_2_1	0,86	DA
	4Oj_2_2	0,72	DA
	4Oj_2_3	0,99	DA
3	4Oj_3_1	0,69	DA
	4Oj_3_2	0,59	DA
	4Oj_3_3	0,75	DA

5.3.3.1 Pločevine 4Oj_2

Gostoto mreže končnih elementov smo morali v nekaterih primerih zaradi prezahtevnosti računa zmanjšati, tako da smo v vzdolžni smeri pločevine definirali dvajset končnih elementov ($n_x=20$). V vzdolžni smeri smo število končnih elementov $n_y=40$ pustili nespremenjeno. Pri tem se nosilnost pločevine ne spremeni veliko, kot smo pokazali v občutljivostni analizi pločevine s štirimi ojačitvami (Preglednica 25).

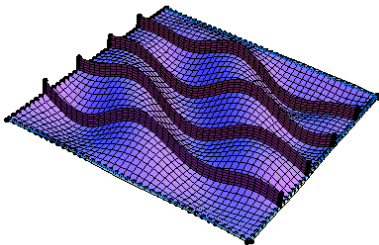
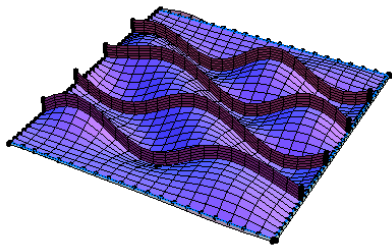
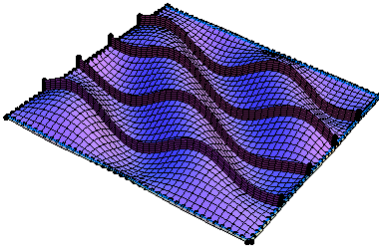
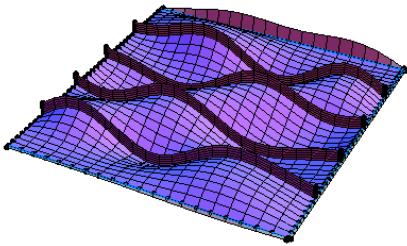
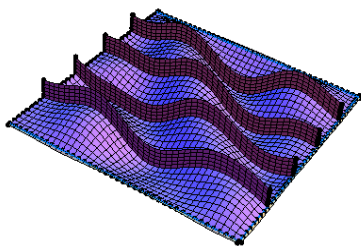
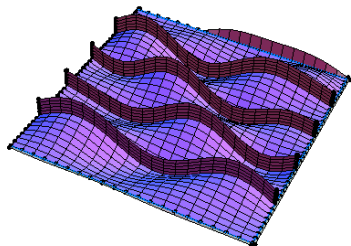
Preglednica 60: Pločevine 4Oj_2

B [cm]	t [cm]	b/t	I_p [cm ⁴]	H_{st} [cm]	T_{st} [cm]	I_{st} [cm ⁴]	γ	oznaka
300	1	60	27,47	16,90	1,69	1736,31	63,20	4Oj_2_1
				13,70	1,37	868,16	31,60	4Oj_2_2
				23,68	2,37	5208,93	189,61	4Oj_2_3

Najbolj neugodne oblike nepopolnosti nekaterih primerov izkazujejo izredno nenavadno obliko. Izbočitev v obliki diagonale nastane v ravno obratni smeri kot v vseh do sedaj obravnavanih problemih. Izvor izbočitve na mestu koncentriranih napetosti si znamo razložiti (pločevine z eno in dvema vzdolžnima ojačitvama; Preglednica 33 in Preglednica 43). Kakšen pa je razlog za nastanek diagonale na mestu tlačnih napetosti pa si ne znamo pojasniti. Primere pločevin z ročnimi nastavki smo definirali z redkejšo mrežo, saj je bil račun pločevine s Fourierjevimi nastavki in mrežo M40 zares dolgotrajen. Pri vseh treh togostih ojačitev pločevin s Fourierjevimi nastavki opazimo formacijo diagonalne izbočitve na mestu

tlačnih napetosti v postkritičnem stanju (Preglednica 61). V primeru ročnih nastavkov pa se v pločevini 4Oj_2_2 izbočitev tvori na mestu koncentracije nateznih napetosti. Ta pločevina ima najšibkejše vzdolžne ojačitve, kar je po našem sklepanju tudi razlog za drugačno obliko začetne nepopolnosti. Pri pločevini 4Oj_2_3 z ročnimi nastavki oblika nepopolnosti ni popolnoma jasna. Opaziti je mogoče izbočitve tako v tlačni, kot tudi v natezni smeri.

Preglednica 61: Najbolj neugodne oblike nepopolnosti pločevin 4Oj_2

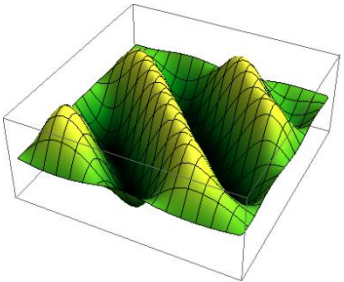
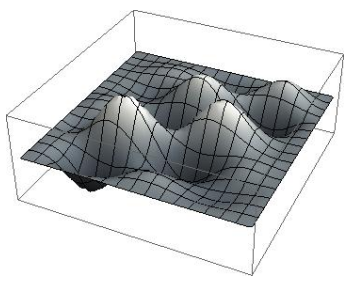
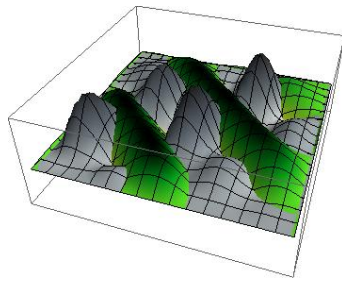
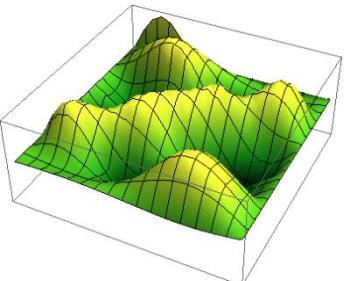
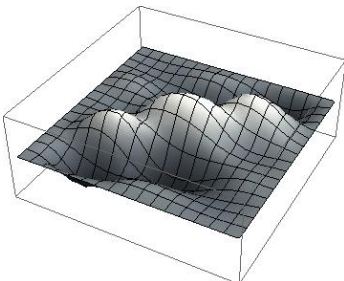
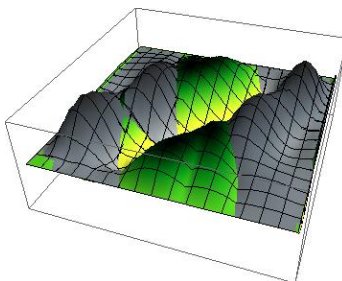
4Oj_2	Fourierjevi nastavki	Ročni nastavki
4Oj_2_1		
4Oj_2_2		
4Oj_2_3		

Same oblike najbolj neugodnih začetnih nepopolnosti smo primerjali z deformacijsko obliko (Preglednica 62). Prikazali smo primerjavo pločevin 4Oj_2_2, ki se nam zdi najbolj zanimiva. Deformacijska oblika pločevine ojačene s štirimi ojačitvami, je za Fourierjeve nastavke drugačna kot za ročne nastavke. Formacija deformacijske oblike je odvisna od oblike nepopolnosti, kar potrjuje tudi primerjava obeh deformacijskih oblik pločevine 4Oj_2_2 (Preglednica 61 in Preglednica 62). Vidimo, da v primeru Fourierjevih nastavkov nastaneta dve diagonali nateznih napetosti, v primeru ročnih nastavkov pa ena. Ugotovimo, da k obliki deformacij prispeva začetna oblika nepopolnosti, ki pa je tudi odvisna od izbire nastavkov.

Iz primerjave normiranih vrednosti pomikov zaradi nepopolnosti in deformacij (tretji stolpec v preglednici Preglednica 62) vidimo, da pri ročnih nastavkih normirani pomiki sovpadajo. Na nekaterih mestih so višji pomiki zaradi deformacij in na nekaterih pomiki zaradi nepopolnosti. Globalna oblika je skoraj popolnoma enaka, za razliko od primera s Fourierjevimi nastavki,

kjer sta obliki popolnoma različni. Do razlik prihaja v vogalih pločevine, kjer deformacij ni, izbočitve zaradi nepopolnosti pa so.

Preglednica 62: Primerjava oblike nepopolnosti in deformacijske oblike za 4Oj_2_2

4Oj_2	Oblika nepopolnosti	Deformacijska oblika	Primerjava normiranih pomikov
4Oj_2_2_Fourier			
4Oj_2_2_Ročni			

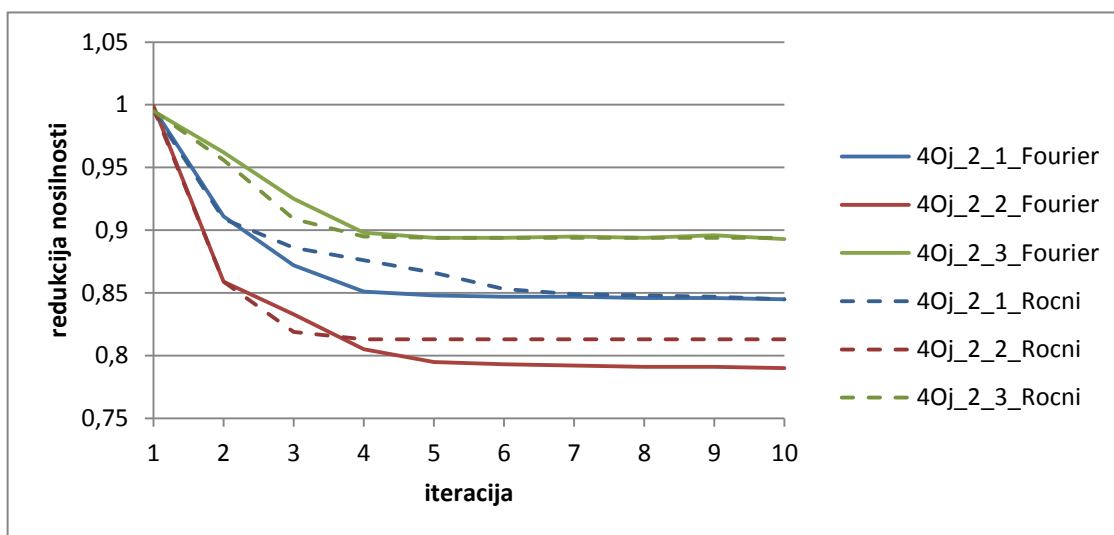
Razlika v vrednosti nosilnosti med pločevinami s Fourierjevimi oz. ročnimi nastavki pa je zelo majhna. V primeru 4Oj_2_1 razlike ni, pri 4Oj_2_2 razlika znaša 2,8% in pri 4Oj_2_3 le 0,1%. Vidimo, da do največjega odstopanja med načinoma zapisa nastavkov pride v primeru šibkejših vzdolžnih ojačitev. Posledica večje razlike pa je vsekakor tudi sama oblika začetne nepopolnosti pločevine. Pri pločevini 4Oj_2 je formacija diagonalne izbočitve različna (Preglednica 61), kjer v primeru ročnih nastavkov dobimo logično izbočenje na mestu nateznega polja. Nosilnost pločevine s tako začetno nepopolnostjo je za 2,8% višja od pločevine z začetno nepopolnostjo nerazložljive oblike (4Oj_2_2 s Fourierjevimi nastavki). Poudarili bi, da kljub popolnoma različnim oblikam najbolj neugodne začetne nepopolnosti (pločevina 4Oj_2_2, Preglednica 61), pri enakem številu nastavkov v bazi oblik, konstrukcija prenese skoraj enako obremenitev (razlika v nosilnosti je zelo majhna), kar je razvidno iz slike (Slika 49). Za ostala dva primera pločevin lahko rečemo, da oba načina opisa nastavkov ustrezata, saj je nosilnost v obeh primerih popolnoma enaka. Nosilnosti vzdolžno ojačenih pločevin najbolj neugodnih začetnih nepopolnosti (Preglednica 63) se od nosilnosti pločevin s predlagano začetno nepopolnostjo po Evrokodu zelo razlikujejo. V vseh primerih, ne glede na način zapisa nastavkov nepopolnosti, so nosilnosti po Evrokodu višje (Preglednica 63).

Na sliki (Slika 49) so prikazane krivulje spreminjanja nosilnosti pločevine skozi iteracije. Kot smo že v prejšnjem odstavku ugotovili, se vrednosti v nosilnosti zadnje, desete iteracije za posamezno pločevino glede na način zapisa nastavkov ne razlikujeta veliko. Očitna razlika je le pri pločevini 4Oj_2_2. Algoritem rešitve optimizacijskega problema v nobenem primeru ni našel v manj kot desetih iteracijskih korakih. Nosilnosti pločevin konvergirajo k neki

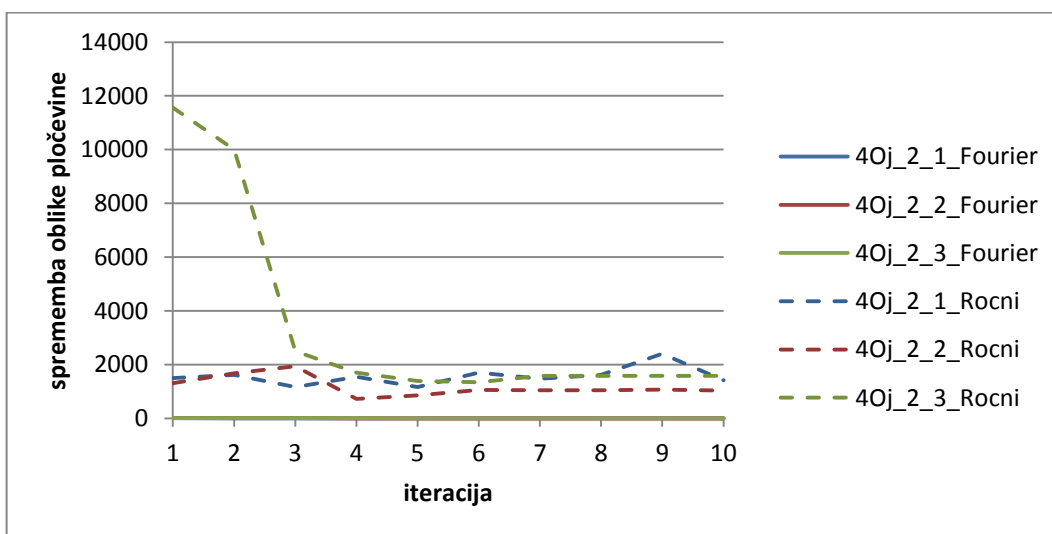
vrednosti, kar vzamemo za dovolj dober rezultat. Norma prispevkov uteži nastavkov v primeru ročnih nastavkov dosega ogromne vrednosti. V primerjavi z normami prirastkov pri Fourierjevih nastavkih so ti reda 10^3 večji. Posledica je veliko število nemerodajnih nastavkov, katerih prispevek algoritem znotraj iskanja najbolj neugodne oblike spreminja. Pri tem pa nosilnost ostaja nespremenjena.

Preglednica 63: Primerjava nosilnosti pločevin 4Oj_2

oznaka	nosilnost pločevine Fourier	razlika od EC	oznaka	nosilnost pločevine Ročni	razlika od EC
4Oj_3_1	0,845	15,3	4Oj_3_1	0,845	15,3
4Oj_3_2	0,79	20,6	4Oj_3_2	0,813	18,3
1Oj_3_3	0,893	10,5	4Oj_3_3	0,894	10,4



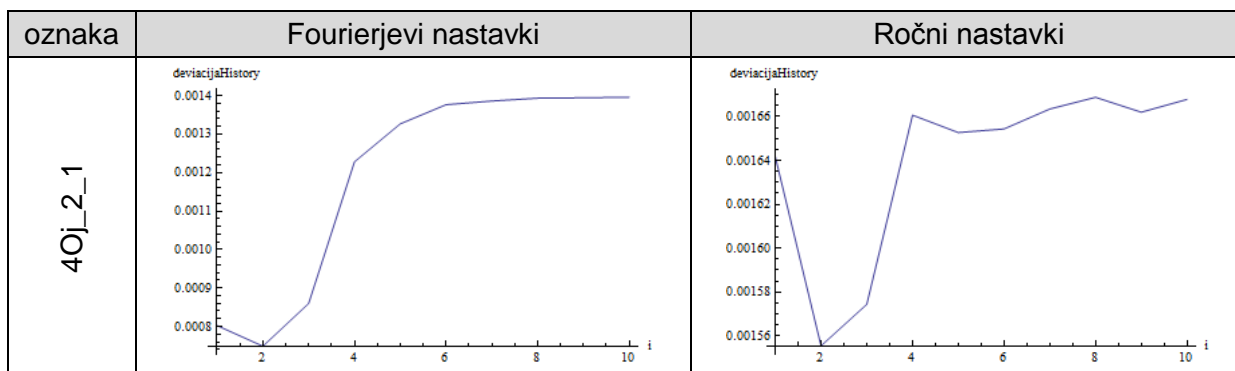
Slika 49: Faktorji nosilnosti po iteracijah za pločevine 4Oj_2



Slika 50: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevin 4Oj_2

Iz preglednice (Preglednica 63) je razviden trend naraščanja vrednosti standardne deviacije z iteracijami. V prvi iteraciji smo podali neko začetno nepopolnost, ki ni najbolj neugodna. Vemo, da oblika te nepopolnosti ni podobna rezultatu najbolj neugodne oblike začetne nepopolnosti (Preglednica 61), kjer se formira diagonala v ravno obratni smeri kot natezno polje. Najnižjo vrednost standardne deviacije dosežemo v drugi iteraciji, kjer oblika nepopolnosti sledi formaciji natezne diagonale. V nadaljnjih korakih pa neugodna nepopolnost spremeni svojo geometrijo (diagonala v nerazumljivi smeri) in povečajo se vrednosti standardne deviacije. V primerih ostalih pločevin (predvsem primeri z eno in dvema vzdolžnima ojačitvama), vrednost standardne deviacije z iteracijami pade in se ustavi na neki vrednosti. Primerjava vrednosti standardnih deviacij različnih primerov pokaže, da so vrednosti v primeru štirih ojačitev višje kot v primeru ene ali dveh ojačitev. Višje vrednosti so posledica formacije izbočitve (oblika najbolj neugodne začetne nepopolnosti) v smeri tlačnih napetosti, ki ne sovpada z deformacijsko obliko.

Preglednica 64: Standardna deviacija oblike po iteracijah za 4Oj_2_1



5.3.3.2 Pločevine 4Oj_3

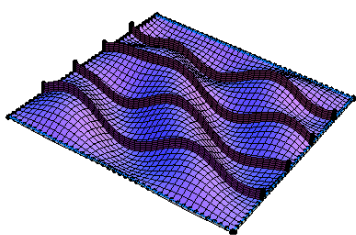
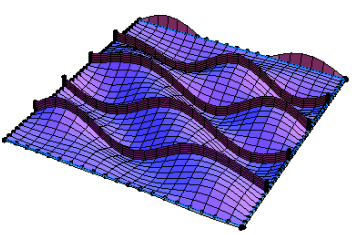
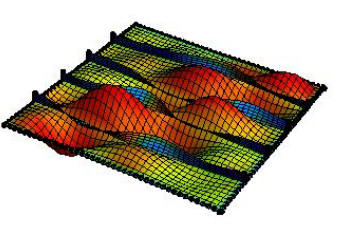
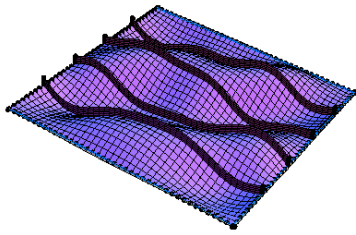
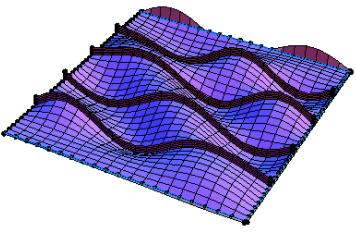
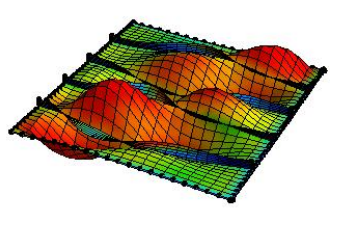
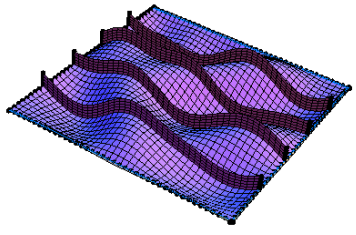
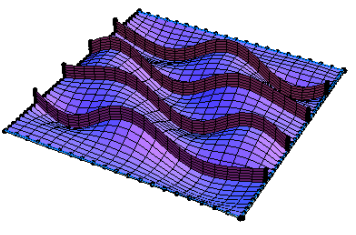
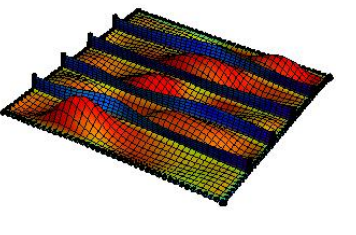
Preglednica 65: Pločevine 4Oj_3

B [cm]	t [cm]	b/t	I_p [cm ⁴]	H_{st} [cm]	T_{st} [cm]	I_{st} [cm ⁴]	γ	oznaka
400	1	80	36,63	18,30	1,83	2251,72	61,47	4Oj_3_1
				14,81	1,48	1125,86	30,74	4Oj_3_2
				25,63	2,56	6755,16	184,42	4Oj_3_3

Oblika najbolj neugodnih nepopolnosti (Preglednica 66) je v nekaterih primerih spet nerazložljiva. V vseh treh primerih pločevin z ročnimi nastavki se formira diagonala izbočenja v smeri tlačnih napetosti. Za primer 4Oj_3_1 lahko rečemo, da najbolj neugodni oblikii sovpadata, za ostala primera pa ne. Za razliko od pločevin 4Oj_2 dobimo razumljivejše oblike v primeru Fourierjevih nastavkov (diagonala v smeri nateznih napetosti). V preglednico (Preglednica 66) smo v desni stolpec dodali grafiko misesovih napetosti na deformirani pločevini za Fourierjeve nastavke. Za pločevine z ročnimi nastavki je deformacijska oblika

podobna, zato teh oblik posebej nismo prikazali. Oblike deformirane pločevine in misesovih napetosti sta v primeru ročnih oz. Fourierjevih nastavkov podobni. Izbira začetne oblike nepopolnosti vpliva na razporeditev napetosti tudi v postkritičnem stanju, poleg tega pa vpliva tudi na obliko deformacij. Bolj ko je konstrukcija občutljiva na izbiro oblike začetne nepopolnosti, večji bo imela nepopolnost vpliv na deformacijsko obliko. Posebej nazoren primer je pločevina 4Oj_2_2 (Preglednica 61), kjer je deformacijska oblika pri pločevini z ročnimi nastavki bistveno drugačna od tiste s Fourierjevimi nastavki. Različni pa sta tudi začetni nepopolnosti konstrukcije (Preglednica 62).

Preglednica 66: Grafičen prikaz najbolj neugodnih oblik nepopolnosti za 4Oj_3

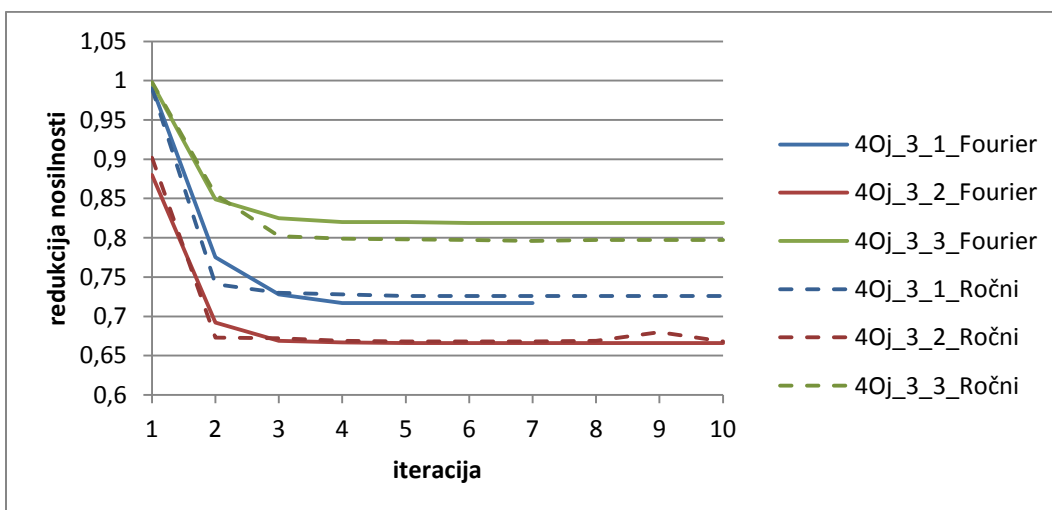
	Fourierjevi nastavki	Ročni nastavki	Misesove napetosti
4Oj_3_1			
4Oj_3_2			
4Oj_3_3			

Nosilnost pločevin s štirimi vzdolžnimi ojačitvami glede na način zapisa nastavkov oblike najbolj neugodne začetne nepopolnosti je prikazana na sliki (Slika 51). Kljub zelo različnim oblikam nepopolnosti, so nosilnosti pločevin opisane z ročnim ali Fourierjevim načinom podobnega reda nastavkov. Za pločevino 4Oj_3_1 je razlika v nosilnosti 1,2%, pločevino z najšibkejšimi ojačitvami 4Oj_3_2 le 0,3% in pločevino 4Oj_3_3 2,9%. Najmanjša razlika je v tem primeru pri pločevinah z najmanjšo togostjo ojačitev. Nosilnost pločevin z najbolj neugodnimi začetnimi nepopolnostmi je precej manjša od nosilnosti pločevin s po Evrokodu priporočeno začetno nepopolnostjo (Preglednica 67). Do največjega odstopanja pride pri pločevini 4Oj_3_2, ki znaša 26,2%. Odstopanje je v obeh načinih zapisa nastavkov približno enako.

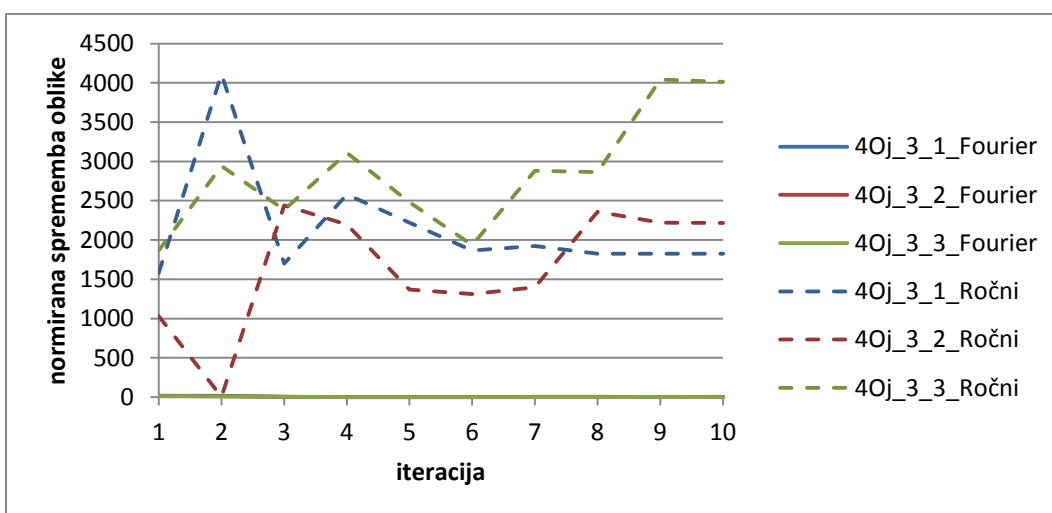
Preglednica 67: Primerjava nosilnosti pločevin 4Oj_3

oznaka	nosilnost pločevine Fourier	razlika od EC	oznaka	nosilnost pločevine Ročni	razlika od EC
4Oj_3_1	0,717	26,3	4Oj_3_1	0,726	25,4
4Oj_3_2	0,666	26,2	4Oj_3_2	0,668	25,9
4Oj_3_3	0,819	16,8	4Oj_3_3	0,796	19,1

Norme prispevkov uteži nastavkov so v primeru ročnih nastavkov, tako kot v primeru 4Oj_2 (Slika 50), velike. Zanimivo je, da skozi celoten potek reševanja optimizacijskega problema vrednosti norm nihajo. V nekaterih iteracijah so norme prispevkov celo višje od norm prispevkov prve iteracije. Pričakovali bi, da bo največja sprememba oblike v prvi iteraciji, v vseh nadaljnjih pa bodo spremembe le še manjše, oblika pa bo ostala približno enaka. Stvar je ponovno posledica spreminjanja prispevkov nemerodajnih oblik, ki, predvsem v primeru ročnih nastavkov, ne vplivajo na nosilnost konstrukcije.



Slika 51: Faktorji nosilnosti po iteracijah za pločevine 4Oj_3



Slika 52: Norma prispevkov uteži nastavkov analiz pločevin 4Oj_3

5.3.3.3 Primerjava faktorja nosilnosti

Naredili pa smo vse primerjave tako kot v primerih 1Oj in 2Oj. V prejšnjih primerih smo opazili, da je z EC postopkom vedno merodajna globalna relativna vitkost, ki je glede na vitkost izračunano s kritično strižno napetostjo iz EBPlate-a veliko večja. Zaradi tega pride do večjih redukcij nosilnosti po EC postopku. V primeru štirih ojačitev pa je zaradi velike togosti ojačitev lokalna relativna vitkost po Evrokodu v vseh primerih višja od globalne (Preglednica 68). Pri enakih dimenzijah podpanelov je zaradi tega redukcija nosilnosti enaka, saj v vseh primerih prevladuje enaka lokalna relativna vitkost. EBPlate izračuna globalno vitkost, ki je nižja od lokalne relativne vitkosti podpanelov, izračunane po EC postopku. Zato je v primerih z največjo togostjo vzdolžnih ojačitev redukcija po EBPlate nižja od redukcije po EC postopku. Pri majhnih togostih pa se zgodi enako kot v primeru z eno ali dvema ojačitvama, ko je bila po EC merodajna globalna vitkost, ki je bila večja od vitkosti iz vrednotene iz rezultata EBPlate.

Preglednica 68: Primerjave nosilnosti vseh obravnavanih primerov pločevin 4Oj

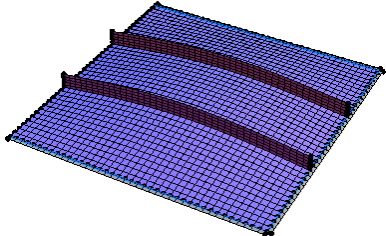
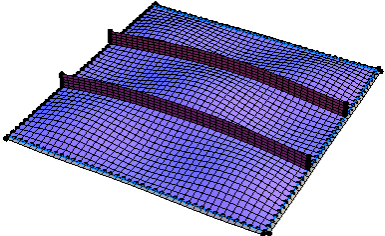
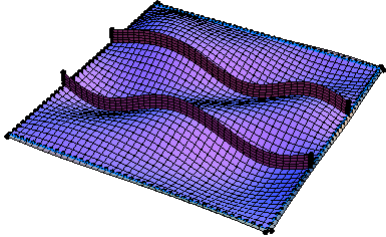
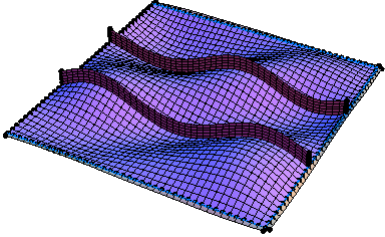
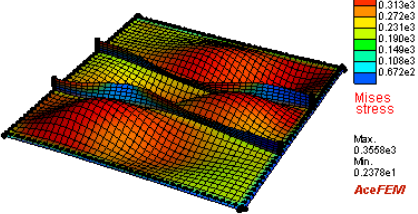
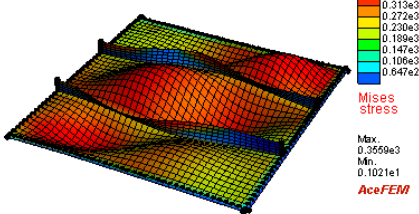
	vitkost	togost	Najbolj neugodna nepopolnost	EC postopek	EBPlate	EC nepopolnost
4Oj_2_1	60	63,2	0,85	0,99	1,00	1,00
4Oj_2_2	60	31,6	0,79	0,99	0,87	1,00
4Oj_2_3	60	189,6	0,89	0,99	1,00	1,00
4Oj_3_1	80	61,5	0,72	0,75	0,76	0,97
4Oj_3_2	80	30,7	0,67	0,75	0,70	0,90
4Oj_3_3	80	184,4	0,82	0,75	0,98	0,98

5.4 Izbira začetne nepopolnosti v prvem iteracijskem koraku strižno obremenjenih pločevin

Kako pomembna je izbira začetne nepopolnosti pokaže enostaven primer pločevine, kjer smo za dve analizi določili različni začetni nepopolnosti pločevine. Referenčna pločevina je pločevina 2Oj_3_3. V prvem primeru smo za nepopolnost izbrali le prvo globalno obliko iz baze oblik (en polval v vzdolžni in prečni smeri pločevine). Pri drugi analizi pa smo nepopolnost določili po predlogu standarda Evrokod (kombinacija globalne in lokalne oblike nepopolnosti). Primerjali smo obtežna faktorja, razpored Misesovih napetosti in najbolj neugodno nepopolnost pri vsaki izmed analiz. Najbolj neugodna oblika nepopolnosti predstavlja rešitev optimizacijskega problema v desetem iteracijskem koraku. Oblika najbolj neugodne nepopolnosti in razpored Misesovih napetosti (Preglednica 69) se med analizama precej razlikujeta. Oblika najbolj neugodne začetne nepopolnosti se med primeroma razlikuje v številu diagonalnih izbočitev. Koncentracije nateznih napetosti se v primeru B oblikujejo v eno diagonalo, medtem ko se v primeru A formirajo v dve diagonali. Vidimo, da ima izbira začetne nepopolnosti v prvem iteracijskem koraku zelo velik vpliv na rešitev optimizacijskega problema, ki predstavlja iskanje najbolj neugodne oblike nepopolnosti. Deformacijska oblika

pa je predvsem odvisna od začetne nepopolnosti konstrukcije. Faktor nosilnosti najbolj neugodne oblike pločevine, kjer smo za začetno nepopolnost v prvi iteraciji izbrali nepopolnost iz standarda Evrokod, je manjši od faktorja nosilnosti iz primera A. Razlika znaša 1,5%.

Preglednica 69: Primerjava oblik in faktorjev nosilnosti za različno izbiro začetne nepopolnosti

	A	B
	$\Gamma_0 = \Gamma_G$	$\Gamma_0 = \Gamma_G + 0,7 * \Gamma_L$
Začetna oblika nepopolnosti		
Najbolj neugodna oblika nepopolnosti		
Faktor nosilnosti	0,826	0,813
Razpored Misesovih napetosti		

5.5 Vpliv omejitve ukrivljenosti na obliko nepopolnosti in faktor nosilnosti

S povečanjem največje dovoljene ukrivljenosti najbolj neugodne oblike pločevine smo omogočili večjo nagubanost pločevine. Pri tem smo omejitve največje amplitude definirali s predlogom iz standarda. V vsaki točki moramo zadostiti obema omejitvama. Ukrivljenosti pločevine smo se posvetili že v poglavju 4.2, na katerega se nanašamo s poimenovanjem in označevanjem krivulj in ukrivljenosti. V izvedenih analizah, kjer smo ukrivljenost omejili z oranžno krivuljo (vrh amplitude nepopolnosti na $\frac{1}{4}$ širine panela), smo zaznali velik padec faktorja nosilnosti v primerjavi s pločevino z EC nepopolnostjo. Dodatno smo naredili še študijo vpliva omejitve ukrivljenosti na redukcijo faktorja nosilnosti na pločevini 2Oj_3_3, kjer je bilo odstopanje med nosilnostjo pločevine z najbolj neugodno in EC nepopolnostjo največje (15%). Za začetno vrednost ukrivljenosti smo izbrali ukrivljenost sinusne krivulje κ_{05} z

vrhom na $\frac{1}{2}$ širine panela (modra krivulja). Največjo dovoljeno ukrivljenost nepopolne pločevine smo postopoma povečevali do vrednosti oranžne krivulje $\kappa_{0,25}$. Določili smo 10% inkrement večanja, ki smo ga izračunali iz razlike $\kappa_{0,25} - \kappa_{0,5}$.

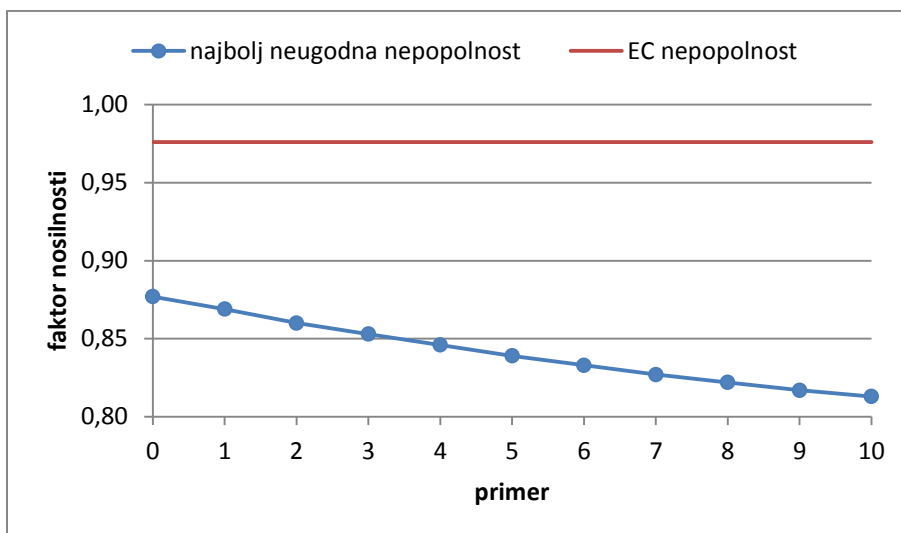
Z obliko nepopolnosti, ki je predlagana v standardu Evrokod, smo opisali začetno obliko nepopolnosti. Največjo dovoljeno amplitudo nepopolnosti smo v vseh analizah omejili z enako vrednostjo po enačbi (21), ki za obravnavano pločevino znaša $e_{0,max}=7,33$ mm. Vrednost največje dovoljene ukrivljenosti $\kappa_{0,max}$ smo postopoma povečevali do vrednosti $\kappa_{0,25}=1,228 \cdot 10^{-4}$ mm⁻¹. Vrednosti e_0 in κ_0 sta največji doseženi vrednosti amplitude in ukrivljenosti najbolj neugodne oblike nepopolnosti. Rezultati desetih analiz pokažejo (Preglednica 70), da ima na obliko nepopolnosti in faktor nosilnosti večji vpliv omejitev ukrivljenosti pločevine. Vrednosti največjih ukrivljenosti nepopolne pločevine vedno dosežejo omejitev ukrivljenosti, medtem ko omejitve amplitude vedno ne dosežemo. V primerih, kjer je ukrivljenost strogo omejena (dopuščena majhna ukrivljenost), v primeru 0 največja amplituda doseže le 75% največje dovoljene. Ko omejitev ukrivljenosti postopoma višamo in nepopolna pločevina lahko doseže višje amplitude, postane merodajna tudi omejitev največje dovoljene amplitude. Iz preglednice vidimo, da sta v primeru 5 doseženi obe omejitvi največjih amplitud in ukrivljenosti. V tem primeru je omejitev ukrivljenosti ravno na polovici med vrednostima modre (sinus) in oranžne krivulje (najbolj neugoden izmaknjeni sinus z vrhom na $\frac{1}{4}$ širine panela).

Preglednica 70: Amplitude nepopolnosti in ukrivljenosti nepopolni pločevin ter sprememba faktorja nosilnosti

	$e_{0,max}$ [mm]	$\kappa_{0,max}$ [1/mm*10 ⁴]	e_0	κ_0 [1/mm*10 ⁴]	faktor nosilnosti	sprememba [%]
EC	7,33	0,64	7,33	0,64	0,976	0,00
0	7,33	0,64	5,54	0,64	0,877	10,14
1		0,70	5,70	0,70	0,869	10,96
2		0,77	5,70	0,77	0,860	11,89
3		0,83	6,45	0,83	0,853	12,60
4		0,90	6,98	0,90	0,846	13,32
5		0,96	7,33	0,96	0,839	14,04
6		1,03	7,33	1,03	0,833	14,65
7		1,09	7,33	1,09	0,827	15,27
8		1,16	7,33	1,16	0,822	15,78
9		1,22	7,33	1,22	0,817	16,29
10		1,29	7,33	1,29	0,813	16,70

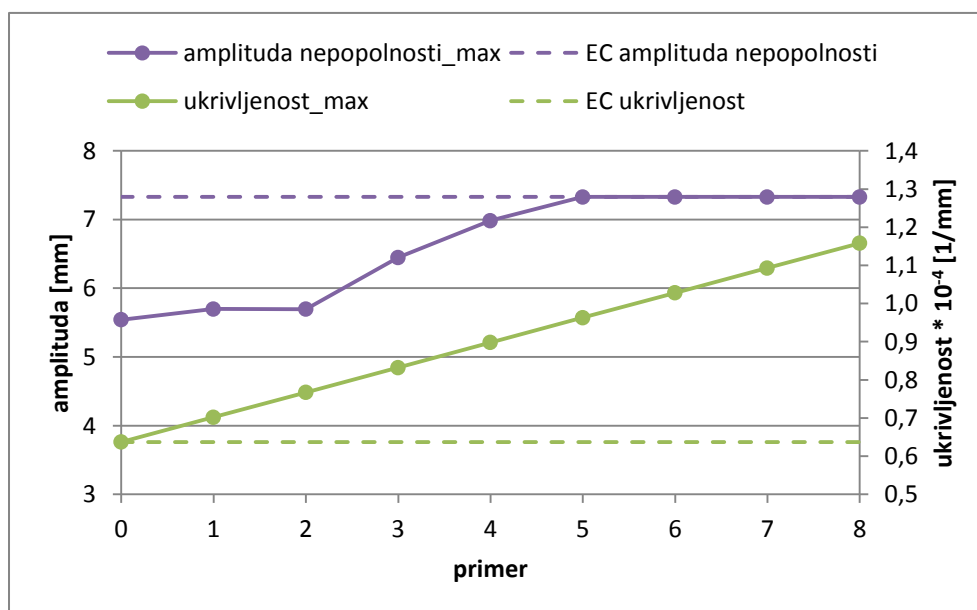
Redukcija nosilnosti pločevine je odvisna od začetne oblike, amplitud in ukrivljenosti nepopolnosti. Z večanjem dovoljenih največjih vrednosti ukrivljenosti se faktor nosilnosti ustrezno niža (Preglednica 70 in Slika 53). Razlike dveh zaporednih analiz se z večanjem ukrivljenost manjšajo in znašajo na začetku okoli 1% in v zadnjem primeru 0,4%. Faktor

nosilnosti pločevine z EC nepopolnostjo je od pločevine z najbolj neugodno obliko nepopolnosti (rešitev optimizacijskega problema-primer 0) in povsem enakimi omejitvami višji za 10%. Padec nosilnosti je posledica spremembe najbolj neugodne oblike nepopolnosti (Preglednica 71). Z večanjem dovoljene ukrivljenosti se razlika glede na faktor nosilnosti EC pločevine zmanjša še za dodatnih 6% na 16%.



Slika 53: Potek faktorja nosilnosti s spreminjanjem omejitev amplitude in ukrivljenosti

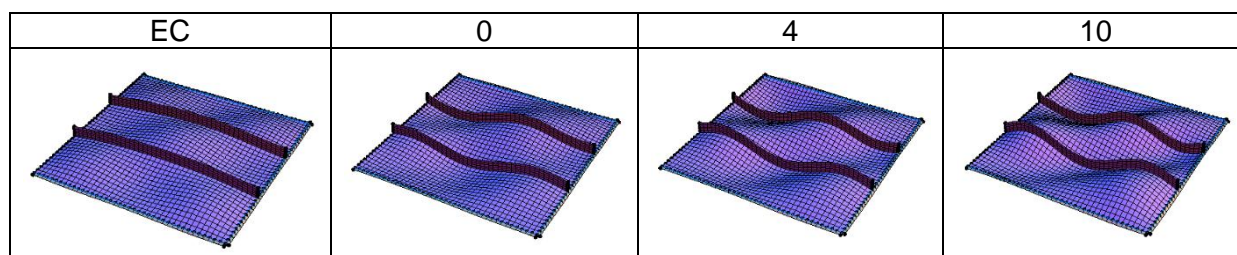
Večanje največje dovoljene ukrivljenosti med primeri poteka linearno. Omejitev največje amplitude nepopolnosti pa je za vse primere ves čas enaka (EC amplituda e_0). Dosežena ukrivljenost nepopolne pločevine κ_0 (zelena krivulja ukrivljenost_max) je v vseh primerih enaka omejitvi, največja amplituda nepopolnosti pa omejitve v vseh primerih ne doseže (primeri od 0 do 4). Vrednosti amplitud nepopolnosti in ukrivljenosti za posamezne primere so prikazane na grafu (Slika 54).



Slika 54: Omejitve amplitud nepopolnosti in ukrivljenosti po primerih 0 do 10

Oblika najbolj neugodne začetne nepopolnosti se od oblike EC nepopolnosti precej razlikuje. Optimizacija oblike nepopolnosti v vseh primerih določi obliko s povečano amplitudo na mestu koncentriranih nateznih sil v post-kritičnem stanju. Z večanjem dovoljene ukrivljenosti pri nespremenjeni največji dovoljeni amplitudi je diagonala vedno bolj izrazita (Preglednica 71). Oblike nepopolnosti na globalni ravni izgledajo enako.

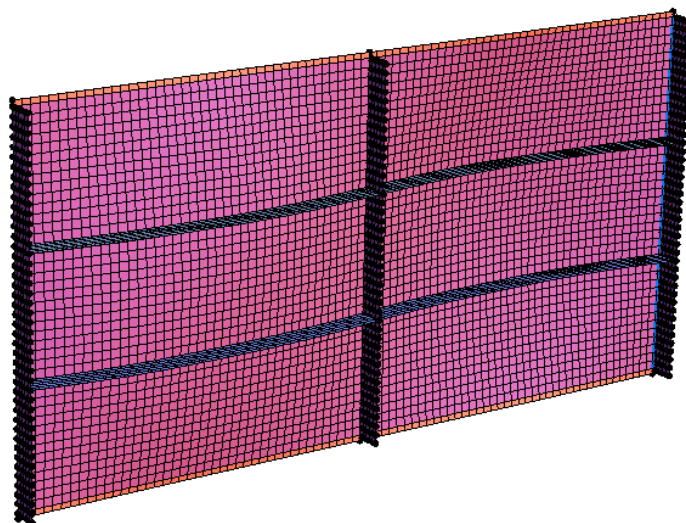
Preglednica 71: Oblike nepopolnosti



Preglednica (Priloga B; Preglednica 107) slikovno prikazuje potek ukrivljenosti okoli osi x in y najbolj neugodnih nepopolnosti pločevin. Za primerjavo je prikazana tudi ukrivljenost EC nepopolnosti, ki je v obeh smereh enaka. Zaradi spremembe oblik začetnih nepopolnosti med primeroma EC in 0 je očitna tudi razlika v poteku ukrivljenosti. Ukrivljenost okoli osi y za primera 0 in 4 spominja na obliko nepopolnosti z diagonalo na mestu nateznih napetosti. Z rdečo in vijolično barvo so prikazane največje vrednosti ukrivljenosti. Vidimo, da sta območja največjih ukrivljenosti v primerih 0 in 4 veliko večji kot v primeru 10, saj je omejitev ukrivljenosti strožji kriterij od omejitve amplitude. Zaradi tega optimizacijski algoritem obliko nepopolnosti prilagodi tako, da v čimveč vozliščih končnih elementov lahko zadosti omejitvi ukrivljenosti. V primeru 10, ko je omejitev ukrivljenosti dovolj visoka vrednost da tudi največje amplitude dosežejo omejitev, postanejo območja največjih ukrivljenosti manjša.

5.6 Praktičen primer – konzola

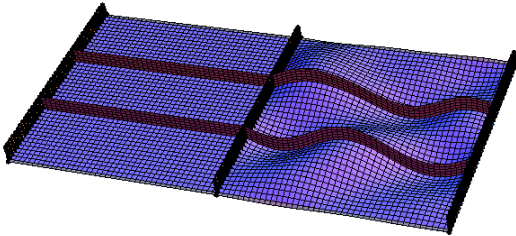
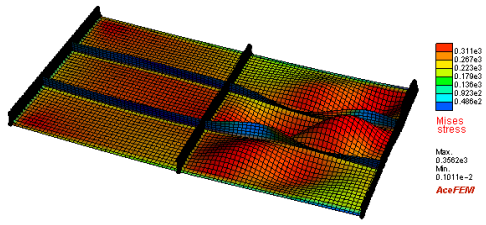
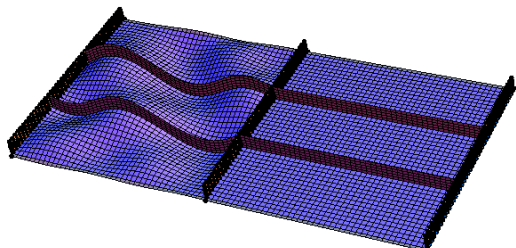
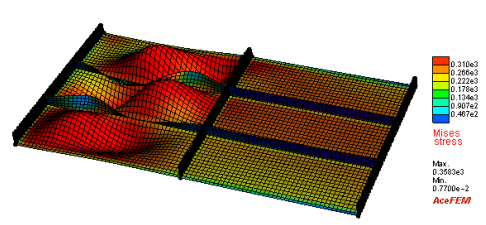
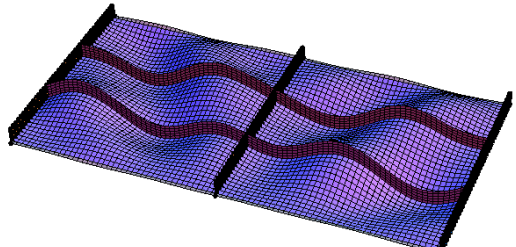
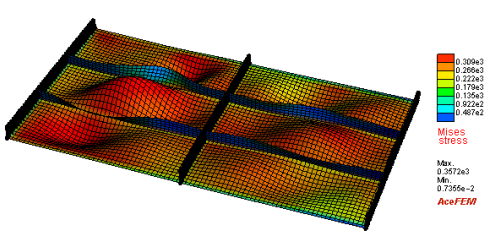
Z namenom prikaza uporabe postopka določanja najbolj neugodne začetne nepopolnosti z uporabljenim algoritmom smo naredili praktičen primer konzole, sestavljene iz dveh panelov razmerja $\alpha=1$. Izbrali smo I-profil z dvema ojačitvama togosti $\gamma=55$ in vitkosti panela $b/t=83,3$. Višina nosilca je znašala $h_w=2000$ mm in debelina $t_w=10$ mm. Pasnici prereza smo določili glede na velikost momenta, ki ga povzroči polnoplastična strižna obremenitev na prostem robu konstrukcije. Pasnici prevzamejo celotno momentno obremenitev, stojine pa strižno. Dobili smo $b_f=760$ mm in $t_f=30$ mm. Dimenzije ojačitve $b_{st}=142,8$ mm in $t_{st}=14,28$ mm. Zaradi boljšega obnašanja smo poleg bočnih podpor na robovih podpanelov definirali še prečne ojačitve enakih dimenzij kot vzdolžne ojačitve. Definirali smo mrežo končnih elementov M40 in uporabili Fourierjeve nastavke reda 5 (NFouRed=5). Naredili smo tri analize konstrukcije tako, da smo enkrat nastavke nepopolnosti definirali samo na en panel, enkrat samo na drugega, pri čemer je bil panel brez nastavkov idealne geometrije. V tretji analizi smo nastavke določili na obeh panelih. Konstrukcija je togo vpeta na skrajnem levem robu pločevine. Obtežba pa je definirana na desnem robu, ki je kontrolirana z vertikalnim pomikom zgornjega desnega vogala navzgor.



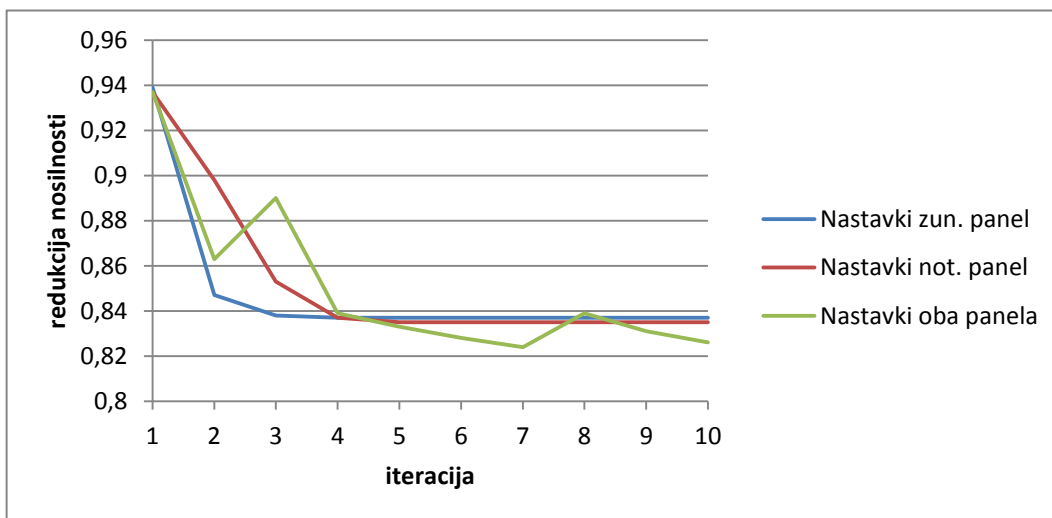
Slika 55: Geometrija konzole z dvema ojačitvama

Najbolj neugodna oblika nepopolnosti zunanjšega panela v analizi, kjer so nastavki definirani le na zunanjem panelu, je podobna oblikam nepopolnosti, ki smo jih dobili iz analiz enega samega s strigom obremenjenega panela z dvema ojačitvama (Preglednica 51). Na mestu koncentriranih nateznih sil v postkritičnem satnju, zaradi rotacije nateznega polja, pride do izbočenja pločevine (deformacijska oblika). V preglednici (Preglednica 72) sta prikazani na levi oblika najbolj neugodne nepopolnosti in na desni deformacijska oblika konstrukcije z misesovimi napetostmi. Mesto izbočenja v obeh primerih sovpada. Ko pa govorimo o notranjem panelu, na katerem so deformirani nastavki nepopolnosti, pa deformacijska oblika in oblika nepopolnosti nista enaki. Tu pride do vzajemnega delovanja strižnih in normalnih napetosti v pločevini. Zato je najbolj neugodna oblika nepopolnosti posledica različnih vplivov, za katere pa točno ne moremo vedeti kako na samo obliko nepopolnosti zares vplivajo. Zaradi normalnih napetosti v notranjem panelu se tvorita dve diagonali koncentriranih nateznih napetosti pravokotno ena na drugo. V tretji analizi z nastavki na obeh panelih je oblika nepopolnosti na vsakem panelu podobna obliki iz analiz z nastavki na samo enem panelu. Formira se po ena diagonala na vsakem panelu. Na zunanjem so koncentracije nateznih sil manjše kot v primeru z nastavki samo na zunanjem panelu. Interakcija normalnih in strižnih napetosti se kaže tudi v obliki najbolj neugodnih nepopolnosti. Zaznati je formiranje nateznih diagonal v smeri nateznih napetosti in gubanje podpanelov zaradi normalnih napetosti.

Preglednica 72: Preglednica najbolj neugodnih oblik nepopolnosti in misesovih napetosti

	Najbolj neugodna oblika nepopolnosti	Misesove napetosti na deformirani obliki
Nastavki zun. panel		
Nastavki not. panel		
Nastavki oba panela		

Zanimivo pa je, da se vrednost redukcije strižne nosilnosti med analizami veliko ne razlikuje. V prvi iteraciji smo določili le globalno nepopolnost pločevine. Vrednost nosilnosti med analizami pa se razlikuje za največ 2%. Redukcijski faktor strižne nosilnosti v primeru z nastavki samo na zunanem panelu je 0,837, v primeru z nastavki samo na notranjem panelu 0,835 in v primeru z nastavki na obeh panelih 0,824.



Slika 56: Faktorji nosilnosti po iteracijah pri analizi konzole

5.7 Zaključek

Najbolj enugodno obliko konstrukcije dobimo s kombiniranjem različnih oblik. Z izvedenimi analizami smo želeli preveriti, kateri nastavki so za iskanje najbolj neugodnih oblik bolj primerni; Fourierjevi ali ročni. Primerjali smo oblike nepopolnosti in vrednosti redukcijskih faktorjev dobljene z različnimi nastavki.

V primeru ene vzdolžne ojačitve so bolj primerni Fourierjevi nastavki, saj je nosilnost nepopolne pločevine opisane s tovrstnimi nastavki veliko nižja od nosilnosti pločevine z ročnimi nastavki nepopolnosti (največ 8,5%). To je sicer v nasprotju z našo začetno domnevo, da bodo ročni nastavki primernejši od Fourierjevih v primeru pločevine z eno ojačitvijo. Ob enako veliki bazi oblik, nepopolnost pločevine v primeru ročnih nastavkov lahko zapišemo z večjim številom polvalov (Preglednica 19). Pri analizi pločevine z dvema vzdolžnima ojačitvama smo prišli do ugotovitve, da je zanesljivost rezultatov obeh načinov zapisa nastavkov enaka. V obeh primerih dobimo podobne oblike najbolj neugodne nepopolnosti, katerih nosilnosti se razlikujejo za največ 1,5%. Pri pločevinah s štirimi vzdolžnimi ojačitvami so same oblike nepopolnosti močno odstoale od pričakovanih oblik. Kljub temu smo za dve popolnoma različni obliki nepopolnosti (ista pločevina analizirana z različnimi nastavki) dobili primerljivo velikost faktorja nosilnosti (največje odstoanje 2,8%). Bolj smiselna je uporaba Fourierjevih nastavkov, saj za enako velikost baze oblik v primerjavi z ročnimi nastavki, definiramo oblike z večjim številom polvalov.

Deformacijska oblika strižno obremenjenih pločevin ima vedno v postkritičnem stanju na mestu koncentriranih natezних sil izbočitev. Oblika izbočitve je zaradi rotacije napetostnega polja odvisna od razmerja stranic pločevine, togosti in števila vzdolžnih ojačitev in vitkosti panela/podpanela. V primeru pločevin z eno ojačitvijo se je vedno formirala ena diagonala natezних sil, ki je potekala preko ojačitve. Izbočitev na mestu ojačitev je zaradi povečane togosti omejena. V primeru šibkih vzdolžnih ojačitev in vitkejših panelih se natezni pas tvori v obliki ene same diagonale (konstrukcija je na izbočitev pločevine bolj občutljiva), kadar pa je pločevina zaradi večjega števila ojačitev bolj toga, pa se lahko formira več natezних diagonal. V večini primerov je najbolj neugodna začetna nepopolnost podobna deformacijski obliki konstrukcije. Trditev lahko podpremo s praktičnim primerom vitke pločevine z dvema vzdolžnima ojačitvama. Če sta ojačitvi šibki, so deformacije v mejnem stanju nosilnosti koncentrirane v eni diagonalni izbočitvi, najbolj neugodna oblika nepopolnosti pa ima prav tako obliko z eno izbočitvijo na mestu diagonale koncentriranih natezних napetosti. V primeru togih ojačitev, pa se največje deformacije tvorijo v obliki dveh diagonal. Tokrat ima najbolj neugodna oblika nepopolnosti dve izbočitvi, ravno na mestih koncentriranih natezних napetosti.

Nosilnost pločevine z najbolj neugodno obliko začetne nepopolnosti je v večini primerov nižja od nosilnosti, ki jo dobimo s pomočjo programa EBPlate, Klöppel-ovih diagramov in z analizo konstrukcije z nepopolnostmi po predlogu standarda. Najnižji faktor nosilnosti dobimo v primerih pločevin z največjo lokalno vitkostjo. Z večanjem togosti ojačitev se faktor nosilnosti povečuje. Primerjava redukcijskih faktorjev pokaže sovpadanje vrednosti Klöppel-

ovih diagramov, EBPlate-a in najbolj neugodne začetne oblike pri višjih vitkosti pločevin. Redukcije nosilnosti manj vitkih pločevin v primerjalnih analizah nismo dobili. Redukcijski faktor po Klöppelovih diagramih in redukcijski faktor izračunan iz kritične napetosti merodajne uklonske oblike konstrukcije sta v vseh primerih obravnavanih pločevin enaka. Poudariti moramo, da je obtežni faktor (delež polne plastične nosilnosti), pridobljen s postopkom prikazanim v standardu SIST EN 1993-1-5, vedno nižji (do 40%) od obtežnega faktorja pločevine z najbolj neugodno obliko nepopolnosti.

Ker sodobno gradeništvo stremi k čimvečji optimizaciji svojih produktov, želimo konstrukcijo glede na obremenitev optimalno dimenzionirati. Z upoštevanjem pogojev in postopkov za dimenzioniranje vitkih strižno obremenjenih pločevin konstrukcijo predimenzioniramo. Povečata se lastna teža in cena konstrukcije. Razultati izvedenih analiz pokažejo, da nosilnosti po Evrokodu projektiranih vitkih pločevin v najbolj neugodnem primeru dosežejo le 68% nosilnosti pločevine analizirane z najbolj neugodno začetno obliko nepopolnosti (primer 2Oj_4_1; Preglednica 58). Sicer smo ob upoštevanju standarda na zelo varni strani, vendar bi z natančnejšim numeričnim analiziranjem pločevine lahko dimenzionirali bolj optimalno. Kljub visoki zmogljivosti današnje računalniške opreme pa takšen postopek še ni primeren za vsakdanjo inženirsko uporabo.

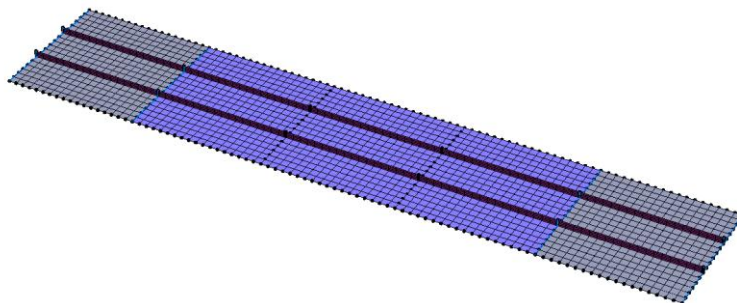
Optimizacijski problem določanja najbolj neugodne začetne nepopolnosti smo omejili na deset iteracijskih korakov, kjer je bilo potrebno v prvem koraku določiti začetno nepopolnost. Oblika najbolj neugodne nepopolnosti in nosilnost pločevine sta odvisni tudi od izbire začetnega nastavka nepopolnosti. Vpliv začetnega nastavka smo preverili na enem primeru pločevine, kjer je bilo odstopanje med nosilnostmi EC nepopolnih pločevin in pločevin z najbolj neugodno obliko največje. Začetno nepopolnost smo določili s prvo globalno obliko in kombinacijo globalne in lokalne oblike po Evrokodu. Najbolj neugodni obliki nepopolnosti sta se med analizama razlikovali, odstopanje v faktorju nosilnosti pa je znašalo 1,5%.

Standard Evrokod predpisuje le omejitev največjih amplitud nepopolnosti, ne predpisuje pa omejitev ukrivljenosti nepopolne pločevine. Z EC nepopolnostjo smo določili najnižjo omejitev ukrivljenosti. Povečanje omejitve največje dovoljene ukrivljenosti nepopolne pločevine na vrednost oranžne krivulje (poglavje 4.2) povzroči zmanjšanje faktorja nosilnost za 6%. V primerjavi z nosilnostjo pločevine z EC nepopolnostjo, se faktor nosilnosti najbolj neugodne začetne nepopolnosti enakih omejitev zniža za 10%. Ugotovili smo, da zelo ostre omejitve ukrivljenosti preprečujejo, da bi pločevina v katerikoli točki dosegla največjo dovoljeno amplitudo. Nosilnosti takih pločevin so večje. S povečanjem ukrivljenosti tudi amplitude nepopolnosti dosežejo maksimum, kjer faktor nosilnosti najbolj neugodne pločevine pade.

6 ANALIZA NAJBOLJ NEUGODNE ZAČETNE NEPOPOLNOSTI PLOČEVIN OBREMENJENIH S ČISTIM TLAKOM

6.1 Opis modela

Numerični model je sestavljen iz petih panelov enakih dimenzij. Razlog za tako odločitev je v postopnem nanosu obtežbe na model. Če bi vso tlačno linijsko obtežbo hkrati vnesli v en sam rob, bi do porušitve prišlo v robnem panelu. Nastavki oblik so definirani na srednjih treh panelih, robna dva panela sta idealne geometrije brez začetnih nepopolnosti. Tako preprečimo formacijo nemerodajnega porušnega mehanizma v robnih panelih. Konstrukcija je izven ravnine podprta v vseh vzdolžnih končnih elementov na robovih panelov. V svoji ravnini pa je podprta v vseh smereh (Slika 57). Prikazana je konstrukcija z dvema vzdolžnima ojačitvama in razmerjem stranic $\alpha=1$.



Slika 57: Numerični tlačni model konstrukcije

6.2 Nastavki

Fourierjevi in ročni nastavki so podrobneje opisani že v poglavju 3.7, v primeru tlaka pa smo dodali še t.i. kontinuirane ročne nastavke. Ti nastavki so podobni ročnim, le da so oblike kot take definirane na vseh treh panelih in ne za vsak panel posebej. Razlog za to so računske omejitve optimizacijske metode, ki dobro kombinira do 50 nastavkov v bazi oblik. Pri ročnih nastavkih smo za vsak panel (srednji trije paneli, na katere definiramo nastavke) zapisali določeno število nastavkov. T.j., če smo izbrali število polvalov v vzdolžni smeri $NGlobObl=3$, imamo na enem panelu 18 nastavkov (Preglednica 1). Če ima določen nastavek na meji s srednjim panelom izboklino (pozitivna koordinata z), želimo, da ima srednji panel na meji s prvim panelom vboklino (negativna koordinata z). Zaradi tega smo morali za vsak panel definirati svoje nastavke. V primeru $NGlobObl=3$ imamo pri ročnih nastavkih vseh skupaj 54 nastavkov v bazi oblik samo za nepopolnost osnovne pločevine. V primeru kontinuirnih nastavkov območje definicije nastavkov razširimo na vse tri panele. S tem avtomatično zajamemo zvezen potek vboklin in izboklin med paneli kar odločno zmanjša število nastavkov v bazi oblik. Zaradi tega je reševanje optimizacijskega problema ob predvideni enaki učinkovitosti časovno manj zamudno oz. nasploh izvedljivo.

Dodatno smo definirali še nepopolnosti samih vzdolžnih ojačitev, česar v primeru striga nismo upoštevali. Zajeli smo vse vzdolžne ojačitve na konstrukciji, ki smo jim pripisali nepopolnost v obliki sinusnih krivulj. Na posamezni ojačitvi smo upoštevali več možnih

primerov nepopolnosti. Število nastavkov je odvisno od števila polvalov, ki je označeno z imenom NOBJ. Ojačitev je lahko nepopolna le na zgornjem ali le na spodnjem robu. Možno je da je izbočena na obeh robovih v isto ali pa v različno smer. To pomeni, da imamo v primeru NOBJ=1 za vsako ojačitev definiranih 4 nastavkov. V občutljivostnih analizah in v parametričnih analizah vseh primerov pločevin smo za opis nepopolnosti vzdolžnih ojačitev vzeli tri polvalove (NOBJ=3). Nastavki za nepopolnost ojačitev se pripišejo k nastavkom za nepopolnost panelov v bazo oblik Γ .

6.3 Občutljivostna analiza

Naredili smo občutljivostno analizo zadostnega števila nastavkov v bazi oblik za učinkovito določanje najbolj neugodne oblike nepopolnosti. Spomnimo, da mora baza oblik obsegati vse oblike, ki bi utegnile prispevati k zmanjšanju nosilnosti konstrukcije. Poleg določanja števila nastavkov smo napravili še podrobno analizo vpliva gostote mreže končnih elementov na rezultat analize.

Občutljivostno analizo smo izvedli na primeru pločevine z dvema ojačitvama, vitkosti 80, togosti vzdolžnih ojačitev 25 in razmerja stranic $\alpha=1$ (Preglednica 73). Izvedba občutljivostne analize za vse primere ojačenih pločevin bi zahtevala preveč časa.

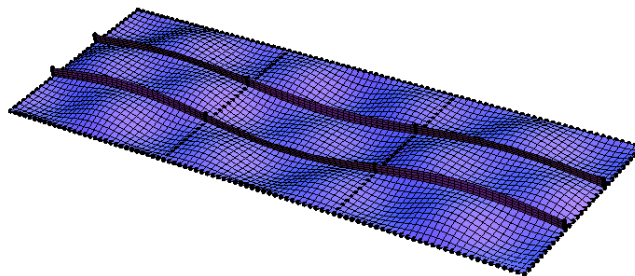
Preglednica 73: V občutljivostni analizi obravnavana pločevina

B [cm]	t [cm]	b/t	I_p [cm ⁴]	H_{st} [cm]	T_{st} [cm]	I_{st} [cm ⁴]	γ
240	1	80	21,98	11,25	1,13	549,5	25

Potrebno je bilo upoštevati omejitve ukrivljenosti in amplitude nepopolnosti. Amplitudo nepopolnosti panela smo omejili na način, kot to priporoča standard Evrokod (Preglednica 3). Omejitev ukrivljenosti pa smo določili z drugim odvodom modre krivulje na mestu največje amplitude na sredini panela/podpanela (Slika 10). Potrebno je bilo omejiti tudi največjo dovoljeno amplitudo nepopolnosti vzdolžnih ojačitev. Le ta je tudi s standardom določena in izračunana z enačbo (37):

$$e_{ost} = \frac{H}{50} \quad (37)$$

Nosilnost konstrukcije z najbolj neugodno začetno nepopolnostjo določeno z občutljivostno analizo smo primerjali z nosilnostjo nepopolne konstrukcije, ki jo priporoča Evrokod. Oblika nepopolne konstrukcije po Evrokodu je prikazana na sliki (Slika 58).

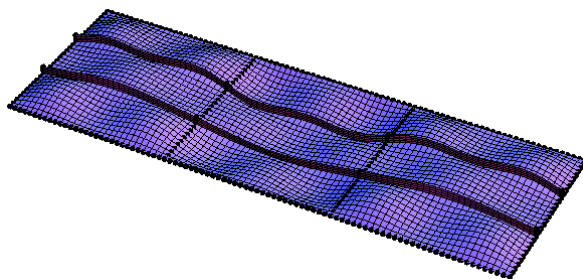


Slika 58: Priporočena oblika nepopolnosti po standardu Evrokod

6.3.1 Število Fourierjevih nastavkov

Zadostno število Fourierjevih nastavkov smo določili s primerjavo rezultatov treh analiz; z NFouRed=4, 5 ali 6. Za red oblik z vsaj štirimi polvalovi smo se odločili na podlagi rezultatov občutljivostne analize strižno obremenjenih pločevin. V teh primerih se je izkazalo, da sta reda nastavkov NFouRed=2 ali 3 slabo opisala najbolj neugodno obliko nepopolnosti, ki se je od oblik z višjim redom oblik precej razlikovala. Do velikih razlik je prihajalo tudi pri faktorju redukcije strižne nosilnosti, kjer se je padanje umirilo z nastavki reda NFouRed=4 (Slika 28). Kot smo povedali že v prejšnjem poglavju (poglavje 6.2) smo nepopolnost vzdolžnih ojačitev opisali z do tremi polvalovi (NOblOj=3).

Slika (Slika 59) prikazuje najbolj neugodno obliko nepopolnosti pločevine. Globalno se na vsakem panelu formira en polval, lokalno pa še trije polvali na vsakem podpanelu. Nepopolnost vzdolžnih ojačitev je najbolj neugodna, kadar je zgoraj in spodaj v isto smer izbočena s tremi polvalovi. Oblika nepopolnosti je precej podobna tisti, ki jo predlaga Evrokod. Srednji, preiskovani panel se vboči. Tako vbočena ojačena pločevina je manj nosilna kot izbočena, saj so ojačitve v sredinskem delu tlačno obremenjene. Ker so tudi ojačitve nepopolne in se zaradi obremenitve deformirajo izven svoje ravnine v nekem loku, tlačne napetosti povzročijo še dodatne izbočne sile. Najbolj neugodne oblike začetne nepopolnosti pločevin z NFouRed=5 in 6, so podobnih oblik kot za NFouRed=4. Razlike v obliki tudi z natančnejšim pregledom na oko ni moč opaziti.



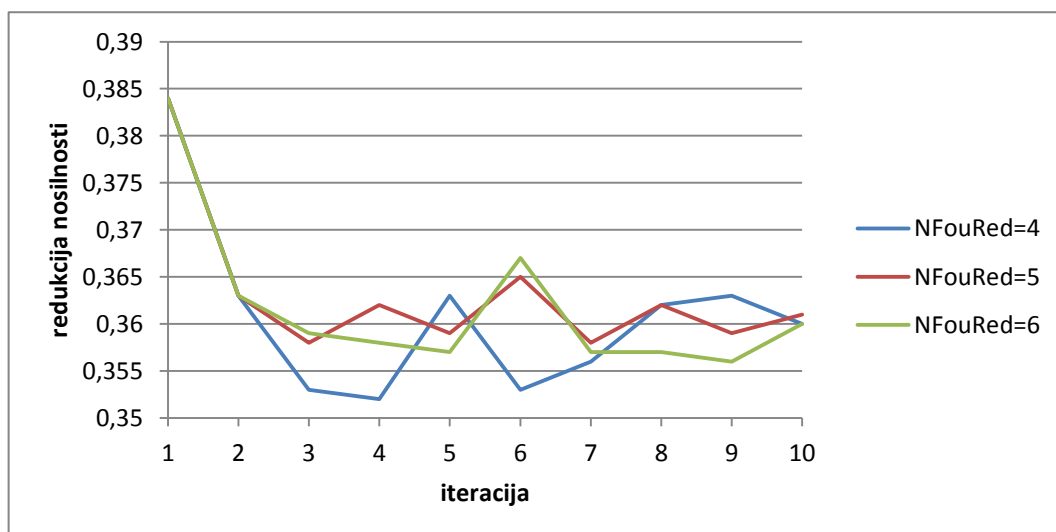
Slika 59: Najbolj neugodna oblika nepopolnosti pri NFouRed=4

Redukcije nosilnosti (Preglednica 74) se za analize z različnim številom Fourierjevih nastavkov bistveno ne razlikujejo. Razlika med nosilnostmi posameznih analiz je le 0,5%, kar je zanemarljivo malo. Vzporedno smo naredili še analizo za pločevine z nepopolnostjo po standardu Evrokod (EC nepopolnost), ki služi le za primerjavo s faktorji nosilnosti pločevin z najbolj neugodnimi začetnimi nepopolnostmi. Na podlagi izdelane občutljivostne analize bi lahko za zadostno število Fourierjevih nastavkov vzeli že nastavke reda NFouRed=4.

Preglednica 74: Število Fourierjevih nastavkov in primerjava nosilnosti

Red Fourierjevih nastavkov	Število Fourierjevih nastavkov	Red nastavkov na ojačitvah	Število nastavkov na ojačitvah	Faktor nosilnosti	Razlika od EC [%]
EC	9	1	4	0,398	/
4	16	3	12	0,352	11,6
5	25	3	12	0,358	10,1
6	36	3	12	0,356	10,6

Slika (Slika 60) prikazuje potek faktorjev nosilnosti po iteracijah za vse primere občutljivostne analize. Padec nosilnosti glede na prvo iteracijo je veliko manj izrazit kot je bil v primeru striga. Prisotno je nihanje vrednosti nosilnosti med iteracijami, ki je v primerjavi s strižnimi analizami pločevin s Fourierjevimi nastavki večje.



Slika 60: Faktorji nosilnosti po iteracijah za Fourierjeve nastavke

Vrednost norm prispevkov uteži nastavkov v nobenem primeru v desetih iteracijskih korakih ne zadosti pogoju tolerance. Parv tako ni opaziti kakršnega koli približevanja ničli. Razlog je velik numerični model s tremi paneli, na katerih so definirani nastavki. Možnost spreminjanja prispevkov posameznih nastavkov je veliko večja kot v primeru enega panela (primer striga).

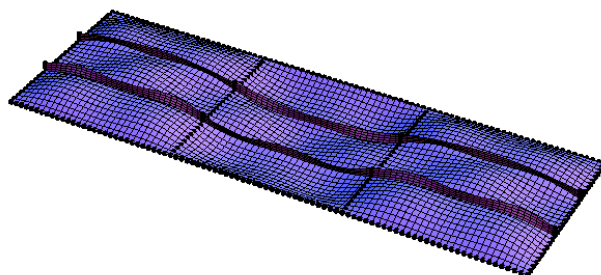
6.3.2 Število ročnih nastavkov

Občutljivostne analize z ročnimi nastavki nismo izvedli. Zaradi prevelikega števila nastavkov, ki opisujejo celotno konstrukcijo treh nepopolnih panelov in dveh idelanih robnih panelov, smo se odločili da analize z ročnimi nastavki izpustimo. Za opis nepopolnosti panelov je z enako učinkovitostjo in časovno manjšo zahtevnostjo bolj primeren način s kontinuirnimi ročnimi nastavki.

6.3.3 Število kontinuirnih ročnih nastavkov

Tako kot pri določitvi zadostnega števila Fourierjevih nastavkov smo tudi pri določitvi zadostnega števila oblik kontinuirnih ročnih nastavkov nepopolnosti v bazi oblik izvedli tri ločene analize. Število polvalov v vzdolžni smeri smo določili na podlagi primerjave računsko približno ali popolno ekvivalentnih Fourierjevih in ročnih nastavkov za dve ojačitvi (Preglednica 23). Na podlagi preglednice smo določili število kontinuirnih ročnih nastavkov $NGlobObl=3, 5$ in 6 . Velja, da je število oblik ($NGlobObl$) kontinuirnih nastavkov na enem panelu enako številu oblik ročnih nastavkov. Nepopolnost vzdolžnih ojačitev je opisana s kombinacijo oblik $NOblOj=3$.

V vseh treh analizah pločevin, kjer smo nastavke oblik nepopolnosti definirali s kontinuiranimi ročnimi nastavki, smo dobili zelo podobne rezultate. Najbolj neugodna oblika nepopolnosti je v vseh primerih izgledala enako. Če obliko nepopolnosti (Slika 61) primerjamo s sliko (Slika 59) za Fourierjeve nastavke, večjih razlik ne opazimo. Najbolj neugodna oblika nepopolnosti opisana s kontinuirnimi ročnimi nastavki je tudi zelo podobna EC nepopolnosti.



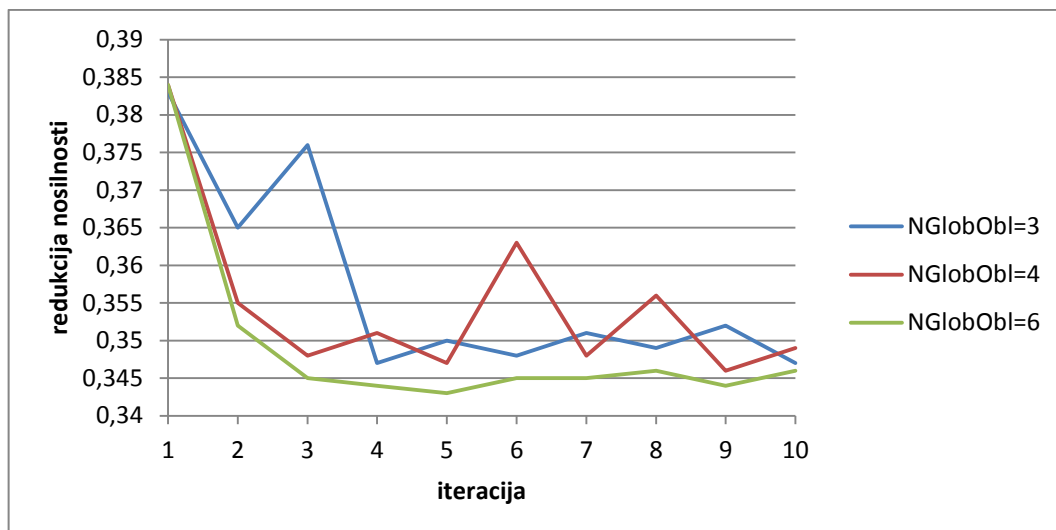
Slika 61: Primer oblike najbolj neugodne nepopolnosti pri $NGlobObl=4$

Nosilnost konstrukcije je z večanjem števila nastavkov padala. Največja razlika med analizama je znašala 0,6%.

Preglednica 75: Število kontinuirnih nastavkov in primerjava nosilnosti

Red kontinuirnih nastavkov	Število kontinuirnih nastavkov	Red nastavkov na ojačitvah	Število nastavkov na ojačitvah	Faktor nosilnosti	Razlika od EC [%]
EC	9	1	4	0,398	/
3	18	3	12	0,347	12,8
4	24	3	12	0,346	13,1
6	36	3	12	0,343	13,8

Na sliki (Slika 62) so prikazane krivulje nosilnosti po iteracijah za vse tri primere opisa oblike nepopolnosti. V vseh treh primerih pogoju tolerance v prvih desetih iteracijah nismo zadostili. Modra ($NGlobObl=3$) in zelena ($NGlobObl=6$) krivulja faktorja nosilnosti po tretji iteraciji svoje vrednosti ne spreminjata več veliko.



Slika 62: Faktorji nosilnosti po iteracijah za ročne nastavke

6.3.4 Gostota mreže končnih elementov

Gostoto mreže končnih elementov smo določili z nelinearno analizo idealne pločevine. Oznaka tipa mreže predstavlja število končnih elementov v prečni smeri pločevine. To pomeni, da pri tipu M30, pločevino v prečni smeri razdelimo na 30 končnih elementov, kar nam da deset končnih elementov na vsakem podpanelu. Določitev mreže končnih elementov smo izvedli na pločevini z razmerjem stranic $\alpha=1$. V tem primeru je število končnih elementov v prečni in vzdolžni smeri enako. S spreminjanjem razmerja stranic se sorazmerno spremeni tudi število končnih elementov v vzdolžni smeri tako, da so končni elementi vedno kvadratne oblike. Spremljali smo vrednost nosilnosti za vsak tip mreže in na podlagi rezultatov izbrali najbolj primerne. Vrednosti nosilnosti so prikazane v preglednici (Preglednica 76), razlika pa je izračunana glede na faktor nosilnosti pločevine s tipom mreže M30. Opazimo, da nosilnost pločevine z zgoščanjem končnih elementov pada. Razlika v redukciji nosilnosti med M30 in M36 je 2,6%, med M36 in M42 pa 0,4%. Padanje nosilnosti se pri tipu mreže M36 umiri in z nadaljnjim zgoščanjem končnih elementov večjega nižanja nosilnosti ni več zaznati. Za nadaljnje analize smo določili tip mreže M36.

Preglednica 76: Nosilnost pločevine za različne tipe mrež končnih elementov

Tip mreže	M30	M36	M42
nosilnost	0,573	0,558	0,556
razlika [%]	0,0	2,6	3,0

6.4 Parametrična študija

V analizo oblike najbolj neugodne začetne nepopolnosti smo vključili pločevine z dvema vzdolžnima ojačitvama. Zajeli smo panele treh različnih razmerij stranic, treh vitkosti panelov ter treh togosti vzdolžnih ojačitev (Preglednica 77). Širino in debelino vzdolžnih ojačitev smo določili z uporabo enačbe (31). Dolžino panela A smo določili glede na širino B in razmerje stranic α .

Raziskovali smo vpliv nastavkov na obliko in redukcijo nosilnosti pločevine, zato smo izvedli analizi s Fourierjevimi in kontinuirnimi nastavki. Iz občutljivostne analize reprezentativne pločevine smo določili zadosten red nastavkov; število Fourierjevih nastavkov NFouRed=5 in število kontinuirnih nastavkov NGlobObl=4. Število nastavkov nepopolnosti vzdolžnih ojačitev smo določili z NOblOj=3 in izbrali gostoto mreže končnih elementov tipa M36.

Začetno oblika nepopolnosti pločevine smo opisali s predlogom Evrokoda, ki je kombinacija globalne in lokalne oblike nepopolnosti. Odvisna je od razmerja stranic podpanela, ki je posredno odvisno od števila ojačitev. Za pločevino z dvema vzdolžnima ojačitvama in razmerjem stranic $\alpha=1$ določimo globalno obliko z enim polvalom in lokalno obliko s tremi polvali v obeh smereh pločevine (Slika 58).

Preglednica 77: Geometrijske karakteristike obravnavanih pločevin

B [cm]	t [cm]	b/t	I_p [cm ⁴]	H_{st} [cm]	T_{st} [cm]	I_{st} [cm ⁴]	γ	$\alpha=1$	$\alpha=0,5$
90	1	30	8,24	8,87	0,89	206,0	25	a1_1_1	a0,5_1_1
				11,42	1,14	494,5	60	a1_1_2	a0,5_1_2
				13,26	1,33	824,2	100	a1_1_3	a0,5_1_3
150	1	50	13,74	10,03	1,00	343,4	25	a1_2_1	a0,5_2_1
				12,84	1,28	824,2	60	a1_2_2	a0,5_2_2
				14,86	1,49	1373,6	100	a1_2_3	a0,5_2_3
240	1	80	21,98	11,25	1,13	549,5	25	a1_3_1	a0,5_3_1
				14,33	1,43	1318,7	60	a1_3_2	a0,5_3_2
				16,54	1,65	2197,8	100	a1_3_3	a0,5_3_3

6.4.1 Ojačene pločevine z razmerjem stranic $\alpha=1,0$

Izdelali smo preglednico, v kateri so prikazane vrednosti redukcijskega faktorja LPF (ang. Load Proportional Factor) tlačno obremenjenih vzdolžno ojačenih pločevin (Preglednica 78). Postopek izračuna redukcijskega faktorja je prikazan v priročniku Design of Plated Structures na strani 22 (Beg, 2010). Redukcija vitkih pločevin z vzdolžnimi ojačitvami manjših togosti je večja. Po definiciji je elastična kritična napetost uklona pločevine (ang.: column-like buckling) $\sigma_{cr,c}$ manjša od elastične kritične napetosti izbočenja pločevine $\sigma_{cr,p}$ (ang.: plate-like buckling), saj $\sigma_{cr,c}$ izračunamo ob predpostavki, da je pločevina na vzdolžnih robovih nepodprta. Pri krajših pločevinah prevlada uklon pločevine, kjer je razmerje $\sigma_{cr,p}/\sigma_{cr,c}$ približno enako 1. Za daljše pločevine pa velja ravno obratno. Pri pločevinah z razmerjem stranic $\alpha=1$ je bolj kritična uklonska nosilnost tlačene palice $\sigma_{cr,c}$, kar sledi iz primerjave elastičnih kritičnih napetosti (vedno velja $\sigma_{cr,c} < \sigma_{cr,p}$). Tudi če primerjamo krivulji redukcije ρ in χ_c glede na relativni vitkosti $\bar{\lambda}_p$ in $\bar{\lambda}_c$ velja, da je redukcija tlačne nosilnosti pri enaki relativni vitkosti ($\bar{\lambda}_p = \bar{\lambda}_c$) zaradi uklona tlačene palice vedno manjša od redukcije izbočenja pločevin.

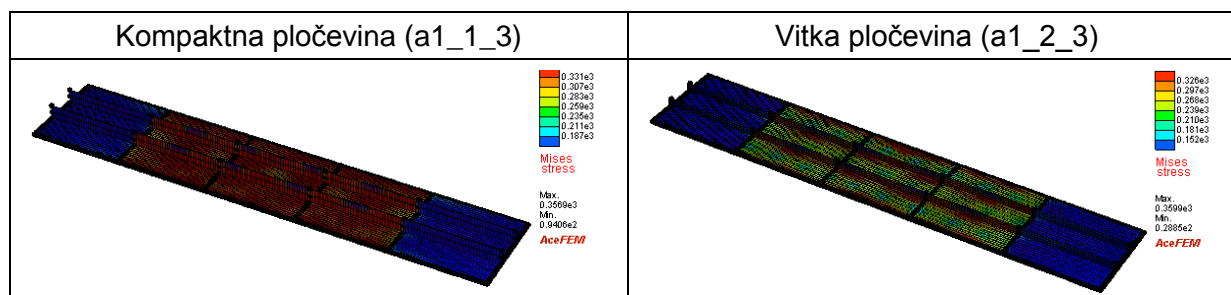
Preglednica 78: Redukcijski faktor tlačno obremenjenih pločevin

	oznaka pločevine	ρ	χ_c	ρ_c	LPF
1	a1_1_1	1	0,829	0,831	0,861
	a1_1_2	1	0,903	0,904	0,929
	a1_1_3	1	0,957	0,955	0,96
2	a1_2_1	0,987	0,706	0,711	0,593
	a1_2_2	1	0,821	0,822	0,672
	a1_2_3	1	0,881	0,881	0,718
3	a1_3_1	0,797	0,551	0,555	0,362
	a1_3_2	1	0,705	0,707	0,442
	a1_3_3	1	0,787	0,788	0,493

6.4.1.1 Pločevine a1_1

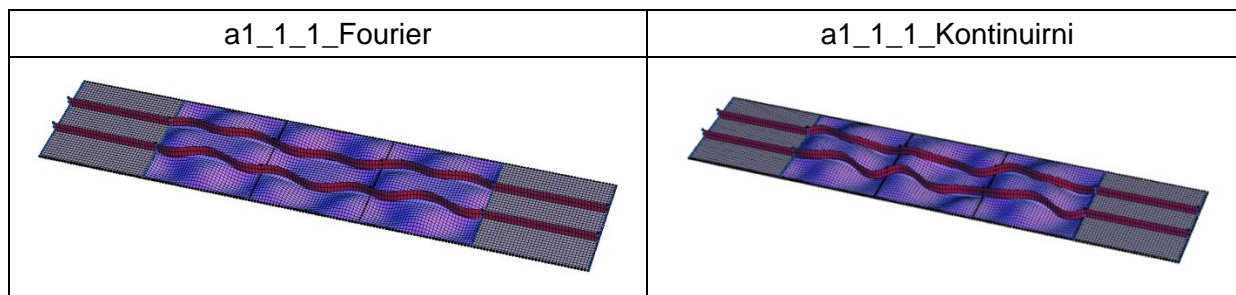
Podrobneje smo predstavili le obnašanje pločevine a1_1_1, saj se pločevini z močnejšimi ojačitvami obnašajo kompaktno. Pločevine a1_1 z majhno vitkostjo panelov/podpanelov imajo višje kritične izbočne napetosti (so bolj kompaktno). Kadar imamo poleg majhne vitkosti panelov na pločevini še toge vzdolžne ojačitve do prerazporeditve napetosti ne pride (Preglednica 79). Redukcija tlačne nosilnosti je v večji meri posledica upoštevanja začetnih nepopolnosti, ne pa tudi od izbočenja pločevin. Napetosti se v primeru vitke pločevine koncentrirajo na robovih podpanelov, na mestih izbočitev se napetosti zmanjšajo (zmanjšana osna togost). Bolj vitke pločevine so podvržene izbočenju in prerazporeditvi napetosti v post-kritičnem stanju.

Preglednica 79: Misesove napetosti kompaktne in vitke pločevine



Primerjava oblik najbolj neugodnih nepopolnosti opisanih z obema načinoma nastavkov je prikazana v preglednici (Preglednica 80). Že hiter pogled na obliki pločevin pove, da se obliki med seboj precej razlikujeta. S Fourierjevim načinom zapisa nastavkov nepopolnosti je najbolj neugodna oblika zelo podobna EC nepopolnosti s tremi polvalovi v vzdolžni smeri podpanelov. Tudi ojačitve s tremi polvalovi sledijo nepopolnostim pločevine. V primeru kontinuiranih nastavkov pa je kombinacija nastavkov nekoliko bolj nejasna, saj ne kaže podobnosti z EC nepopolnostmi.

Preglednica 80: Najbolj neugodni obliki začetnih nepopolnosti

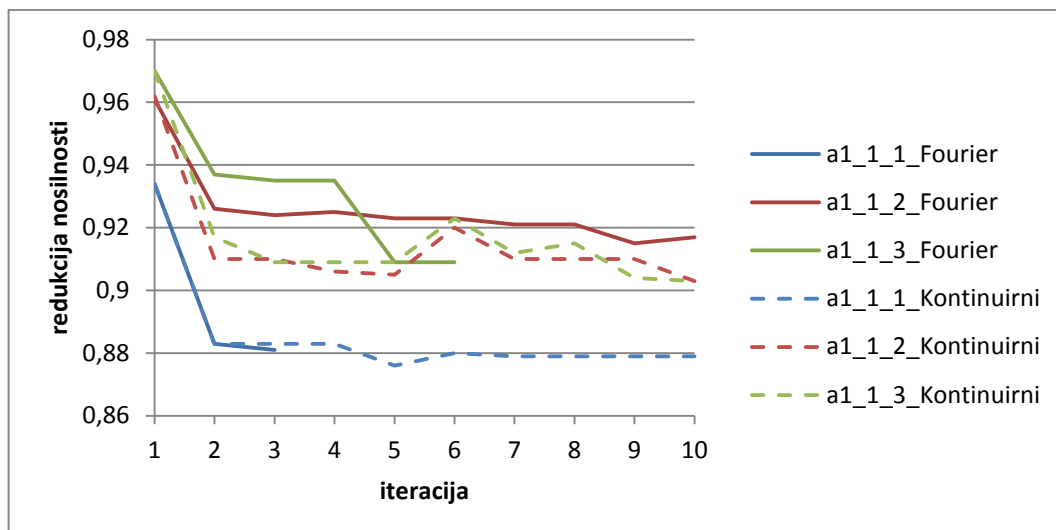


Z večanjem togosti vzdolžnih ojačitev bi moral faktor nosilnosti naraščati za oba načina zapisa nastavkov. Ker sta pločevini a1_1_2 in a1_1_3 v tlaku kompaktni, je redukcija nosilnosti v primeru ročnih nastavkov nepopolnosti enaka (Preglednica 81). Pri Fourierjevih nastavkih pride do malenkostnega padca nosilnosti pločevine a1_1_3 glede na a1_1_2. Odstopanje faktorja nosilnosti glede na zapis nastavkov pri pločevini a1_1_1 znaša 0,6%, v primeru a1_1_2 1,3% in v primeru a1_1_3 0,7%. Faktor nosilnosti pločevine z EC nastavki je večji od analiz pločevin z najbolj neugodno začetno nepopolnostjo za največ 5,4% v primeru pločevine a1_1_3.

Preglednica 81: Primerjava nosilnosti pločevin a1_1

oznaka	nosilnost pločevine Fourier	razlika od EC	oznaka	nosilnost pločevine Kontinuirni	razlika od EC
a1_1_1	0,881	2,4	a1_1_1	0,876	3,0
a1_1_2	0,915	2,8	a1_1_2	0,903	4,0
a1_1_3	0,909	4,8	a1_1_3	0,903	5,4

Spreminjanje vrednosti faktorja redukcije nosilnosti z iteracijami je prikazano na sliki (Slika 63). Največji padec faktorja zaznamo v drugem iteracijskem koraku, saj je rešitev optimizacijskega problema prve, začetne iteracije nepopolnost, ki je povsem različna od predloga nepopolnosti iz Evrokoda. Po drugi iteraciji se sprememba redukcijskega faktorja umiri. Pločevini a1_1_2 in a1_1_3 sta kompaktni, zato je redukcija nosilnosti odvisna le od izbire začetne oblike nepopolnosti in deformacij, ne pa izbočenja pločevine v postkritičnem stanju. Presenetil nas je potek spreminjanja faktorja nosilnosti pločevine a1_1_3 s Fourierjevimi nastavki nepopolnosti, kjer vrednost v petem iteracijskem koraku pade pod nosilnost pločevine s šibkejšimi ojačitvami. V primeru kompaktnih pločevin iskanje najbolj neugodnih začetnih nepopolnosti in redukcije nosilnosti pločevine večkrat ne da smiselnih rešitev. Rešitve moramo jemati z rezervo in njihovo točnost naknadno preučiti.



Slika 63: Faktorji nosilnosti pločevin po iteracijah za pločevine a1_1

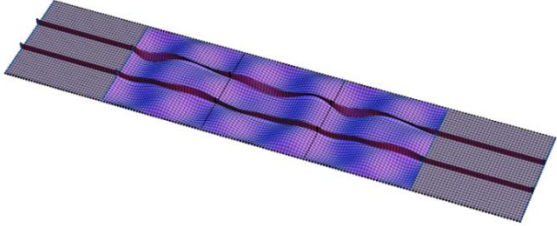
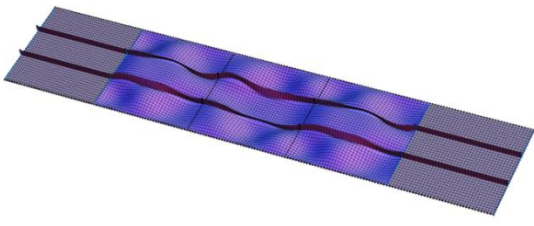
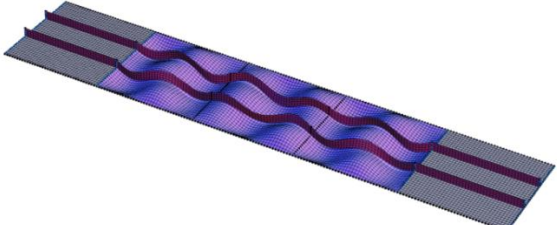
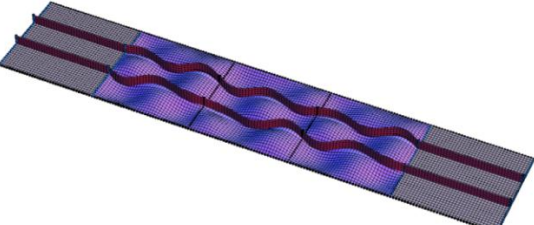
6.4.1.2 Pločevine a1_2

Več pozornosti rešitvam najbolj neugodnih oblik začetnih nepopolnosti smo posvetili pri pločevinah a1_2, ki izkazujejo vitkost v tlaku in izbočenje v post-kritičnem stanju. V preglednici (Preglednica 82) so prikazane rešitve najbolj neugodnih oblik nepopolnosti za pločevine z najšibkejšimi in najmočnejšimi vzdolžnimi ojačitvami. Oblike so rešitve optimizacijskega problema ene izmed desetih izvedenih iteracij. Velja poudariti, da smo v vseh problemih kot rešitev vsaj nekaj iteracij dobili obliko podobno EC nepopolnosti, kjer je bila redukcija nosilnosti le malenkost nižja od redukcije nosilnosti pločevine z najbolj neugodno začetno obliko. Oblike vseh desetih iteracij predstavljajo merodajne rešitve, vendar v primerjavi rezultatov obravnavamo le najbolj neugodno obliko nepopolnosti z največjo redukcijo nosilnosti.

Najprej si oglejmo primerjavo oblik glede na način zapisa nastavkov pločevine a1_2_1. Najbolj očitna razlika se zgodi na sredinskem podpanelu, kjer se formira različno število polvalov. V primeru Fourierjevih nastavkov se znotraj podpanela formirata vboklina in izboklina, ki si zvezno sledita iz panela v panel. V primeru kontinuiranih nastavkov pa se na sredinskem podpanelu formira le en sam razpotegnjen polval. Pričakovali bi, da bo najbolj neugodna oblika nepopolnosti tudi na sredinskem podpanelu podobna obliki, ki jo predlaga Evrokod (trije polvalovi v vzdolžni smeri), česar pa pri pločevini a1_2_1 ne zaznamo.

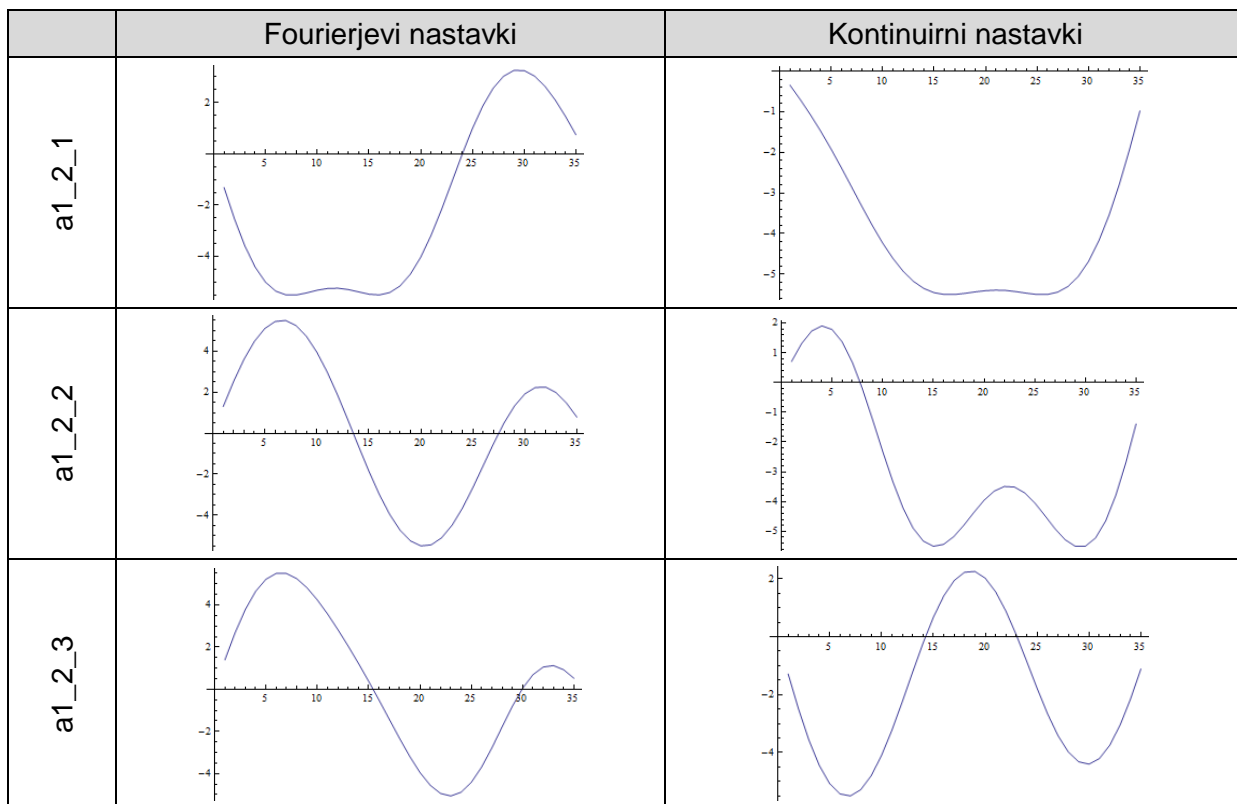
Medsebojna primerjava pločevin a1_2_3 z najmočnejšima vzdolžnima ojačitvama pokaže razliko v obliki najbolj neugodne oblike pločevine. V primeru Fourierjevih nastavkov se polvalovi na robnih podpanelih in na srednjih tvorijo na enakih mestih, medtem ko se pri kontinuiranih nastavitvah izbočitve na srednjih podpanelih glede na robne podpanele zamaknejo. Evrokodovemu predlogu najbolj podobna oblika nepopolnosti je oblika pri a1_2_3_Kontinuirni (Preglednica 82). Nepopolnost vzdolžnih ojačitev ima v obeh primerih obliko treh polvalov, kjer je spodnji rob izbočen enako kot zgornji.

Preglednica 82: Najbolj neugodne oblike začetne nepopolnosti

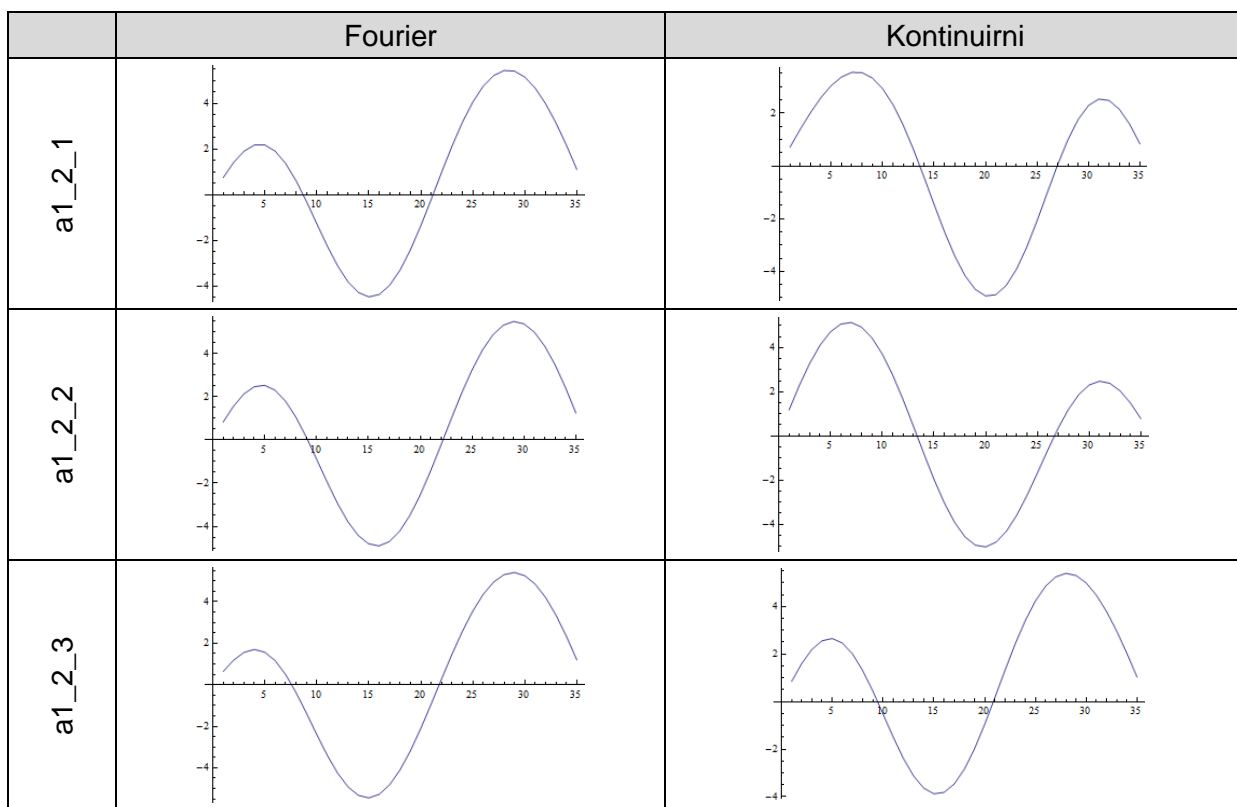
	Fourier	Kontinuirni
a1_2_1		
a1_2_3		

Spreminjanje oblike nepopolnosti v robnih in sredinskem podpanelu pločevine (obravnavamo sredinski panel) z večanjem togosti vzdolžnih ojačitev je prikazano v preglednicah (Preglednica 83, Preglednica 84). Opazili smo, da je v vseh treh primerih togosti vzdolžnih ojačitev, ne glede na način zapisa nastavkov, oblika v robnih dveh podpanelih enaka. Povsod se formirajo trije polvalovi vzdolžno na panel, z manjšo razliko v amplitudi in geometriji (Preglednica 84). Večje razlike nastanejo v sredinskem podpanelu (Preglednica 83), kjer pri kontinuiranih nastavkih opazimo trend vedno močnejšega gubanja pločevine z večanjem togosti vzdolžnih ojačitev, v primeru Fourierjevih nastavkov pa do večjega gubanja podpanela pride že pri manjših togostih ojačitev. Pri pločevinah s šibkimi ojačitvami ima večji vpliv prva globalna oblika nepopolnosti, pri močnejših ojačitvah pa imajo večji vpliv lokalne nepopolnosti.

Preglednica 83: Oblike nepopolnosti na srednjem podpanelu



Preglednica 84: Oblike nepopolnosti na sredini robnega podpanela

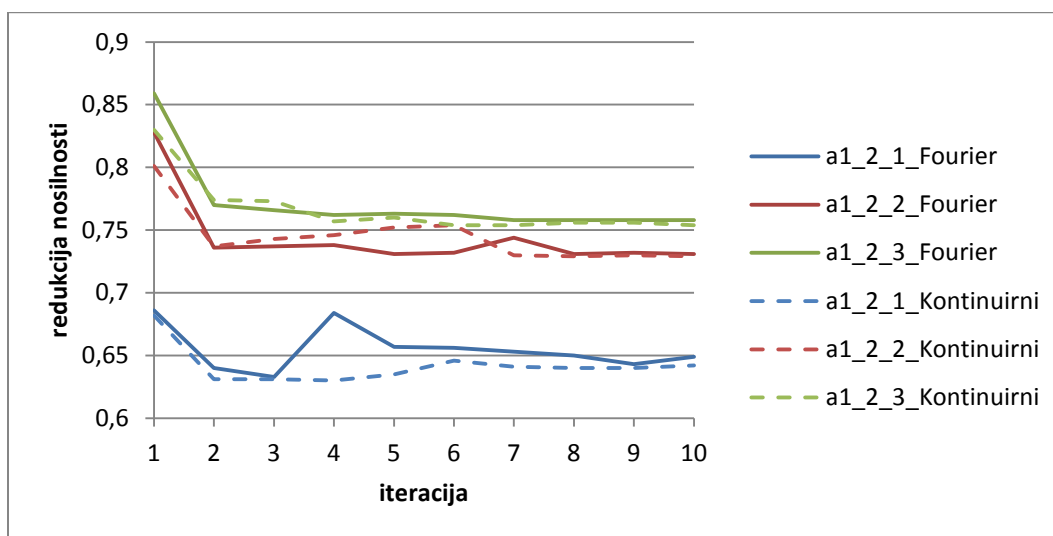


Faktor nosilnosti obravnavanih pločevin se v primerjavi z redukcijami nosilnosti pločevin z EC nepopolnostmi razlikuje za največ 5,6% v primeru pločevine a1_2_3 s kontinuirnimi nastavki (Preglednica 85). Glede na zapis nastavkov nepopolnosti so razlike majhne in znašajo v primeru a1_2_1 0,5%, v primeru a1_2_2 0,3% in v primeru a1_2_3 0,5%. Rešitev optimizacijskega problema je najbolj neugodna oblika nepopolnosti, ki se je glede na zapis nastavkov precej razlikovala. Kljub temu so razlike faktorjev nosilnosti obeh analiz zelo majhne. Oba načina zapisa nastavkov izkazujeta enako zanesljivost pri določitvi najbolj neugodne začetne oblike konstrukcije.

Preglednica 85: Primerjava nosilnosti pločevin a1_2

oznaka	nosilnost pločevine Fourier	razlika od EC	oznaka	nosilnost pločevine Kontinuirni	razlika od EC
a1_2_1	0,633	2,5	a1_2_1	0,630	2,9
a1_2_2	0,731	4,8	a1_2_2	0,729	5,1
a1_2_3	0,758	5,1	a1_2_3	0,754	5,6

Spreminjanje nosilnosti z iteracijami (Slika 64) pokaže dobro sovpadanje faktorjev nosilnosti obeh načinov zapisa nepopolnosti. V večini primerov algoritem reševanja optimizacijskega problema rešitve v desetih iteracijskih korakih ne najde. Vrednost nosilnosti se po drugi iteraciji umiri in se v nadaljnjih iteracijah bistveno ne spreminja več.



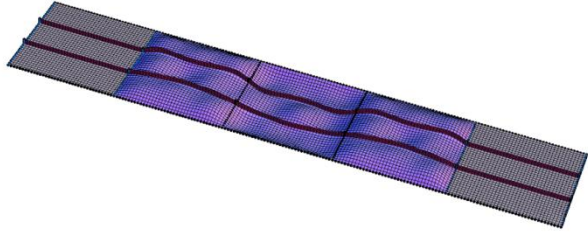
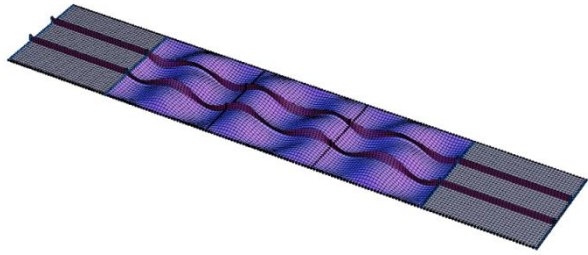
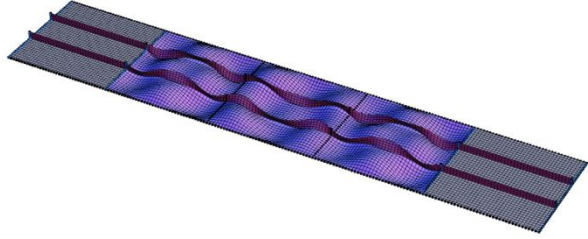
Slika 64: Faktorji nosilnosti pločevin po iteracijah za pločevine a1_2

6.4.1.3 Pločevine a1_3

Oblike najbolj neugodnih nepopolnosti s Fourierjevimi nastavki (Preglednica 86) so podobne oblikam nepopolnosti pločevin a1_2 (Preglednica 82). Vitke pločevine s šibkimi vzdolžnimi ojačitvami so veliko bolj občutljive na globalno obliko izbočenja, kar prikazuje oblika nepopolnosti pločevine a1_3_1. Z večanjem togosti ojačitev se vpliv globalnih oblik manjša, povečuje pa se vpliv lokalnih oblik. Podrobneje si oglejmo primer a1_3_3_Fourier (Preglednica 86), kjer v srednjem podpanelu poleg globalne nepopolnosti z enim polvalom

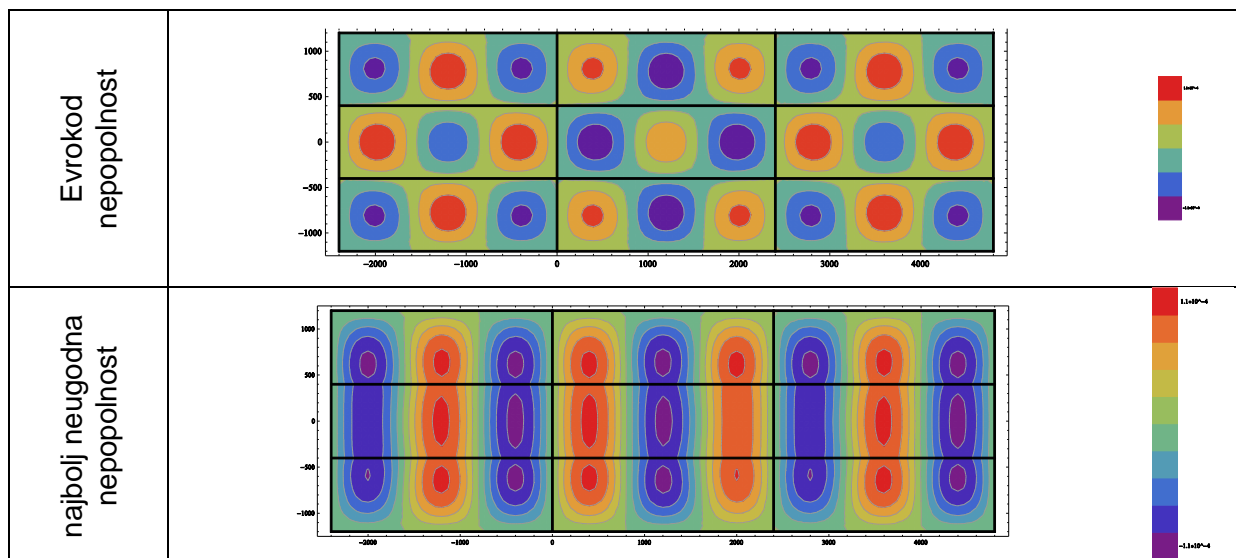
končno obliko nepopolnosti opisuje še pet lokalnih polvalov. Očitni so trije polvali, kjer je na drugem polvalu moč zaznati še neko nepopolnost višjega reda.

Preglednica 86: Najbolj neugodne oblike začetne nepopolnosti za primer a1_3

	Najbolj neugodna oblika nepopolnosti
a1_3_1_Fourier	
a1_3_2_Fourier	
a1_3_3_Fourier	

Za primer pločevine a1_3_2 s kontinuiranimi ročnimi nastavki smo naredili še primerjavo ukrivljenosti najbolj neugodne oblike nepopolnosti in oblike predlagane v Evrokodu (Preglednica 87). Standard Evrokod predpisuje le omejitev največje vrednosti amplitude nepopolnosti, omejitve ukrivljenosti pa ne. V poglavju 0 smo prikazali različne primere krivulj, iz katerih smo izvednostili ukrivljenost na mestu največje amplitude. Odločili smo se, da v analizah uporabimo zgornjo omejitev ukrivljenosti oranžne krivulje z vrhom na $\frac{1}{4}$ širine panela/podpanela. Iz standarda Evrokod pa lahko ukrivljenost izračunamo za predlagano sinusno krivuljo nepopolnosti z vrhom na $\frac{1}{2}$ širine panela/podpanela. Za izbrani primer znaša ukrivljenost po Evrokodu $0,68 \cdot 10^{-4}$, za najbolj neugodno obliko nepopolnosti pa $1,07 \cdot 10^{-4}$. V obeh primerih je bilo zagotovljeno največji dovoljeni amplitudi. Najvišje amplitude nepopolnosti po Evrokodu so vedno približno na sredini širine podpanelov (kombinacija globalne in lokalne nepopolnosti). Pri najbolj neugodni obliki nepopolnosti se vrhovi amplitud nepopolnosti (ki sovpadajo z mesti najvišjih vrednosti ukrivljenosti) pomaknejo izven sredine panela. Ker so omejitve ukrivljenosti bolj mile (dovoljujejo večjo ukrivljenost pločevine), bi bil faktor nosilnosti najbolj neugodne oblike nepopolnosti nižji od faktorja nosilnosti z nepopolnostmi po Evrokodu tudi za popolnoma enako začetno obliko. Za najbolj neugodno obliko nepopolnosti se faktor nosilnosti še dodatno zmanjša.

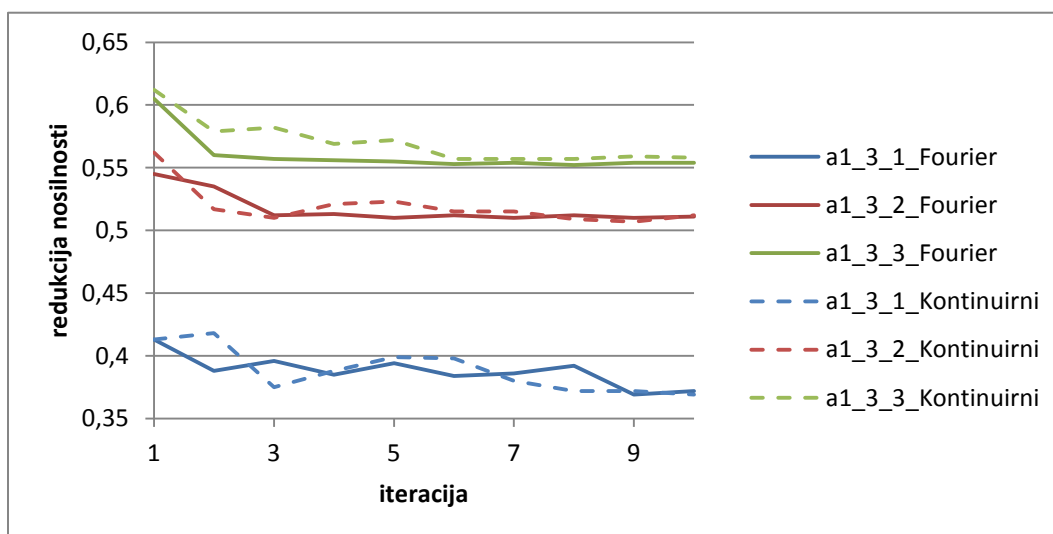
Preglednica 87: Primerjava ukrivljenosti pločevine a_1_3_2



Nosilnost pločevin z najbolj neugodno nepopolnostjo smo primerjali s pločevinami z EC nepopolnostjo (Preglednica 88) in ugotovili, da največje odstopanje nosilnosti zaznamo pri pločevini a1_3_1 za 8,0%. Glede na način zapisa nastavkov se kljub različni obliki začetnih nepopolnosti faktor nosilnosti v primeru a1_3_1 ne spremeni. Do enakega spoznanja smo prišli tudi v prejšnjem primeru pločevin a1_2, kjer pri pločevini z različno začetno nepopolnostjo dobimo enako nosilnost. Razlika faktorja nosilnosti pri primeru a1_3_2 znaša 0,6% in pri primeru a1_3_3 0,9%.

Preglednica 88: Primerjava nosilnosti pločevin a1_3

oznaka	nosilnost pločevine Fourier	razlika od EC	oznaka	nosilnost pločevine Ročni	razlika od EC
a1_3_1	0,369	8,0	a1_3_1	0,369	8,0
a1_3_2	0,51	4,7	a1_3_2	0,507	5,2
a1_3_3	0,552	6,9	a1_3_3	0,557	6,1



Slika 65: Grafičen prikaz poteka nosilnosti pločevin z iteracijami za primere a1_3

Norme prispevkov uteži nastavkov v tem poglavju posebej nismo prikazovali. V primeru Fourierjevih nastavkov se norme z iteracijami manjšajo in bližajo pogoju tolerance, ki mu v desetih iteracijskih korakih skoraj v nobenem primeru ne zadoščajo. Vrednosti norm so sicer nekoliko višje kot pri primeru striga. Razlog je velik numeričen model z velikim številom nastavkov na posameznih panelih in podpanelih. V primeru kontinuiranih ročnih nastavkov so vrednosti norm višje in se z iteracijami ne nižajo. Kot smo že ugotovili pri primerih pločevin s strižno obremenitvijo je razlog spreminjanje prispevka nastavka, ki na nosilnost nima vpliva.

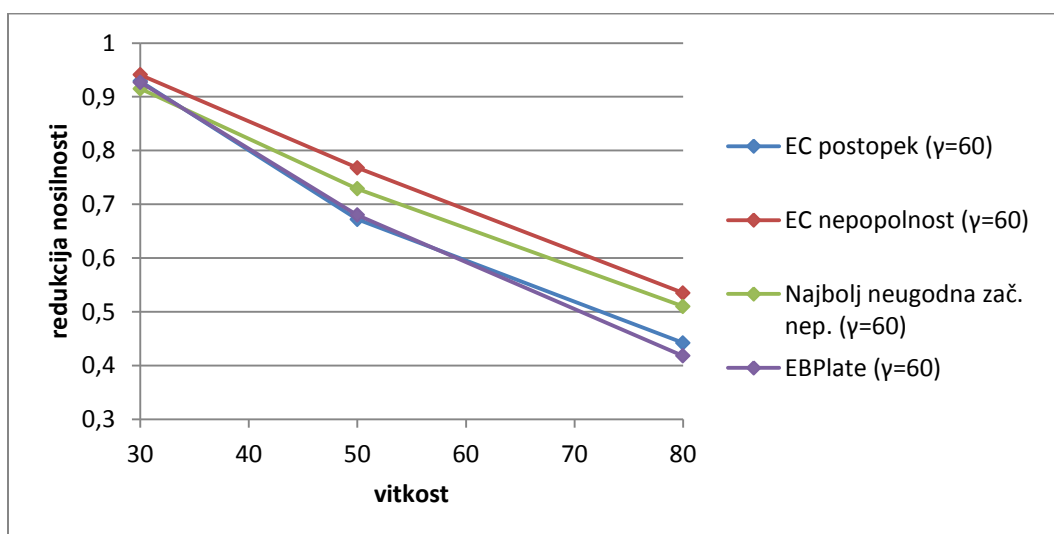
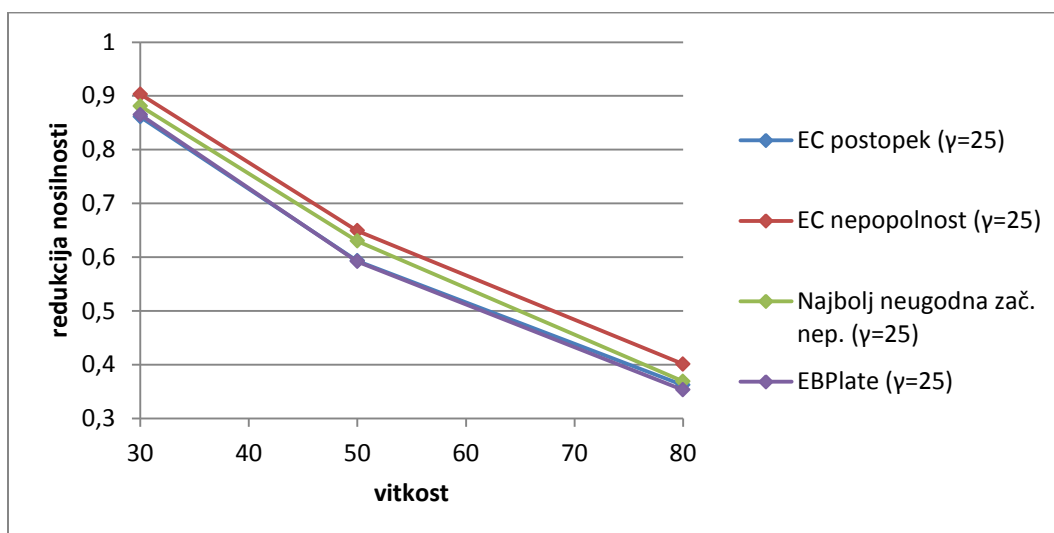
6.4.1.4 Primerjave

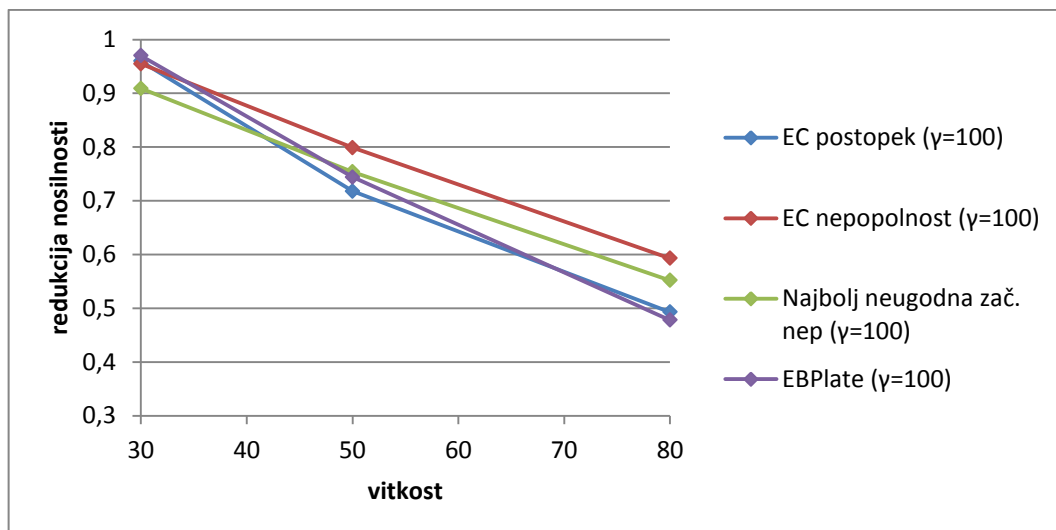
Vpliv vitkosti na nosilnost pločevin je prikazan na grafih (Slika 66). Modre krivulje (EC postopek) povezujejo vrednosti deležev polnoplastičnih tlačnih nosilnosti po postopku, ki je opisan v priročniku *Design of Plated Structures* (Beg, 2010). Rdeče krivulje (EC nepopolnosti) prikazujejo nosilnosti nepopolnih pločevin, kjer smo geometrijsko nepopolnost povzeli po priporočilu Evrokoda (v primeru dveh ojačitev je začetna nepopolnost kombinacija globalne in lokalne oblike, kjer je lokalna oblika odvisna od števila ojačitev in ima v podpanelu tri polvalove v vzdolžni smeri in enega v prečni). Zelena krivulja predstavlja nosilnost najbolj neugodne geometrijske nepopolnosti pločevine, ki je rešitev optimizacijskega problema. Vijolična krivulja pa predstavlja nosilnost pločevine, kjer smo kritično normalno napetost določili s programom EBPlate. Za vsako togost vzdolžnih ojačitev smo posebej prikazali graf nosilnosti v odvisnosti od vitkosti podpanela. Vpliv vitkosti ima pri vseh togostih ojačitev približno podoben vpliv, saj z večanjem vitkosti faktor nosilnosti pada. Opazimo, da redukcija tlačne nosilnosti pločevine z večanjem vitkosti ne poteka linearno.

Faktorja redukcije polnoplastične nosilnosti analiz z EBPlate-om in po postopku iz Evrokoda imata v vseh primerih približno enako vrednost (Slika 66). Nosilnost pločevin, ki imajo začetno nepopolnost po predlogu Evrokoda, je v vseh primerih najvišja. Najvišja razlika glede na nosilnost po EC postopku znaša v primerih pločevin z najvišjo vitkostjo podpanelov okoli 17%. Opazimo tudi naraščanje razlike redukcijskih faktorjev z večanjem togosti vzdolžnih ojačitev. Obtežni faktor najbolj neugodne oblike nepopolnosti (zelena krivulja) ima vrednost med rdečo (EC nepopolnost) in modro krivuljo (EC postopek). Padanje nosilnosti poteka vzporedno s padanjem nosilnosti pločevin z EC začetno nepopolnostjo. V povprečju je nosilnost pločevine z najbolj neugodno začetno nepopolnostjo približno 5% nižja od nosilnosti pločevin z nepopolnostmi po Evrokodu. Pri pločevinah z najmanjšo togostjo vzdolžnih ojačitev je redukcijski faktor tlačne nosilnosti z večanjem vitkosti vedno višji od faktorjev za analizi z EBPlate-om ali po postopku Evrokod. Pri višjih togostih vzdolžnih ojačitev je v primeru majhne vitkosti podpanelov redukcija najbolj neugodne nepopolnosti višja od redukcije z EC postopkom. Odstopanje faktorjev nosilnosti pločevin z najbolj neugodno nepopolnostjo se z večanjem vitkosti v primerjavi z redukcijskimi faktorji iz EC postopka povečuje.

Preglednica 89: Nosilnosti vseh obravnavanih pločevin a1

	togost	vitkost	najbolj neugodna nepopolnost	EC postopek	EBPlate	EC nepopolnost
a1_1_1	25	30	0,88	0,86	0,87	0,903
a1_1_2	60	30	0,92	0,93	0,93	0,941
a1_1_3	100	30	0,91	0,96	0,97	0,955
a1_2_1	25	50	0,63	0,59	0,59	0,649
a1_2_2	60	50	0,73	0,67	0,68	0,768
a1_2_3	100	50	0,75	0,72	0,74	0,799
a1_3_1	25	80	0,37	0,36	0,35	0,401
a1_3_2	60	80	0,51	0,44	0,42	0,535
a1_3_3	100	80	0,55	0,49	0,48	0,593





Slika 66: Diagrami redukcije nosilnosti v odvisnosti od vitkosti panela različnih togosti ojačitev za razmerje stranic $\alpha=1$

6.4.2 Ojačene pločevine z razmerjem stranic $\alpha=0,5$

Značilnost pločevin z razmerjem stranic manjšim od 1 je, da prevladuje izbočenje, ki je podobno uklonu tlačene palice (Preglednica 90). Redukcije zaradi plate-like izbočenja pločevin po standardu Evrokod ni. Opazimo, da je zaradi manjšega razmerja stranic nosilnost pločevine v primerjavi s pločevinami $\alpha=1$ precej večja.

Preglednica 90: Redukcijski faktor tlačno obremenjenih pločevin

	oznaka pločevine	ρ	χ_c	ρ_c
1	a0,5_1_1	1	0,977	0,977
	a0,5_1_2	1	1	1
	a0,5_1_3	1	1	1
2	a0,5_2_1	1	0,902	0,902
	a0,5_2_2	1	0,965	0,965
	a0,5_2_3	1	0,996	0,996
3	a0,5_3_1	1	0,817	0,818
	a0,5_3_2	1	0,900	0,900
	a0,5_3_3	1	0,947	0,947

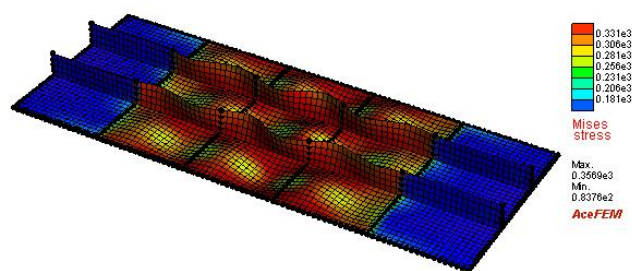
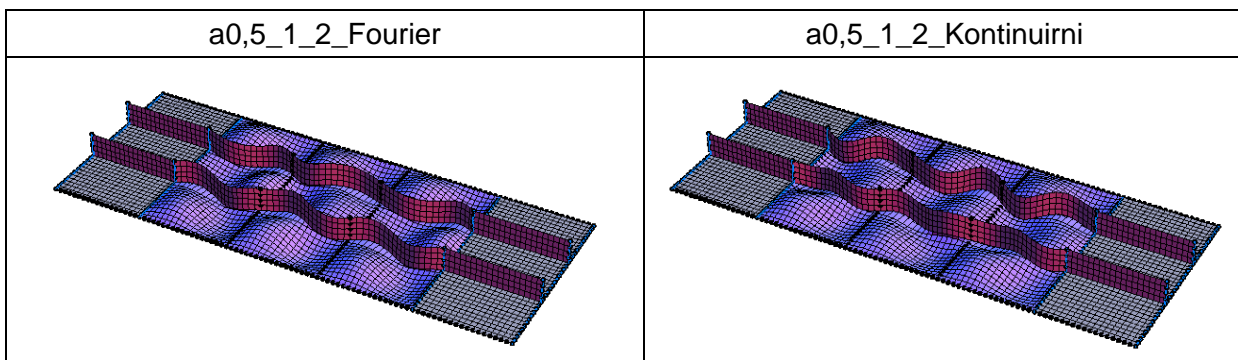
Začetno nepopolnost teh pločevin smo definirali tako, da se v vsakem podpanelu v vzdolžni smeri tvorita dva polvala. Standard sicer podaja enačbo, ki v odvisnosti od razmerja stranic α podpanela pločevine predlaga število polvalov v vzdolžni smeri. Iz tega predloga dobimo predlog 1,5 polvala v vzdolžni smeri podpanela.

6.4.2.1 Pločevine a0,5_1

Od vseh treh primerov pločevin, je glede na izračun redukcije tlačne nosilnosti po standardu samo prva pločevina z najmanjšo togostjo ojačitev podvržena izbočenju zaradi normalnih napetosti. Oblike najbolj neugodnih nepopolnosti so v vseh primerih izgledale enako. Prav tako primerjava oblik, definiranih s Fourierjevimi ali kontinuirnimi ročnimi nastavki ni pokazala večjih razlik. V podpanelih je najbolj neugodna nepopolnost z dvema polvaloma v vzdolžni smeri, ki je podobna EC nepopolnosti iz standarda Evrokod. Nepopolnost med paneli poteka zvezno, pride le do zamika izbočitev v prečni smeri. Najbolj neugodna nepopolnost vzdolžnih ojačitev sledi nepopolnosti panelov in jo tudi opisujeta dva polvala na panel.

Ker je konstrukcija a0,5_1_2 precej kompaktna in neobčutljiva na izbočenje pločevin (Preglednica 91) do izraza pride le vpliv lokalnih nepopolnosti. Primerjava deformacijske oblike in najbolj neugodne oblike nepopolnosti (Slika 67) pokaže, da do globalnih deformacij konstrukcije ne pride. Izbočijo se le podpaneli v enaki smeri kot je izbočena najbolj neugodna oblika napopolnosti. Zaradi izbočenja pločevine se napetosti znotraj pločevine prerazporedijo. Povečajo se napetosti na robovih podpanelov, na mestu izbočenja pa se zmanjšajo.

Preglednica 91: Najbolj neugodni obliki nepopolnosti za pločevino a0,5_1_2



Slika 67: Misesove napetosti za a0,5_1_2

Kljub temu, da po standardnem postopku redukcije nosilnosti ni bilo, pri najbolj neugodnih oblikah nepopolnosti, ki je rešitev optimizacijskega problema, do redukcije nosilnosti pride. Kot smo že povedali pri opisu preglednice (Preglednica 91), sta obliki glede na način zapisa nastavkov enaki. Iz preglednice (Preglednica 92) pa odčitamo večje odstopanje nosilnosti glede na način zapisa nastavkov. Pri pločevinah a0,5_1_1 in a0,5_1_2 to odstopanje znaša

3,3% in pri pločevini a0,5_1_3 2,9%. Glede na nosilnost pločevine z nepopolnostjo iz Evrokoda največje odstopanje zaznamo pri pločevini a0,5_1_2, ki znaša 9,0%.

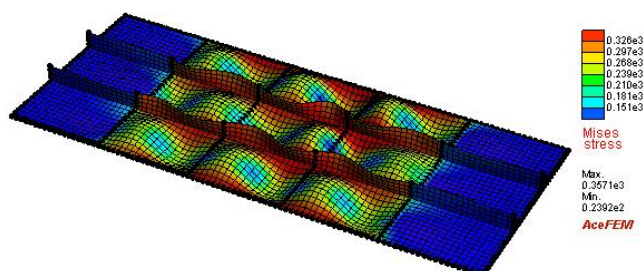
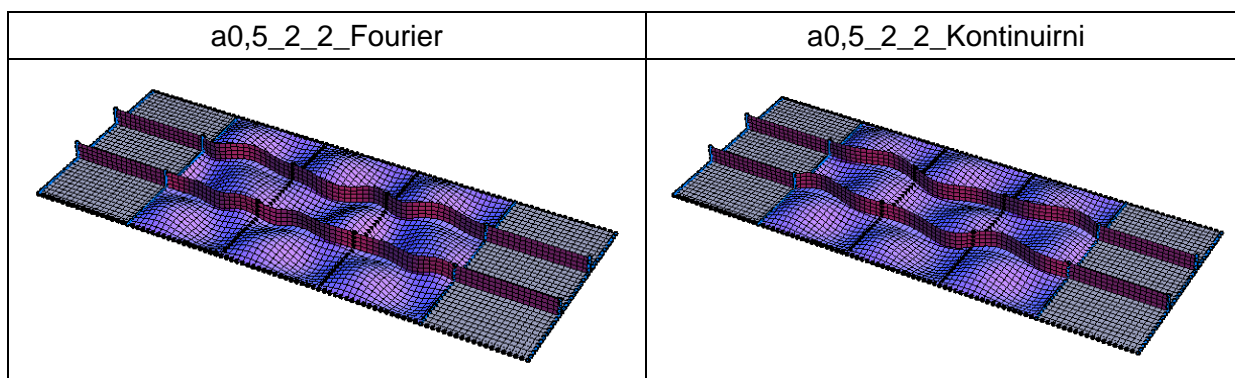
Preglednica 92: Primerjava nosilnosti pločevin a0,5_1

oznaka	nosilnost pločevine Fourier	razlika od EC	oznaka	nosilnost pločevine Ročni	razlika od EC
a0,5_1_1	0,869	7,8	a0,5_1_1	0,899	4,7
a0,5_1_2	0,871	9,0	a0,5_1_2	0,901	5,9
a0,5_1_3	0,881	8,4	a0,5_1_3	0,904	6,0

6.4.2.2 Pločevine a0,5_2

Najbolj neugodne oblike začetne nepopolnosti so za vse tri primere togosti vzdolžnih ojačitev izgledale enako. Tudi tu se formirata dva polvala v vzdolžni smeri vsakega podpanela. Glede na zapis nastavkov opazimo razliko v najbolj neugodni obliki nepopolnosti vzdolžnih ojačitev (Preglednica 93), ki pa je tako majhna, da na prvi pogled celo ni opazna. Deformacijska oblika in oblika začetnih nepopolnosti se v vseh treh primerih pločevin ujemajo. Pločevine a0,5_2 so vitkejšje od a0,5_1, kar opazimo tudi na sliki Misesovih napetosti (Slika 68). Zaradi izbočenja pločevine na sredini podpanelov pride do prerazporeditve normalnih napetosti k robovom podpanela. Območje reduciranih normalnih napetosti se je v primerjavi s pločevinami a0,5_1 (Slika 67) razširilo. Zaradi tega se je zmanjšala tlačna nosilnost pločevine. Oblika nepopolnosti vzdolžnih ojačitev je enaka kot v prejšnjem primeru a0,5_1 z dvema polvaloma v vzdolžni smeri na panel.

Preglednica 93: Najbolj neugodni obliki nepopolnosti za pločevino a0,5_2_2



Slika 68: Misesove napetosti za a0,5_2_2

Nosilnost je v primerjavi z bolj kompaktnimi pločevinami a0,5_1 precej padla. V primerjavi z nosilnostjo, ki jo ima pločevina z Evrokodovimi nepopolnostmi, so vrednosti iz naših analiz manjše za do 9,2%. Razlike med nosilnostmi glede na način zapisa nastavkov znaša pri vseh pločevinah a0,5_2 približno 2,8%. Do podobnega odstopanja je prišlo tudi v primeru vitkejših pločevin a0,5_1.

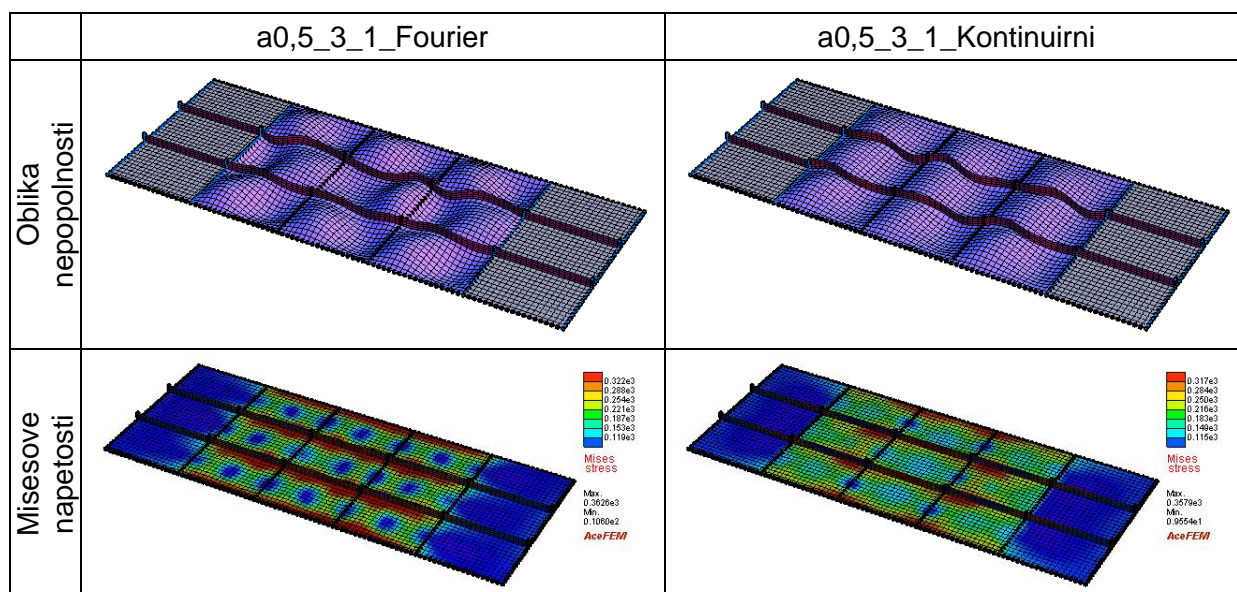
Preglednica 94: Primerjava nosilnosti pločevin a0,5_2

oznaka	nosilnost pločevine Fourier	razlika od EC	oznaka	nosilnost pločevine Ročni	razlika od EC
a0,5_2_1	0,695	7,8	a0,5_2_1	0,716	5,0
a0,5_2_2	0,716	8,4	a0,5_2_2	0,736	5,9
a0,5_2_3	0,730	9,2	a0,5_2_3	0,751	6,6

6.4.2.3 Pločevine a0,5_3

Razlike v obliki najbolj neugodne začetne nepopolnosti glede na način zapisa nastavkov v preteklih analizah nismo zasledili. Prvič sta si v primeru pločevin a0,5_3_1 obliki nepopolnosti povsem različni. V obeh primerih se sicer na vsakem podpanelu v vzdolžni smeri formirata dva polvala, vendar sta pri kontinuirnih ročnih nastavkih izbočitev in vbočitev v srednjem podpanelu pozicionirani ravno obratno kot v vseh do sedaj videnih primerih. Skladni sta tudi obliki nepopolnosti in deformacijska oblika. Pri grafikah misesovih napetosti (druga vrstica v preglednici Preglednica 95) opazimo, da v primeru kontinuiranih in Fourierjevih nastavkov koncentracije normalnih napetosti nastanejo na skrajnem robu podpanelov. Ta koncentracija je bolj vidna v primeru Fourierjevih nastavkov, medtem ko pri kontinuiranih nastavkih večje koncentracije nastanejo bolj v robovih panelov, kar kaže slika misesovih napetosti (Preglednica 95). Zakaj pride do tako velike razlike v oblikah nepopolnosti ne znamo razložiti. Ker je pločevina vitka in ojačitve precej šibke ima večji vpliv globalna nepopolnost (primer s kontinuiranimi nastavki). Iz slik misesovih napetosti za kontinuirane nastavke vidimo, da se normalne napetosti koncentrirajo predvsem v robovih panelov, v sredini podpanelov pa so več ali manj konstantne. To kaže na to, da ima tudi deformacijska oblika obliko podobno najbolj neugodni obliki nepopolnosti iz preglednice (Preglednica 95), kjer vpliva lokalnih oblik ni. Popolnoma drugače je pri analizi s Fourierjevimi nastavki, kjer je prisoten vpliv lokalnih oblik nepopolnosti. Lahko rečemo, da sta vsaka od analiz glede oblike nepopolnosti dobili popolnoma nasprotno rezultate. Analiza s Fourierjevimi nastavki dobi obliko, kjer imajo vzdolžne ojačitve velik vpliv. Analiza s kontinuiranimi nastavki pa da obliko, kjer šibke vzdolžne ojačitve ne nudijo opore koncentriranju normalnih napetosti in se same izbočijo ravno tako kot panel.

Preglednica 95: Najbolj neugodna oblika nepopolnosti za a0,5_3_1



V analizah pločevin z močnejšimi vzdolžnimi ojačitvami najbolj neugodne oblike izgledajo tako kot v preteklih analizah pločevin. Zaradi togosti ojačitev ima večji vpliv lokalno obnašanje pločevin na podpanelih. Najbolj neugodna oblika začetne nepopolnosti je torej v vseh primerih podobna oblikam iz analiz a0,5_1 in a0,5_2 (Preglednica 91 in Preglednica 93).

Nosilnost z večanjem togosti v vseh priemerih narašča. V primerjavi z nosilnostjo pločevin, kjer nepopolnost definiramo po Evrokodovih pripopročilih, je ta v vseh primerih višja za do 6,3% pri Fourierjevih nastavkih in do 5,3% pri kontinuirnih nastavkih. Razlika nosilnosti pločevin glede na način zapisa nastavkov pri a0,5_3_1 znaša 0,8%, pri a0,5_3_2 1,1% in pri pločevini a0,5_3_3 0,5%. Spet pridemo do ugotovitve, da pri pločevini a0,5_3_1 kljub popolnoma različnima oblikama začetne nepopolnosti konstrukcija poseduje skoraj popolnoma enako nosilnost.

Preglednica 96: Primerjava nosilnosti pločevin a0,5_3

oznaka	nosilnost pločevine Fourier	razlika od EC	oznaka	nosilnost pločevine Ročni	razlika od EC
a0,5_3_1	0,524	4,6	a0,5_3_1	0,520	5,3
a0,5_3_2	0,560	4,4	a0,5_3_2	0,566	3,4
a0,5_3_3	0,577	3,8	a0,5_3_3	0,587	2,3

6.4.2.4 Primerjave

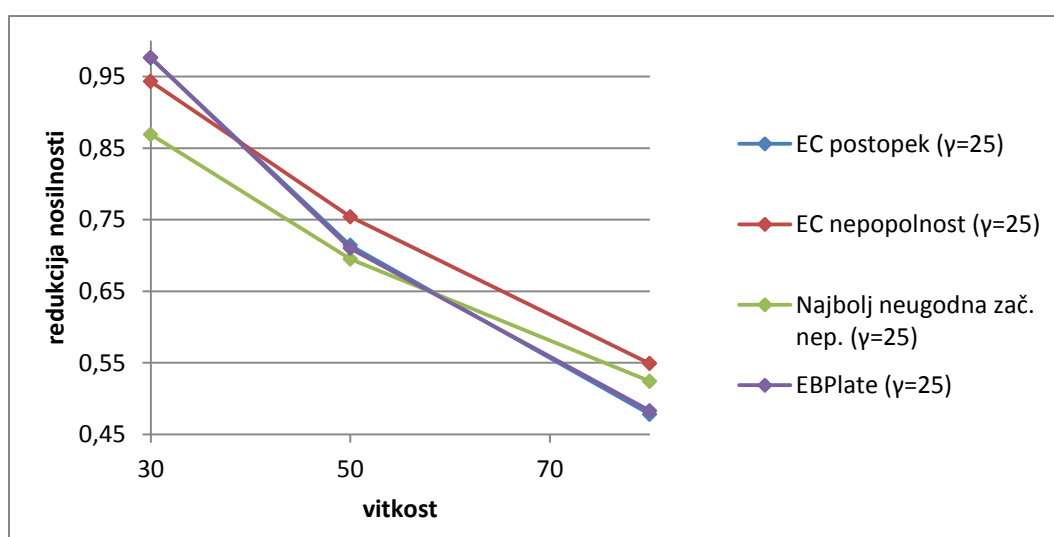
V preglednici (Preglednica 97) so zbrani redukcijski faktorju tlačne nosilnosti, ki smo jih dobili na tri različne načine opisane v prejšnjem poglavju pri pločevinah a1. Pri vseh obravnavanih pločevinah je nosilnost pločevine z najbolj neugodno začetno nepopolnostjo nižja od nosilnosti izračunanih z Evrokodovim postopkom ali direktno analizo z nepopolnostjo, ki jo

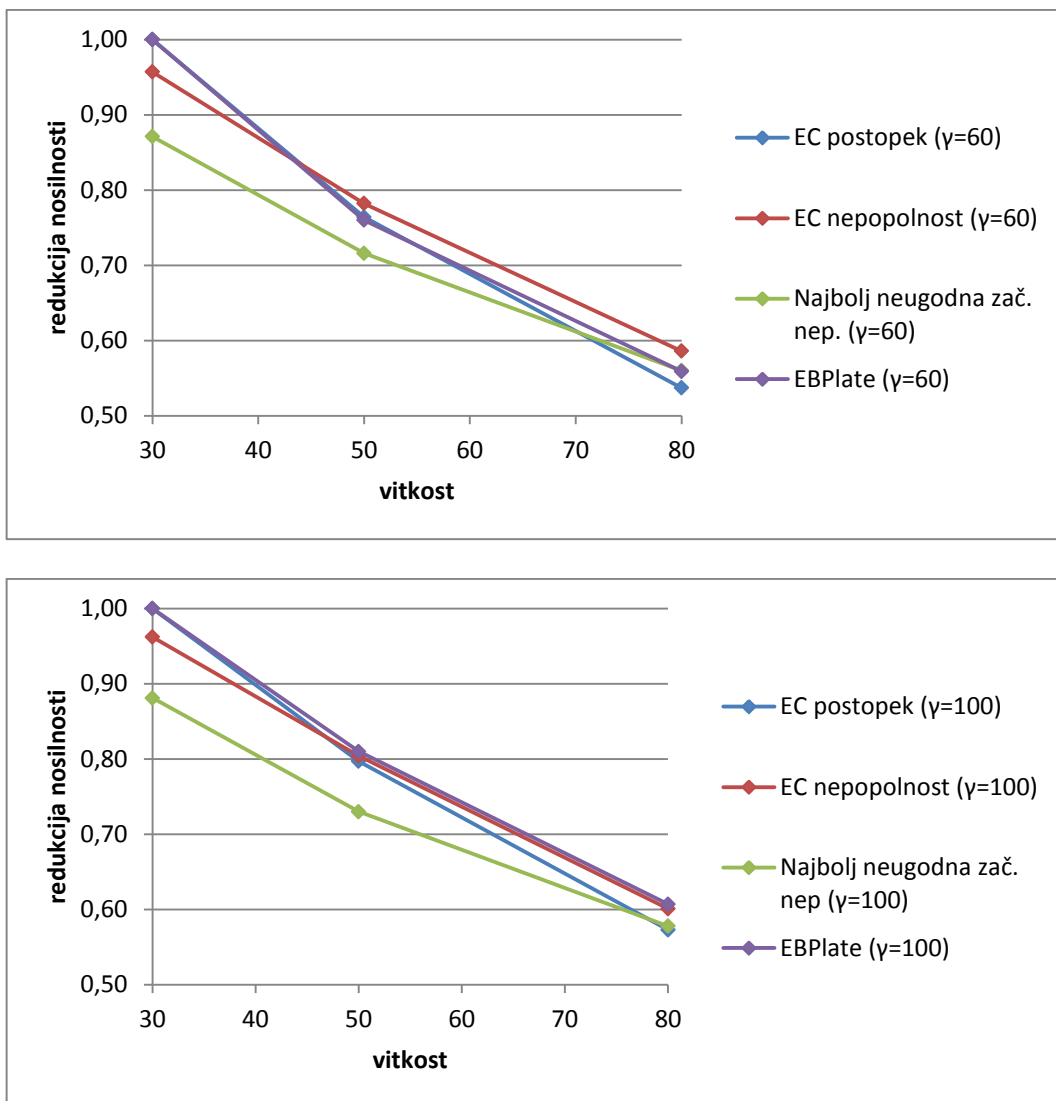
predlaga Evrokod. V primerjavi z nosilnostjo po EC postopku in nosilnostjo z EC napopolnostjo, je ta nižja do 13%. Nosilnost pločevine z EC nepopolnostjo se približa nosilnosti pločevine z najbolj neugodno obliko nepopolnosti, vendar vseeno odstopa za največ 9,5% pri a0,5_2_3. Rezultati redukcije nosilnosti dobljeni s programom EBPlate so primerljivi z rezultati numeričnih analiz pločevin z EC nepopolnostjo (Slika 69).

Na grafih (Slika 69) so prikazani rezultati vseh obravnavanih pločevin z razmerjem stranic $\alpha=0,5$. Modre krivulje predstavljajo deleže polnoplastične nosilnosti izračunane iz EC postopka, rdeče krivulje nosilnosti pločevin z EC začetno nepopolnostjo, zelene rezultate pločevin z najbolj neugodno začetno nepopolnostjo in vijolične rezultate prifobljene s programom EBPlate. Prikazani so rezultati nosilnosti vseh togosti vzdolžnih ojačitev, ki z naraščanjem togosti raste. Z večanjem vitkosti nosilnost pločevin pada (Preglednica 97).

Preglednica 97: Nosilnosti vseh obravnavanih pločevin a0,5

	togost	vitkost	najbolj neugodna nepopolnost	EC postopek	EBPlate	EC nepopolnost
a0,5_1_1	25	30	0,87	0,98	0,98	0,94
a0,5_1_2	60	30	0,87	1,00	1,00	0,96
a0,5_1_3	100	30	0,88	1,00	1,00	0,96
a0,5_2_1	25	50	0,70	0,71	0,71	0,75
a0,5_2_2	60	50	0,72	0,76	0,76	0,78
a0,5_2_3	100	50	0,73	0,80	0,81	0,80
a0,5_3_1	25	80	0,52	0,48	0,48	0,55
a0,5_3_2	60	80	0,56	0,54	0,56	0,59
a0,5_3_3	100	80	0,58	0,57	0,61	0,60





Slika 69: Diagrami redukcije nosilnosti v odvisnosti od vitkosti panela različnih togosti ojačitev za razmerje stranic $\alpha=0,5$

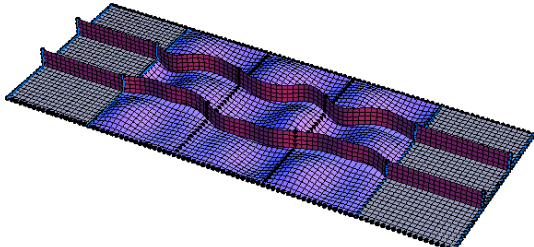
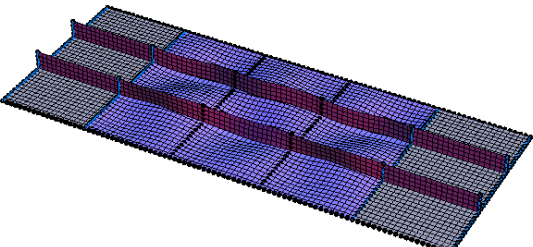
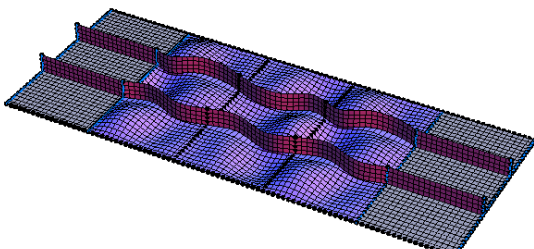
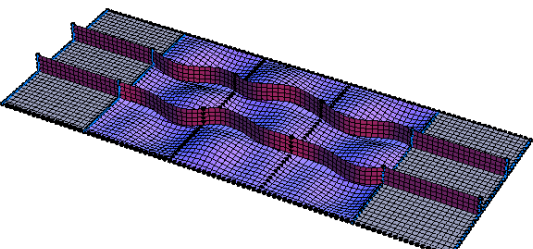
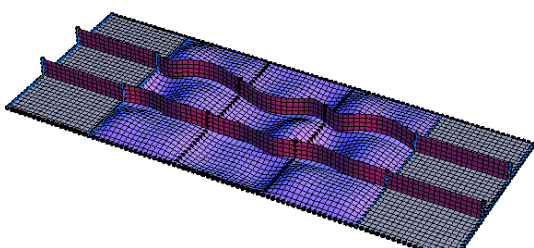
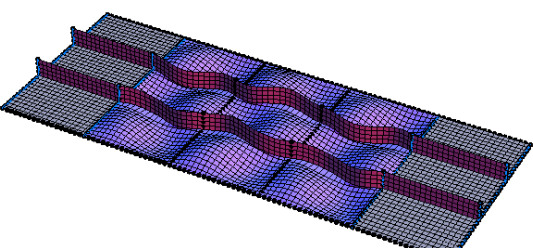
6.5 Izbira začetne oblike nepopolnosti in vpliv omejitve ukrivljenosti na obliko nepopolnosti in faktor nosilnosti

Omejitve ukrivljenosti in amplitude nepopolnosti predstavljajo robne pogoje vseh koordinat mreže končnih elementov, ki jim je potrebno zadostiti pri reševanju optimizacijskega problema. Podrobno analizo vpliva omejitev smo naredili že v primeru strižne obremenitve. Pri tlačno obremenjenih pločevinah smo natančneje primerjali pločevino a0,5_2_3. Zaradi stiske s prostorom v preglednici (Preglednica 99) enot količin nismo zapisali. Enote amplitud nepopolnosti so [mm], ukrivljeneosti pa 10^4 [1/mm].

Izbrali smo dve različni obliki začetnih nepopolnosti, ki ju predlaga standard Evrokod. V primeru razmerja stranic $\alpha=0,5$ standard predlaga zapis 1,5 vala v vzdolžni smeri podpanela. Vrednost ponavadi zaokrožimo navzgor, na 2. Zanimal nas je vpliv števila polvalov v začetni obliki nepopolnosti na faktor nosilnosti tlačno obremenjenih pločevin. Z načinom A smo

zapisali kombinacijo globalne in lokalne oblike e z dvema polvaloma, in z načinom B z enim polvalom v vzdolžni smeri panela.

Preglednica 98: Najbolj neugodne začetne nepopolnosti

	Najbolj neugodna nepopolnost	
	A) Dva polvala	B) En polval
0		
6		
10		

Opazimo, da je najbolj neugodna oblika nepopolnosti po desetih iteracijskih korakih v skoraj vseh primerih omejitvev amplitud nepopolnosti in ukrivljenosti oblika, ki ima v vzdolžni smeri dve izbočitvi. V primeru z največjo dovoljeno ukrivljenostjo z načinom A najbolj neugodna oblika opisuje le en polval, vendar do take rešitve pridemo v le eni iteraciji, vse ostale iteracije imajo nekoliko večjo nosilnost in dve polvalovni izbočitvi podpanela. Nosilnosti pločevin z nepopolnostjo po načinu A je nižja od načina B, kar predstavlja bolj neugodno obliko zapisa nepopolnosti.

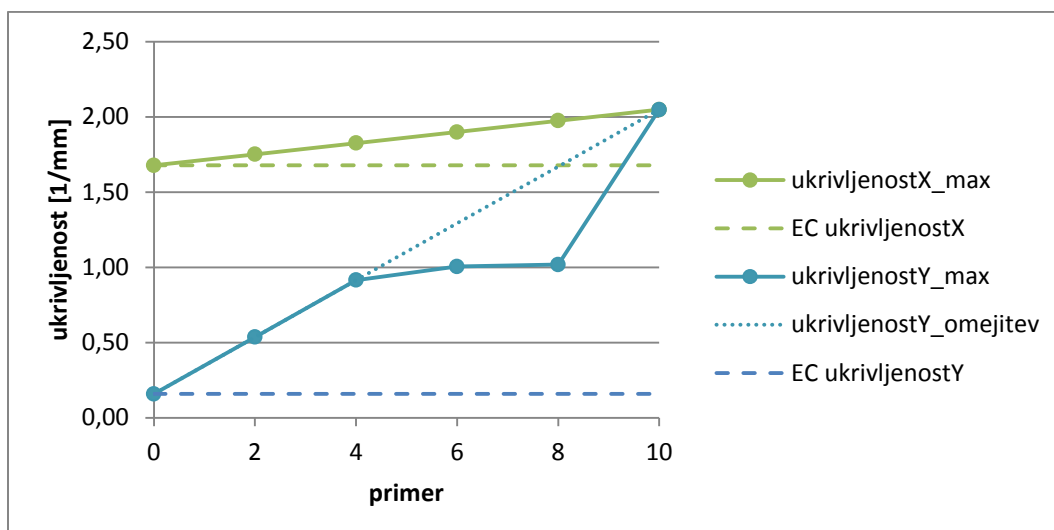
V prvi vrstici so prikazane največje vrednosti amplitud in ukrivljenosti EC nepopolnosti (kombinacija globalne in lokalne oblike z dvema polvalovoma v vzdolžni smeri). Največja dosežena ukrivljenost v smeri osi x ($1,68 \cdot 10^4$) je veliko večja od ukrivljenosti v smeri osi y ($0,16 \cdot 10^4$), saj sta v vzdolžni smeri definirana dva polvala in je razlika v ukrivljenosti različnih smeri velika. V zadnji vrstici pa so omejitve ukrivljenosti določene z oranžno krivuljo (poglavje 4.2), ki v obeh smereh znaša $2,05 \cdot 10^4$, saj je določena glede na širino panela B. Omejitve

ukrivljenosti smo z vsako analizo povečali za 20% razlike med omejitvama po EC in oranžne krivulje, da v zadnji analizi (analiza 10) dosežemo 100% vrednost omejitev ukrivljenosti. Opazimo, da sta največja dosežena amplituda nepopolnosti in največja ukrivljenost v smeri osi x v vseh primerih vedno enaki omejitvam, medtem ko ukrivljenost v smeri y v zadnjih primerih omejitve ne doseže. Omejitve ukrivljenosti v smeri osi x in največja dovoljena ukrivljenost pločevine preprečujeta povečanje ukrivljenosti v smeri osi y. V zadnji analizi pa sta doseženi obe omejitvi. Razlog je popolna sprememba najbolj neugodne oblike nepopolnosti, ki v vzdolžni smeri opisuje le en polval. V preteklih analizah je imela oblika nepopolnosti podpanela v vzdolžni smeri vedno dva polvala (Preglednica 98).

Preglednica 99: Amplitude in ukrivljenosti nepopolnih pločevin ter sprememba faktorja nosilnosti (dva polvalova)-način A

A	$e_{0,max}$ [mm]	$K_{X0,max}$ [1/mm]	$K_{Y0,max}$ [1/mm]	e_0 [mm]	K_{X0} [1/mm]	K_{Y0} [1/mm]	faktor nosilnosti	sprememba [%]
EC	3,63	1,68	0,16	3,63	1,68	0,16	0,801	0,00
0	3,63	1,68	0,16	3,63	1,68	0,16	0,753	6,04
2		1,75	0,54	3,63	1,75	0,54	0,739	7,74
4		1,83	0,92	3,63	1,83	0,92	0,734	8,36
6		1,90	1,29	3,63	1,90	1,01	0,733	8,45
8		1,97	1,67	3,63	1,97	1,02	0,735	8,30
10		2,05	2,05	3,63	2,05	2,05	0,731	8,74

Povečevanje vrednosti ukrivljenosti nepopolne pločevine prikazuje slika (Slika 70). Začetna razlika največjih vrednosti ukrivljenosti v primeru 0 je zelo lepo vidna (EC nepopolnost). Postopno povečevanje obeh ukrivljenosti izvajamo do primera 10, kjer obe količini dosežeta enako vrednost. S pikicami smo označili potek največje dovoljene ukrivljenosti v smeri osi y. Ugotovili smo, da bi bilo ukrivljenost v smeri y smiselno omejiti s polovično vrednostjo največje ukrivljenosti v smeri x, saj je razmerje stranic $\alpha=0,5$. Pred začetkom analiz na to nismo bili dovolj pozorni. Rezultati izvedenih analiz pa kažejo, da oblike najbolj neugodnih nepopolnosti, ki imajo obliko podobno EC nepopolnosti, konvergirajo k polovični vrednosti največje ukrivljenosti v smeri x (modra krivulja od primera 4 do primera 8). V primeru 10 je rešitev optimizacijskega problema popolnoma drugačna oblika nepopolnosti, kot jo predlaga Evrokod in odstopa od pričakovane oblike nepopolnosti.

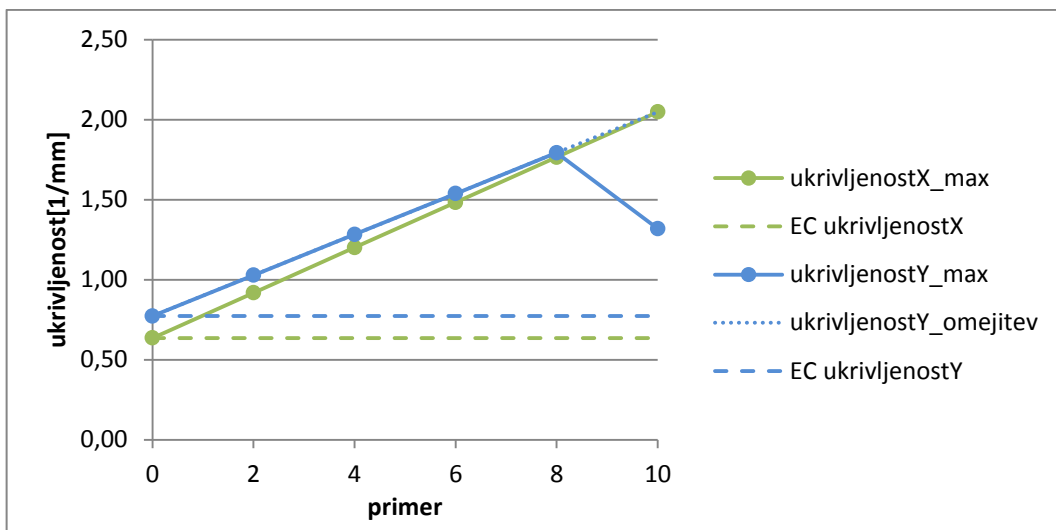


Slika 70: Omejitve ukrivljenosti in dosežene vrednosti ukrivljenosti v obeh smereh pločevine-način A

Vzporedno smo naredili še analizo, kjer smo začetno obliko nepopolnosti zapisali ravno tako s kombinacijo globalne in lokalne oblike, le da smo za lokalno obliko definirali en polval v vzdolžni smeri podpanela. Največji vrednosti amplitud nepopolnosti in ukrivljenosti so prikazane v prvi vrstici preglednice (Preglednica 100). Vrednosti omejitve ukrivljenosti v smeri osi y so v primerjavi z EC nepopolnostjo z dvema polvaloma v vzdolžni smeri veliko večje. Tu definiramo le en polval, zato je večanje ukrivljenosti v smeri osi y možno. Vidimo, da v vseh primerih oblike nepopolnosti dosežejo omejitve ukrivljenosti v obeh smereh, le pri zadnji analizi z največjo dovoljeno ukrivljenostjo omejitve v smeri osi y ne dosežemo (Slika 70).

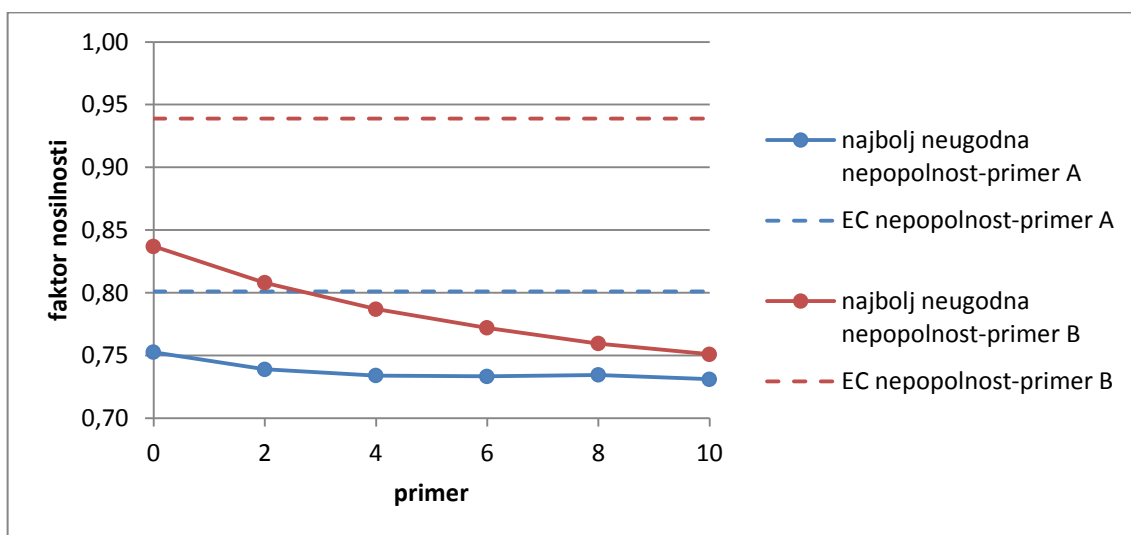
Preglednica 100: Amplitude in ukrivljenosti nepopolnih pločevin ter sprememba faktorja nosilnosti (en polval)-način B

B	$e_{0,max}$ [mm]	$K_{X0,max}$ [1/mm]	$K_{Y0,max}$ [1/mm]	e_0 [mm]	K_{X0} [1/mm]	K_{Y0} [1/mm]	faktor nosilnosti	sprememba [%]
EC	3,63	0,64	0,77	3,63	1,68	0,16	0,939	0,00
0	3,63	0,64	0,77	2,15	0,64	0,77	0,837	10,86
2		0,92	1,03	3,50	0,92	1,03	0,808	13,95
4		1,20	1,28	3,34	1,20	1,28	0,787	16,19
6		1,48	1,54	3,46	1,48	1,54	0,772	17,78
8		1,77	1,79	3,63	1,77	1,79	0,760	19,12
10		2,05	2,05	3,63	2,05	1,32	0,751	20,02



Slika 71: Omejitve ukrivljenosti in dosežene vrednosti ukrivljenosti v obeh smereh pločevine-način B

Nosilnosti pločevin v obeh primerih z večanjem dovoljenih vrednosti ukrivljenosti pada. Večji relativni padec med primeri zaznamo v primeru B (lokalno en polval v vzdolžni smeri). Absolutno pa je nosilnost nižja v primeru pločevin, kjer začetno obliko nepopolnosti opišemo z dvema polvaloma v vzdolžni smeri. Razlika med faktorjema nosilnosti obeh načinov EC nepopolnosti (način A in B) znaša 17%. Glede na zapis začetne oblike je faktor nosilnosti najbolj enugodne oblike nepopolnosti načina B v analizi 0 višji od faktorja načina A za 11%, v primeru 10 z doseženimi največjimi amplitudami nepopolnosti in ukrivljenostmi pa 2,5%. Bolj neugoden način začetne oblike je kombinacija globalne in lokalne oblike z dvema polvaloma v vzdolžni smeri panela.



Slika 72: Spreminjanje faktorja nosilnosti z večanjem omejitev ukrivljenosti za oba načina A in B

6.6 Zaključek

Standard Evrokod jasno definira predlog oblike začetne nepopolnosti pločevin z razmerjem stranic $\alpha=1$. Pri analizi pločevine z dvema ojačitvama z razmerjem stranic $\alpha=0,5$ pa so stranice podpanela razmerja 1,5. V tem primeru bi po predlogu standarda morali definirati en val in pol v vzdolžni smeri podpanela. Začetno obliko poenostavimo in vrednost razmerja zaokrožimo navzgor, tako da dobimo obliko z dvema polvaloma. Faktor nosilnosti pločevine s tako lokalno nepopolnostjo je za 17% nižji od lokalne nepopolnosti z enim polvalom. Če standard ne predlaga naravnega števila polvalov je smiselno vrednost zaokrožiti navzgor, saj je nosilnost pločevine s tako obliko nepopolnosti nižja.

Oblika najbolj neugodne začetne nepopolnosti je odvisna od izbire nastavkov, oblike začetne nepopolnosti, vitkosti pločevine, togosti ojačitev in razmerja stranic panela. Z večanjem vitkosti panela, se večja občutljivost pločevine na izbočitev (večja relativna vitkost). Kadar vitko pločevine ojačimo s šibkimi vzdolžnimi ojačitvami imajo večji vpliv globalne oblike nepopolnosti. Z večanjem togosti ojačitev so bolj pomembne lokalne oblike nepopolnosti. Še posebej dobro je viden vpliv togosti ojačitev v primeru obravnavanih pločevin z razmerjem stranic $\alpha=1$, kjer imajo z večanjem togosti ojačitev lokalne oblike nepopolnosti večji vpliv na najbolj neugodno obliko nepopolnosti (Preglednica 86). Veliko obravnavanih primerov se tekom optimizacije oblike nepopolnosti z desetimi koraki oddalji od oblike, ki jo predlaga standard Evrokod. V primeru pločevin z razmerjem stranic $\alpha=0,5$, kjer smo začetno nepopolnost po Evrokodu zapisali z dvema polvaloma, pa v večini analiz oblika nepopolnosti tudi po desetih iteracijah še vedno izgleda zelo podobno kot EC nepopolnost. Sprememba oblike je posledica povečanja največje dovoljene ukrivljenosti pločevine. Kadar začetno nepopolnost opišemo z enim polvalom, optimizacija najbolj neugodne oblike nepopolnosti določi obliko z dvema polvaloma. Za določen primer smo glede na način zapisa nastavkov nepopolnosti med reševanjem optimizacijskega problema dobili dve popolnoma različni obliki, za katere pa je bil faktor nosilnosti skoraj enak (največje odstopanje 1,3%).

Faktorja redukcije polnoplastične nosilnosti analiz z EBPlate-om in po postopku iz Evrokoda imata v vseh primerih približno enako vrednost (Slika 66 in Slika 69). Nosilnost pločevin, ki imajo začetno nepopolnost po predlogu Evrokoda, je v vseh primerih najvišja. Najvišja razlika glede na nosilnost po EC postopku znaša v primerih pločevin $\alpha=1$ z najvišjo vitkostjo podpanelov okoli 17%, v primeru $\alpha=0,5$ pa 23,5%. Pri pločevinah z razmerjem stranic $\alpha=1$ je obtežni faktor najbolj neugodne oblike nepopolnosti med krivuljama faktorjev nosilnosti pločevin z EC nepopolnostjo in faktorjev nosilnosti določenimi z EC postopkom. V povprečju je nosilnost pločevine z najbolj neugodno začetno nepopolnostjo približno 8% nižja od nosilnosti pločevin z nepopolnostmi po Evrokodu. Pri višjih togostih vzdolžnih ojačitev je v primeru majhne vitkosti podpanelov redukcija najbolj neugodne nepopolnosti višja od redukcije z EC postopkom. Pri pločevinah z $\alpha=0,5$ se nosilnost pločevine z EC nepopolnostjo približa nosilnosti pločevine z najbolj neugodno obliko nepopolnosti, vendar vseeno odstopa za največ 10,1%. Rezultati redukcije nosilnosti dobljeni s programom EBPlate so primerljivi z rezultati numeričnih analiz pločevin z EC nepopolnostjo. Z večanjem togosti vzdolžnih ojačitev tlačna nosilnost pločevin narašča, z večanjem vitkosti pa pada.

Z večanjem največjih dovoljenih ukrivljenosti nepopolne oblike, faktor tlačne nosilnosti vztrajno pada (Slika 71). Analizo vpliva omejitev ukrivljenosti smo izvedli na pločevini z razmerejm stranic $\alpha=0,5$. Večji relativni padec med analizami z večanjem ukrivljenosti zaznamo v primerih, kjer začetno lokalno nepopolnost opišemo z enim polvalom v vzdolžni smeri podpanela. Nižjo nosilnost pločevin pa dosežemo pri pločevinah, kjer začetno lokalno nepopolnost opišemo z dvema polvaloma v vzdolžni smeri. Razlika med faktorjema nosilnosti obeh načinov definicije začetne nepopolnosti (EC nepopolnost) znaša 17%. Faktorja nosilnosti najbolj neugodnih oblik nepopolnosti se med seboj razlikujeta za 11% pri najbolj strogi omejitvi ukrivljenosti, in 2,5% pri najbolj mili omejitvi ukrivljenosti. Bolj neugoden način začetne oblike je kombinacija globalne in lokalne oblike z dvema polvaloma v vzdolžni smeri panela.

7 SKLEP

Analiza najbolj neugodne nepopolnosti pločevin s predstavljeno metodo je dolgotrajna, zato še ni primerna za vsakdanjo inženirsko uporabo. Faktor nosilnosti pločevine z najbolj neugodno začetno nepopolnostjo, ki predstavlja rešitev optimizacijskega problema zapisanega v programu Mathematica z dodatkom AceFEM, je v primeru čistega striga in čistega tlaka nižji od faktorja nosilnosti pločevine, kjer smo nepopolnost zapisali po predlogu standarda.

Povečanje dovoljenih ukrivljenosti nepopolne geometrije pločevin povzroči znižanje nosilnosti pločevine s tako nepopolnostjo. Vrednost faktorja nosilnosti se skoraj linearno manjša v obeh primerih obremenjevanja. Omejitev ukrivljenosti, ki smo jo določili s pomočjo izmaknjene sinusne krivulje, omogoča oblike nepopolnosti, kjer je vrednost faktorja nosilnosti v primerjavi z EC nepopolnostjo nižji tudi do 16% v primeru striga in do 8% v primeru tlaka. Po našem mnenju ta omejitev dopušča prevelike vrednosti ukrivljenosti, poleg tega pa je verjetnost, da bo oblika nepopolnosti hkrati dosegla omejitev amplitude nepopolnosti in ukrivljenosti zelo majhna. Zato se nam bolj smiselni zdijo rezultati, ko je omejitev največje ukrivljenosti strožja.

Ugotovili smo, da so najbolj neugodne optimizirane oblike nepopolnosti zelo podobne deformacijskim oblikam pločevine v mejnem stanju. Deformacijski obliki pločevin z EC nepopolnostjo in najbolj neugodno nepopolnostjo sta podobni, razlikujejo se le dosežene največje amplitude nepopolnosti in ukrivljenosti deformirane pločevine. Alternativni postopek določitve najbolj neugodne nepopolnosti bi bil transformacija oblike deformacij (kjer nepopolnost zapišemo s predlogom standarda) v obliko nepopolnosti tako, da ustreza omejitvam največjih amplitud nepopolnosti in ukrivljenosti. Prilagojeno deformacijsko obliko bi uporabili kot nastavek začetne nepopolnosti pločevine in izračunali njeno nosilnost.

V diplomskem delu smo se v primeru striga ukvarjali le s pločevinami z razmerjem stranic $\alpha=1$, zato bi bilo smiselno, da se v prihodnosti izvede tudi analiza z manjšim ali večjim razmerjem stranic. Pri tlačno obremenjenih pločevinah smo račun pločevin z razmerjem $\alpha=2$ prekinili, saj smo za analizo ene same pločevine porabili okoli 20 računskih ur precej zmogljivega računalnika (optimizacijo smo omejili na deset iteracijskih korakov). Zato bi bilo ob priložnosti smiselno izvesti še obsežno parametrično študijo tovrstnih pločevin. V vseh izvedenih analizah smo analizirali vpliv enostavnih ploščatih vzdolžnih ojačitev, zato bi bilo zanimivo preveriti še vpliv vzdolžnih ojačitev T ali trapezne oblike.

VIRI

Beg, D., Kuhlmann, U., Davaine, L., Braun, B. 2010. Design of Plated Structures. Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1-5 – Design of Plated Structures, 1st edition, Brussels, ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, Berlin, Ernst & Sohn: 271 str.

Brecelj, M. 2012. Analiza upogibno obremenjenih vzdolžno ojačanih polnostenskih nosilcev. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Brecelj): 106 str.

Johansson, B., Maquoi, R., Sedlacek, G., Müller, C., Beg, D., 2007. Commerntary and worked examples to EN 1993-1-5 »Plated structural elements«, 1st edition, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, Joint Research Centre European Commision: 226 str.

Klöppel, K., Scheer, J. 1960. Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten, Band I. Berlin, Ernst & Sohn Verlag: loč. pag.

Kristanič, N. 2008. Sinteza konstrukcij z uporabo točne občutljivostne analize in optimizacije oblike v nelinearnem področju. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 148 str.

Kristanič, N., Korelc, J. 2008. Optimization method for the determination of the most unfavorable imperfection of structures. Comput. Mech., DOI:10.1007/s00466-008-0288-9.

Korelc, J. 2010. AceFEM, Mathematica finite element environment. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

<http://www.fgg.uni-lj.si/Symech/>

(Pridobljeno 15. 12. 2012)

Kuhlmann, U., Beg, D., Zizza, A., Sinur, F., Rejec, K. 2012. Tragverhalten von Blechen mit Längssteifen unter Interaktion von Biegemoment und Querkraft. Raziskovalno delo. Stuttgart: Universität, Institut für Konstruktion und Entwurf: 18 str.

Piculin, S., 2013. Vpliv togosti prečnih ojačitev na obnašanje polnostenskih nosilcev. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Piculin): 101 str.

Standardi:

SIST EN 1993-1-5: 2007. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-5. del: Elementi pločevinaste konstrukcije. Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo.

Programska oprema:

Wolfram. 2011. Mathematica 6.0, The user guide. Wolfram Research, Inc.

Center Technique Industriel de la Construction Metallique, 2010. EBPlate Version: v2.01.

SEZNAM PRILOG

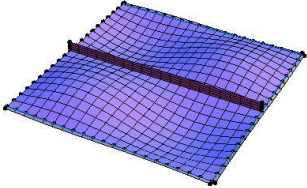
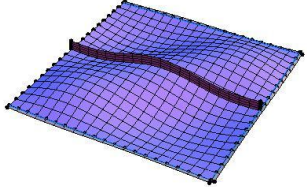
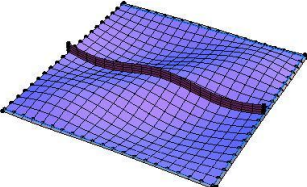
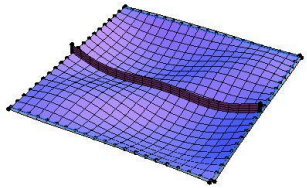
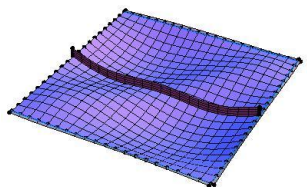
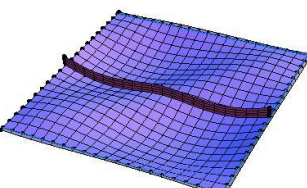
Priloga A: Oblike začetnih nepopolnosti v odvisnosti od reda Fourierjevih ali ročnih nastavkov

Priloga B: Sprememba oblike najbolj neugodne nepopolnosti z večanjem največje dovoljene ukrivljenosti pločevine

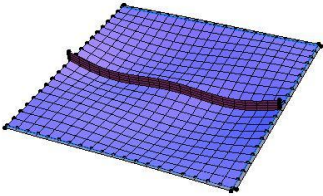
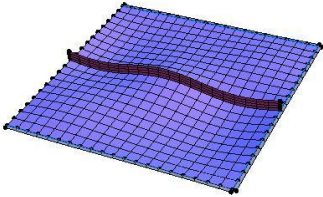
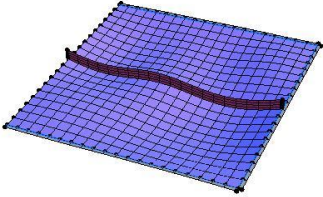
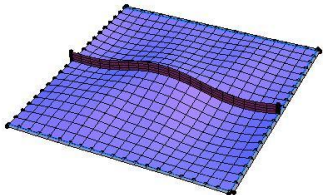
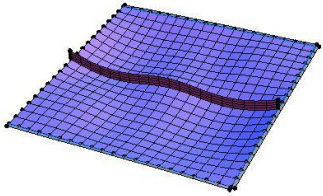
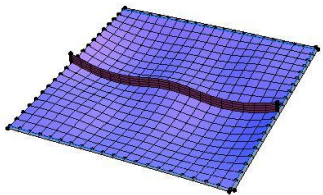
PRILOGE

Priloga A: Oblike začetnih nepopolnosti v odvisnosti od reda Fourierjevih ali ročnih nastavkov

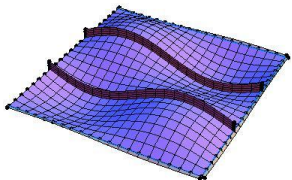
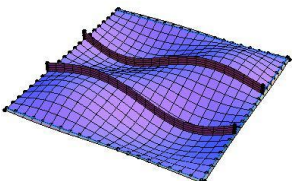
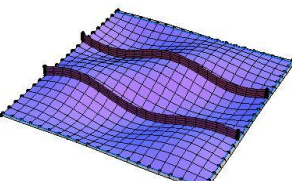
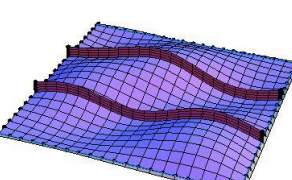
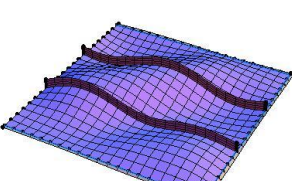
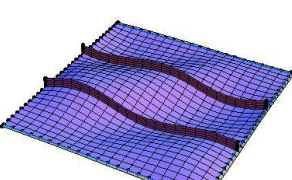
Preglednica 101: Red Fourierjevih nastavkov, število Fourierjevih nastavkov v bazi oblik in oblika nepopolne pločevine ter primerjava nosilnosti s priporočilom iz standarda za primer pločevine z eno vzdolžno ojačitvijo

Red nastavkov	Število nastavkov	Oblika nepopolnosti	Faktor nosilnosti	Razlika od EC [%]
EC	/		0,674	/
2	4		0,671	0,4
3	9		0,652	3,3
4	16		0,644	4,5
5	25		0,640	5,0
6	36		0,638	5,5
7	49		0,637	5,8

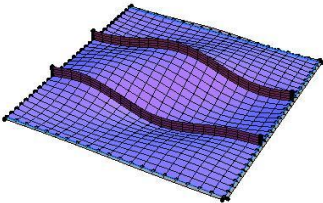
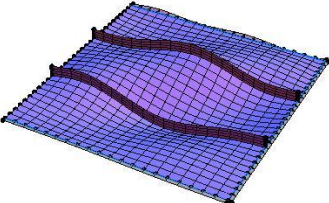
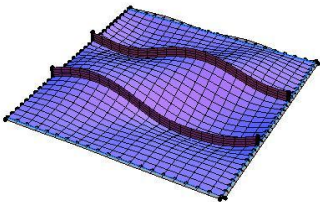
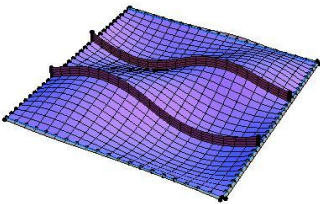
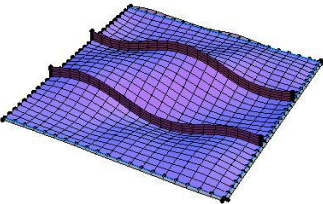
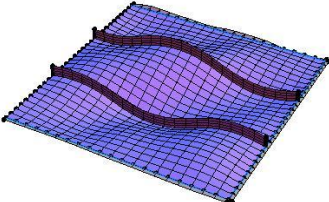
Preglednica 102: Red ročnih nastavkov, število ročnih nastavkov v bazi oblik in oblika nepopolne pločevine ter primerjava nosilnosti s priporočilom iz standarda za primer pločevine z eno vzdolžno ojačitvijo

Red nastavkov	Število nastavkov	Oblika nepopolnosti	Faktor nosilnosti	Razlika od EC [%]
EC	/		0,674	/
3	9		0,669	0,7
5	15		0,625	7,3
6	18		0,667	1,0
8	24		0,666	1,2
10	30		0,664	1,5
12	36		0,665	1,3

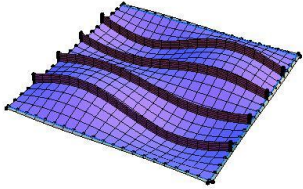
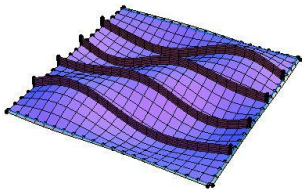
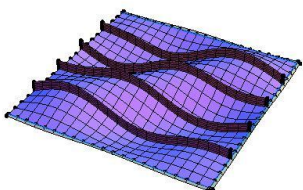
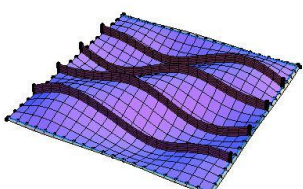
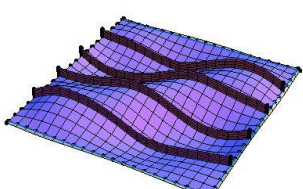
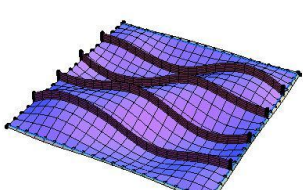
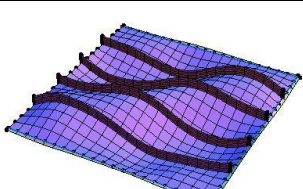
Preglednica 103: Red Fourierjevih nastavkov, število Fourierjevih nastavkov v bazi oblik in oblika nepopolne pločevine ter primerjava nosilnosti s priporočilom iz standarda za primer pločevine z dvema vzdolžnima ojačitvijama

Red nastavkov	Število nastavkov	Oblika nepopolnosti	Faktor nosilnosti	Razlika od EC [%]
EC	/		0,846	/
2	4		0,696	17,7
3	9		0,763	9,8
4	16		0,752	11,1
5	25		0,751	11,2
6	36		0,746	11,8
7	49		0,743	12,2

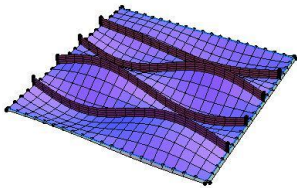
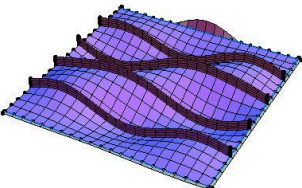
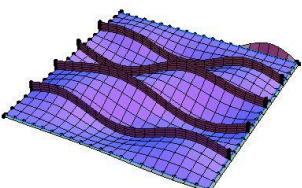
Preglednica 104: Red ročnih nastavkov, število ročnih nastavkov v bazi oblik in oblika nepopolne pločevine ter primerjava nosilnosti s priporočilom iz standarda za primer pločevine z dvema vzdolžnima ojačitvama

Red nastavkov	Število nastavkov	Oblika nepopolnosti	Faktor nosilnosti	Razlika od EC [%]
EC	/		0,846	/
3	18		0,747	11,7
4	24		0,746	11,8
6	36		0,739	12,6
8	48		0,684	19,1
10	60		0,735	13,1
12	72		0,733	13,4

Preglednica 105: Red Fourierjevih nastavkov, število Fourierjevih nastavkov v bazi oblik in oblika nepopolne pločevine ter primerjava nosilnosti s priporočilom iz standarda za primer pločevine s štirimi vzdolžnimi ojačitvami

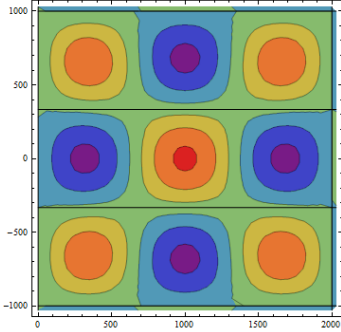

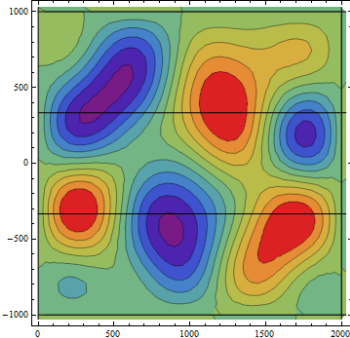
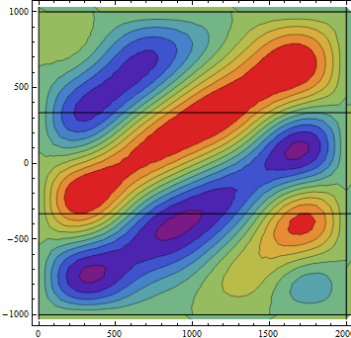

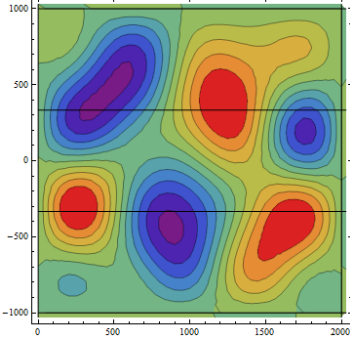
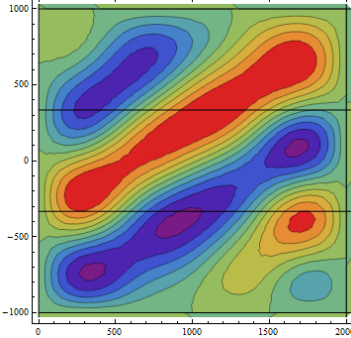

Red nastavkov	Število nastavkov	Oblika nepopolnosti	Faktor nosilnosti	Razlika od EC [%]
EC	/		0,999	/
2	4		0,989	1,0
3	9		0,969	3,0
4	16		0,957	4,2
5	25		0,956	4,3
6	36		0,953	4,6
7	49		0,951	4,8
8	64		0,949	5,0

Preglednica 106: Red ročnih nastavkov, število ročnih nastavkov v bazi oblik in oblika nepopolne pločevine ter primerjava nosilnosti s priporočilom iz standarda za primer pločevine s štirimi vzdolžnimi ojačitami

Red nastavkov	Število nastavkov	Oblika nepopolnosti	Faktor nosilnosti	Razlika od EC [%]
EC	/		0,999	/
2	30		0,953	4,6
3	45		0,941	5,8
4	60		0,939	6,0

Priloga B: Sprememba oblike najbolj neugodne nepopolnosti z večanjem največje dovoljene ukrivljenosti pločevine

Preglednica 107: Primerjava najbolj neugodnih oblik nepopolnosti, velikosti ukrivljenosti in misesovih napetosti izbranih analiz pločevin

analiza	Ukrivljenost okoli osi x	Ukrivljenost okoli osi y	
EC			
0			
4			
10	