

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidatka:

Tanja Vesel

Duktilnost centričnih povezij

Diplomska naloga št.: 3038

Mentor:
prof. dr. Darko Beg

Ljubljana, 24. 11. 2008

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **TANJA VESEL** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
»DUKTILNOST CENTRIČNIH POVEZIJ«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 4.11.2008

(podpis)

ZAHVALA

Za vodenje in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge se najprej iskreno zahvaljujem mentorju, prof. dr. Darku Begu.

Zahvala gre tudi vsem sodelavcem Katedre za metalne konstrukcije, še posebno Franciju Sinurju ter Primožu Možetu za pomoč pri številnih problemih, ki so se pojavljali tekom izdelave diplomske naloge.

Na koncu bi se rada za podporo skozi vsa leta dosedanjega študija iskreno zahvalila tudi svoji družini in prijateljem.

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	6124.078(043.2)
Avtor:	Tanja Vesel
Mentor:	prof. dr. Darko Beg
Naslov:	Duktilnost centričnih povezij
Obseg in oprema:	84 str., 19 preg., 194 sl., 20 en.
Ključne besede:	centrična povezja, vitkost, uklonska nosilnost, ciklično obremenjevanje

Izvleček

V diplomski nalogi so prikazani rezultati numeričnih simulacij okvira s centričnim povezjem, ki služijo kot predhodna ocena za kasnejše laboratorijske teste. Numerične simulacije so bile izvedene s programskim paketom Abaqus. Izvedene nelinearne analize so upoštevale tako geometrijsko kot materialno nelinearnost. Glavni namen diplomske naloge je bil podati zadosti natančno oceno obnašanja okvira s centričnim povezjem, s poudarkom na obnašanju tlačne diagonale.

Skupno je bilo izvedenih skoraj 100 nelinearnih analiz z monotonim obremenjevanjem ter 6 nelinearnih analiz s cikličnim obremenjevanjem. Bistveni parametri, ki so se spreminjali tekom simulacij, so bili pogoji priključevanja in spajanja diagonal (togi in členkasti stiki) ter s tem povezana vitkost diagonal in oblika prečnega prereza diagonal. Tako smo modelirali 6 kotnikov, 5 U profilov ter 5 SHS profilov. Obravnavali smo vpliv bistvenih parametrov na uklonsko nosilnost tlačene diagonale, na nosilnost tlačene diagonale v post-kritičnem področju ter na poškodovanost diagonal. Za oceno poškodovanosti diagonal smo uporabili dva parametra in sicer največji pomik tlačene diagonale v smeri uklona, normiran z uklonsko dolžino diagonale ter največje dosežene plastične deformacije v tlačeni diagonalni.

Izvedena je tudi primerjava numeričnih rezultatov z vrednostmi, določenimi po standardu SIST EN 1998-1-1 ter po priporočilih ameriškega združenja AISC.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 6124.078(043.2)
Author: Tanja Vesel
Supervisor: prof. dr. Darko Beg
Title: Ductility of concentric braces
Notes: 84 p., 19 tab., 194 fig., 20 eq.
Key words: concentric braces, slenderness, buckling strength, cyclic loading

Abstract

This graduation thesis describes the results of numerical simulations of concentrically braced frames, which were performed as preliminary estimation for experiments that will be carried out in the future. Numerical simulations were performed with Abaqus software. Nonlinear analysis included geometrical as well as material nonlinearity. The main purpose of this graduation thesis was to present an assessment of the behaviour of concentrically braced frames, with special concern in compression members.

Almost 100 nonlinear analysis were performed, which included monotonic loading of the frame and 6 analysis with cyclic loading. The main parameters, which vary in the analysis, were the end conditions of the braces (rigid or pinned), slenderness of elements and the shape of the cross-section of the braces. There were six angle (L-shaped), five channel (U-shaped) and 5 SHS cross-sections used in the analysis. The influence of these parameters on the brace buckling strength, post-buckling resistance and the damage on compression brace was examined. To determine the damage on compression members, we used two parameters: the maximum in-plane and out-of-plane deformations of compression brace and maximum plastic strains, which developed in the compression brace during loading.

Comparison between numerical results and values, determined by SIST EN 1993-1-1 and by AISC recommendations was also performed.

KAZALO VSEBINE

KAZALO SLIK	XI
KAZALO PREGLEDNIC	XVII
SEZNAM UPORABLJENIH OZNAK.....	XVIII
1 UVOD.....	1
2 SPLOŠNI PRINCIPI DIMENZIONIRANJA CENTRIČNIH POVEZIJ	3
2.1 NATEZNA NOSILNOST.....	3
2.2 TLAČNA NOSILNOST	4
2.3 VITKOST.....	5
2.3.1 Vitkost pri upogibnem uklonu.....	5
2.3.2 Vitkost pri upogibno-torzijskem uklonu.....	6
2.4 POSEBNA PRAVILA ZA DIMEZIONIRANJE CENTRIČNIH POVEZIJ	7
2.4.1 SIST EN 1998-1	7
2.4.2 AISC.....	8
3 NUMERIČNA ANALIZA.....	11
3.1 ZASNOVA LABORATORIJSKIH TESTOV	11
3.1.1 Obremenilni okvir.....	11
3.1.2 Geometrijske karakteristike prečnih prerezov diagonal.....	12
3.1.2.1 Kotniki	12
3.1.2.2 U profili.....	13
3.1.2.3 SHS cevi.....	14
3.2 NUMERIČNO MODELIRANJE	15
3.2.1 Splošno o modeliranju.....	15
3.2.2 Modeliranje materiala.....	15
3.2.3 Modeliranje robnih pogojev, spojev ter obremenitve	17
3.2.4 Začetne geometrijske nepopolnosti.....	19
3.2.5 Kalibracija mreže in izbira končnih elementov	23
4 REZULTATI NUMERIČNIH SIMULACIJ.....	25
4.1 MONOTONO OBREMENJEVANJE	25
4.1.1 Kotniki	26
4.1.1.1 Tlačna diagonalna	34
4.1.1.2 Natezna diagonalna	39
4.1.1.3 Horizontalna reakcija na okvir	40
4.1.2 U profili	41

4.1.2.1	Tlačna diagonala.....	45
4.1.2.2	Natezna diagonala.....	48
4.1.2.3	Horizontalna reakcija na okvir.....	49
4.1.3	<i>SHS</i> profili	50
4.1.3.1	Tlačna diagonala.....	55
4.1.3.2	Natezna diagonala.....	57
4.1.3.3	Horizontalna reakcija na okvir.....	58
4.2	CIKLIČNO OBREMENJEVANJE.....	59
5	ZAKLJUČKI.....	73
	VIRI.....	75
	PRILOGE.....	77
	SILE V KOTNIKIH.....	77
	SILE V U PROFILIH	80
	SILE V SHS PROFILIH.....	82

KAZALO SLIK

SLIKA 1: PRIMERJAVA UKLONSKIH KRIVULJ.....	5
SLIKA 2: PRIKLJUČEK DIAGONALE	9
SLIKA 3: OBREMENILNI OKVIR	12
SLIKA 4: DIMENZIJE PREČNEGA PREREZA KOTNIKA	13
SLIKA 5: EKSCENTRIČNO PRIKLJUČEVANJE KOTNIKA.....	13
SLIKA 6: DIMEZIJE PREČNEGA PREREZA U-PROFILA.....	14
SLIKA 7: EKSCENTRIČNO PRIKLJUČEVANJE U-PROFILA.....	14
SLIKA 8: DIMENZIJE PREČNEGA PREREZA SHS CEVI	15
SLIKA 9: PRIKLJUČEVANJE SHS CEVI.....	15
SLIKA 10: ELASTO-PLASTIČNI DIAGRAM JEKLA S235.....	16
SLIKA 11: BILINEARNI ELASTO-PLASTIČNI DIAGRAM JEKLA S235.....	16
SLIKA 12: ROBNI POGOJI	17
SLIKA 13: POTEK POMIKA PRI MONOTONEM OBREMENJEVANJU	19
SLIKA 14: POTEK POMIKA PRI CIKLIČNEM OBREMENJEVANJU	19
SLIKA 15: 1. UKLONSKA OBLIKA – L (IA)	20
SLIKA 16: 1. UKLONSKA OBLIKA – L (IB)	20
SLIKA 17: 1. UKLONSKA OBLIKA – L (IIC).....	20
SLIKA 18: 1. UKLONSKA OBLIKA – L (IID).....	20
SLIKA 19: 1. UKLONSKA OBLIKA – L (IIE)	20
SLIKA 20: 1. UKLONSKA OBLIKA – L (IIF)	20
SLIKA 21: 1. UKLONSKA OBLIKA – U (IA).....	21
SLIKA 22: 1. UKLONSKA OBLIKA – U (IB).....	21
SLIKA 23: 1. UKLONSKA OBLIKA – U (IIC).....	21
SLIKA 24: 1. UKLONSKA OBLIKA – U (IID)	21
SLIKA 25: 1. UKLONSKA OBLIKA – U (IIE).....	21
SLIKA 26: 1. UKLONSKA OBLIKA – U (IIF).....	21
SLIKA 27: 1. UKLONSKA OBLIKA – SHS (IA)	22
SLIKA 28: 1. UKLONSKA OBLIKA – SHS (IB).....	22
SLIKA 29: 1. UKLONSKA OBLIKA – SHS (IIC)	22
SLIKA 30: 1. UKLONSKA OBLIKA – SHS (IID).....	22
SLIKA 31: 1. UKLONSKA OBLIKA – SHS (IIE)	22
SLIKA 32: 1. UKLONSKA OBLIKA – SHS (IIF).....	22
SLIKA 33: PRIMERJAVA HORIZONTALNIH REAKCIJ NA OKVIR	23
SLIKA 34: PRIMERJAVA SIL V NATEZNI DIAGONALI	23
SLIKA 35: PRIMERJAVA SIL V TLAČNI DIAGONALI	24
SLIKA 36: PRIMERJAVA POMIKOV SREDINSKE TOČKE TLAČNE DIAGONALE IZVEN RAVNINE	24

SLIKA 37: ODVISNOST ŠTEVILA KE OD GOSTOTE MREŽE KE.....	24
SLIKA 38: L 100/100/10 (IA)	28
SLIKA 39: L 70/70/7 (IA)	28
SLIKA 40: L 40/40/4 (IA)	29
SLIKA 41: L 100/100/10 (IB)	29
SLIKA 42: L 70/70/7 (IB)	29
SLIKA 43: L 40/40/4 (IB)	30
SLIKA 44: L 100/100/10 (IIC)	30
SLIKA 45: L 70/70/7 (IIC)	30
SLIKA 46: L 40/40/4 (IIC)	31
SLIKA 47: L 100/100/10 (IID).....	31
SLIKA 48: L 70/70/7 (IID).....	31
SLIKA 49: L 40/40/4 (IID).....	32
SLIKA 50: L 100/100/10 (IIE)	32
SLIKA 51: L 70/70/7 (IIE)	32
SLIKA 52: L 40/40/4 (IIE)	33
SLIKA 53: L 100/100/10 (IIF)	33
SLIKA 54: L 70/70/7 (IIF)	33
SLIKA 55: L 40/40/4 (IIF)	34
SLIKA 56: POTEK SILE V TLAČNI DIAGONALI (L 100/100/10).....	35
SLIKA 57: POTEK SILE V TLAČNI DIAGONALI (L 70/70/7).....	35
SLIKA 58: POTEK SILE V TLAČNI DIAGONALI (L 40/40/4).....	35
SLIKA 59: UKLONSKE SILE KOTNIKOV	35
SLIKA 60: SILA V TLAČNI DIAGONALI PRI $\phi = 0,01$	36
SLIKA 61: SILA V TLAČNI DIAGONALI PRI $\phi = 0,04$	36
SLIKA 62: SILA V TLAČNI DIAGONALI PRI $\phi = 0,08$	36
SLIKA 63: NAJVEČJI NORMIRANI POMIKI TLAČNE DIAGONALE V SMERI UKLONA (L 100/100/10).....	37
SLIKA 64: NAJVEČJE PLASTIČNE DEFORMACIJE V TLAČNI DIAGONALI (L 100/100/10)	37
SLIKA 65: NAJVEČJI NORMIRANI POMIKI TLAČNE DIAGONALE V SMERI UKLONA (L 70/70/7).....	37
SLIKA 66: NAJVEČJE PLASTIČNE DEFORMACIJE V TLAČNI DIAGONALI (L 70/70/7)	37
SLIKA 67: NAJVEČJI NORMIRANI POMIKI TLAČNE DIAGONALE V SMERI UKLONA (L 40/40/4).....	38
SLIKA 68: NAJVEČJE PLASTIČNE DEFORMACIJE V TLAČNI DIAGONALI (L 40/40/4)	38
SLIKA 69: NAJVEČJI NORMIRANI POMIKI V SMERI UKLONA PRI $\phi = 0,01$	38
SLIKA 70: NAJVEČJI NORMIRANI POMIKI V SMERI UKLONA PRI $\phi = 0,04$	38
SLIKA 71: NAJVEČJI NORMIRANI POMIKI V SMERI UKLONA PRI $\phi = 0,08$	39
SLIKA 72: SILA V NATEZNI DIAGONALI (L 100/100/10)	39
SLIKA 73: SILA V NATEZNI DIAGONALI (L 70/70/7)	39
SLIKA 74: SILA V NATEZNI DIAGONALI (L 40/40/4)	40

SLIKA 75: POTEK SILE V NATEZNI DIAGONALI PRI RAZLIČNIH VITKOSTIH.....	40
SLIKA 76: HORIZONTALNA REAKCIJA NA OKVIR (L 100/100/10).....	40
SLIKA 77: HORIZONTALNA REAKCIJA NA OKVIR (L 70/70/7).....	40
SLIKA 78: HORIZONTALNA REAKCIJA NA OKVIR (L 40/40/4).....	41
SLIKA 79: POTEK HORIZONTALNE REAKCIJE PRI RAZLIČNIH VITKOSTIH	41
SLIKA 80: U 100 (IA).....	42
SLIKA 81: U 50 (IA).....	42
SLIKA 82: U 100 (IB).....	43
SLIKA 83: U 50 (IB).....	43
SLIKA 84: U 100 (IIC).....	43
SLIKA 85: U 50 (IIC)	43
SLIKA 86: U 100 (IID).....	44
SLIKA 87: U 50 (IID)	44
SLIKA 88: U 100 (IIE).....	44
SLIKA 89: U 50 (IIE).....	44
SLIKA 90: U 100 (IIF).....	44
SLIKA 91: U 50 (IIF).....	44
SLIKA 92: SILA V TLAČNI DIAGONALI (U 50).....	45
SLIKA 93: SILA V TLAČNI DIAGONALI (U 100).....	45
SLIKA 94: UKLONSKE SILE U PROFILOV	45
SLIKA 95: SILA V TLAČNI DIAGONALI PRI $\phi = 0,01$	45
SLIKA 96: SILA V TLAČNI DIAGONALI PRI $\phi = 0,04$	46
SLIKA 97: SILA V TLAČNI DIAGONALI PRI $\phi = 0,08$	46
SLIKA 98: NAJVEČJI NORMIRANI POMIKI TLAČENE DIAGONALE (U 50)	46
SLIKA 99: NAJVEČJE PLASTIČNE DEFORMACIJE V TLAČENI DIAGONALI (U 50).....	46
SLIKA 100: NAJVEČJI NORMIRANI POMIKI TLAČENE DIAGONALE (U 100)	47
SLIKA 101: NAJVEČJE PLASTIČNE DEFORMACIJE V TLAČENI DIAGONALI (U 100).....	47
SLIKA 102: NAJVEČJI NORMIRANI POMIKI TLAČENE DIAGONALE PRI $\phi = 0,01$	47
SLIKA 103: NAJVEČJI NORMIRANI POMIKI TLAČENE DIAGONALE PRI $\phi = 0,04$	47
SLIKA 104: NAJVEČJI NORMIRANI POMIKI TLAČENE DIAGONALE PRI $\phi = 0,08$	48
SLIKA 105: SILA V NATEZNI DIAGONALI (U 50).....	48
SLIKA 106: SILA V NATEZNI DIAGONALI (U 100).....	48
SLIKA 107: POTEK SILE V NATEZNI DIAGONALI PRI RAZLIČNIH VITKOSTIH.....	49
SLIKA 108: HORIZONTALNA REAKCIJA NA OKVIR (U 50)	49
SLIKA 109: HORIZONTALNA REAKCIJA NA OKVIR (U 100)	49
SLIKA 110: POTEK HORIZONTALNIH REAKCIJ PRI RAZLIČNIH VITKOSTIH.....	50
SLIKA 111: SHS 100/100/5 (IA)	51
SLIKA 112: SHS 70/70/4 (IA)	51

SLIKA 113: SHS 50/50/2 (IA)	52
SLIKA 114: SHS 100/100/5 (IB).....	52
SLIKA 115: SHS 70/70/7 (IB).....	52
SLIKA 116: SHS 50/50/2 (IB).....	52
SLIKA 117: SHS 100/100/5 (IIC)	53
SLIKA 118: SHS 70/70/4 (IIC)	53
SLIKA 119: SHS 50/50/2 (IIC)	53
SLIKA 120: SHS 100/100/5 (IID)	53
SLIKA 121: SHS 70/70/4 (IID)	53
SLIKA 122: SHS 50/50/2 (IID)	53
SLIKA 123: SHS 100/100/5 (IIE)	54
SLIKA 124: SHS 70/70/4 (IIE)	54
SLIKA 125: SHS 50/50/2 (IIE)	54
SLIKA 126: SHS 100/100/5 (IIF).....	54
SLIKA 127: SHS 70/70/4 (IIF).....	54
SLIKA 128: SHS 50/50/2 (IIF).....	54
SLIKA 129: SILA V TLAČNI DIAGONALI (SHS 50/50/2)	55
SLIKA 130: SILA V TLAČNI DIAGONALI (SHS 70/70/4)	55
SLIKA 131: SILA V NATEZNI DIAGONALI (SHS 100/100/5)	55
SLIKA 132: UKLONSKE SILE SHS PROFILOV	56
SLIKA 133: SILA V TLAČNI DIAGONALI PRI $\phi = 0,01$	56
SLIKA 134: SILA V TLAČNI DIAGONALI PRI $\phi = 0,04$	56
SLIKA 135: SILA V TLAČNI DIAGONALI PRI $\phi = 0,08$	56
SLIKA 136: NAJVEČJE PLASTIČNE DEFORMACIJE V TLAČNI DIAGONALI (SHS 50/50/2)	56
SLIKA 137: NAJVEČJE PLASTIČNE DEFORMACIJE V TLAČNI DIAGONALI (SHS 70/70/4)	56
SLIKA 138: NAJVEČJE PLASTIČNE DEFORMACIJE V TLAČNI DIAGONALI (SHS 100/100/5)	57
SLIKA 139: SILA V NATEZNI DIAGONALI (SHS 50/50/2)	57
SLIKA 140: SILA V NATEZNI DIAGONALI (SHS 70/70/4)	57
SLIKA 141: SILA V NATEZNI DIAGONALI (SHS 100/100/5)	58
SLIKA 142: SILA V NATEZNI DIAGONALI PRI RAZLIČNIH VITKOSTIH.....	58
SLIKA 143: HORIZONTALNA REAKCIJA NA OKVIR (SHS 50/50/2).....	58
SLIKA 144: HORIZONTALNA REAKCIJA NA OKVIR (SHS 70/70/4).....	58
SLIKA 145: HORIZONTALNA REAKCIJA NA OKVIR (SHS 100/100/5).....	58
SLIKA 146: HORIZONTALNA REAKCIJA NA OKVIR V ODVISNOSTI OD VITKOSTI	58
SLIKA 147: IA, U = 4 CM.....	60
SLIKA 148: IA, U = 12 CM.....	60
SLIKA 149: IA, U = -12 CM	61
SLIKA 150: IA, U = 20 CM.....	61

SLIKA 151: IA, U = -20 CM	61
SLIKA 152: IA, U = 0 CM.....	61
SLIKA 153: POTEK SILE V TLAČNI IN NATEZNI DIAGONALI (IA)	61
SLIKA 154: POTEK HORIZONTALNE REAKCIJE (IA)	62
SLIKA 155: IB, U = 4CM	62
SLIKA 156: IB, U = 12 CM.....	62
SLIKA 157: IB, U = -12 CM	63
SLIKA 158: IB, U = 20 CM.....	63
SLIKA 159: IB, U = -20 CM	63
SLIKA 160: IB, U = 0 CM.....	63
SLIKA 161: POTEK SILE V TLAČNI IN NATEZNI DIAGONALI (IB)	63
SLIKA 162: POTEK HORIZONTALNE REAKCIJE (IB).....	64
SLIKA 163: IIC, U = 4 CM	64
SLIKA 164: IIC, U = 12 CM	64
SLIKA 165: IIC, U = -12 CM	65
SLIKA 166: IIC, U = 20 CM	65
SLIKA 167: IIC, U = -20 CM.....	65
SLIKA 168: IIC, U = 0 CM	65
SLIKA 169: POTEK SILE V TLAČNI IN NATEZNI DIAGONALI (IIC)	66
SLIKA 170: POTEK HORIZONTALNE REAKCIJE (IIC)	66
SLIKA 171: IID, U = 4 CM	67
SLIKA 172: IID, U = 12 CM	67
SLIKA 173: IID, U = -12 CM.....	67
SLIKA 174: IID, U = 20 CM	67
SLIKA 175: IID, U = -20 CM.....	67
SLIKA 176: IID, U = 0 CM	67
SLIKA 177: POTEK SILE V TLAČNI IN NATEZNI DIAGONALI (IID).....	68
SLIKA 178: POTEK HORIZONTALNE REAKCIJE (IID).....	68
SLIKA 179: IIE, U = 4 CM.....	69
SLIKA 180: IIE, U = 12 CM.....	69
SLIKA 181: IIE, U = -12 CM	69
SLIKA 182: IIE, U = 20 CM.....	69
SLIKA 183: IIE, U = -20 CM	69
SLIKA 184: IIE, U = 0	69
SLIKA 185: POTEK SILE V TLAČNI IN NATEZNI DIAGONALI (IIE)	70
SLIKA 186: POTEK HORIZONTALNE REAKCIJE (IIE)	70
SLIKA 187: IIF, U = 4 CM.....	71
SLIKA 188: IIF, U = 12 CM.....	71

SLIKA 189: II _F , U = -12 CM.....	71
SLIKA 190: II _F , U = 20 CM.....	71
SLIKA 191: II _F , U = -20 CM.....	71
SLIKA 192: II _F , U = 0 CM.....	71
SLIKA 193: POTEK SILE V TLAČNI IN NATEZNI DIAGONALI (II _F).....	72
SLIKA 194: POTEK HORIZONTALNE REAKCIJE (II _F).....	72

KAZALO PREGLEDNIC

PREGLEDNICA 1: KOEFICIENT NEPOPOLNOSTI A TER UKLONSKE KRIVULJE	4
PREGLEDNICA 2: ZAHTEVE SIST EN 1993-1-1 ZA 2. RAZRED KOMPAKTNOSTI	8
PREGLEDNICA 3: ZAHTEVE AISC ZA SEIZMIČNO KOMPAKTNOST	9
PREGLEDNICA 4: GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE KOTNIKOV	12
PREGLEDNICA 5: GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE U PROFILOV	13
PREGLEDNICA 6: GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE SHS CEVI	14
PREGLEDNICA 7: NOMINALNE VREDNOSTI NAPETOSTI IN DEFORMACIJ	16
PREGLEDNICA 8: PRAVE VREDNOSTI NAPETOSTI IN DEFORMACIJ	16
PREGLEDNICA 9: UKLONSKE DOLŽINE DIAGONAL	18
PREGLEDNICA 10: VELIKOST NEPOPOLNOSTI	19
PREGLEDNICA 11: STOPNJE POŠKODOVANOSTI OBJEKTA PO PRIPOROČILIH FEMA	26
PREGLEDNICA 12: VELIKOST HORIZONTALNEGA POMIKA ZA RAZLIČNE STOPNJE POŠKODOVANOSTI	26
PREGLEDNICA 13: RELATIVNE VITKOSTI KOTNIKOV PRI UPOGIBNEM IN UPOGIBNO-TORZIJSKEM UKLONU	27
PREGLEDNICA 14: PREGLED SIMULACIJ KOTNIKOV	28
PREGLEDNICA 15: POVPREČNA REDUKCIJA TLAČNE NOSILNOSTI	36
PREGLEDNICA 16: PREGLED SIMULACIJ U-PROFILOV	41
PREGLEDNICA 17: RELATIVNE VITKOSTI U-PROFILOV PRI UPOGIBNEM IN UPOGIBNO-TORZIJSKEM UKLONU	41
PREGLEDNICA 18: PREGLED SIMULACIJ SHS PROFILOV	50
PREGLEDNICA 19: RELATIVNE VITKOSTI SHS PROFILOV PRI UPOGIBNEM UKLONU	51

SEZNAM UPORABLJENIH OZNAK

Postavka	Oznaka
Sila v natezni diagonali	F_n
Sila v tlačni diagonali	F_t
Horizontalna reakcija na okvir	F_R
Natezna nosilnost prereza	$N_{pl,Rd}$
Uklonska nosilnost prereza	$N_{b,Rd}$
Vsiljevan horizontalen pomik	U
Največji pomik tlačne diagonale v smer uklona	u_{max}

1 UVOD

Centrična povezja so eden izmed najbolj učinkovitih in ekonomsko upravičenih sistemov za prevzem horizontalne obtežbe. Obtežbo prenašajo pretežno z osnimi silami, nudijo relativno veliko horizontalno togost okvirja ter v primerjavi z momentnimi okvirji in ekscentričnimi povezji dopuščajo manjše etažne pomike.

Pri dimenzioniranju okvirov s centričnimi povezji se na potresnih območjih uporablja princip načrtovanja nosilnosti, kjer določene elemente dimenzioniramo tako, da v primeru potresne obtežbe energijo disipirajo, istočasno pa moramo zagotoviti, da varovani elementi (stebri, nosilci ter spoji) ostanejo nepoškodovani, t.j. v elastičnem področju. Tako so merodajni vplivi za dimenzioniranje varovanih elementov pravzaprav največji vplivi, ki jih disipativni elementi lahko prenesejo, zato je bistvenega pomena, da z zadostno natančnostjo ocenimo dejansko nosilnost in sposobnost duktilnega obnašanja povezij ter na primeren način upoštevamo možne vire dodatne nosilnosti centričnih povezij.

Centrična povezja disipirajo energijo s plastifikacijo natezne diagonale ter z uklonom tlačne diagonale. Dimenzionirana morajo biti tako, da prenesejo velike neelastične deformacije tako v nategu kot v tlaku. SIST EN 1998-1 sposobnost duktilnega obnašanja centričnih povezij zagotavlja s predpisanim razredom kompaktnosti prečnega prereza ter z omejitvami vitkosti diagonal, pri prevzemu potresne obremenitve pa računsko sodeluje le natezna diagonala, v kateri se izvrši celotna disipacija energije.

Dejansko pa novejša raziskava kažejo, da imajo centrična povezja relativno omejeno duktilnost in sposobnost disipiranja energije, saj so v primeru ciklične obremenitve precej občutljiva na nagle porušitve zaradi lokalnega izbočenja. Poleg tega centrična povezja pri večnadstropnih objektih izkazujejo velike razlike v etažnih pomikih ter nizko sposobnost prerazporeditve plastičnih deformacij po višini objekta. Zato je povečana nevarnost pojava mehke etaže, saj se zaradi redukcije uklonske nosilnosti plastične deformacije koncentrirajo v tistem povezju, v katerem se je uklonila prva diagonala. Problem postane še bolj izrazit, če pri dimenzioniranju centričnih povezij upoštevamo omejitve SIST EN 1998-1 glede največje dovoljene vitkosti elementa, saj je v zgornjih etažah namesto pogoja nosilnosti prečnega

prereza diagonal tako lahko merodajen pogoj vitkosti. To seveda povzroči predimenzioniranje elementov povezja, kar pomeni, da so povezja v nižjih etažah lahko že plastificirana, medtem ko so povezja v vrhnjih etažah še v elastičnem območju.

V diplomski nalogi so predstavljeni rezultati numeričnih simulacij, ki so bile izvedene kot predhodna ocena za kasnejše laboratorijske teste. Osredotočili smo se predvsem na obnašanje tlačne diagonale, konkretno na vpliv priključevanja in spajanja (ter s tem povezane vitkosti diagonal) in na vpliv oblike prečnega prereza diagonal na uklonsko nosilnost, na nosilnost tlačne diagonale v post-kritičnem področju ter na sposobnost duktilnega obnašanja okvira s centričnim povezjem. V ta namen smo spremljali tudi poškodovanost diagonal, katere merilo je bila največja dosežena plastična deformacija v tlačni diagonalni ter največji pomik tlačne diagonale v smeri uklona.

2 SPLOŠNI PRINCIPI DIMENZIONIRANJA CENTRIČNIH POVEZIJ

V sledečem poglavju so najprej predstavljene zahteve ter postopki za dimenzioniranje nateznih in tlačnih elementov ter nato še specifične zahteve za dimenzioniranje centričnih povezij, povzete po standardih EVROKOD in priporočilih AISC (American Institute of Steel Construction).

2.1 Natezna nosilnost

Nosilnost natezne diagonale je v vseh obravnavanih standardih podana kot produkt površine prečnega prereza A ter karakteristične meje plastičnosti f_y . SIST EN 1993-1-1 podaja izraz, po katerem določimo nosilnost prereza, obremenjenega z natezno osno silo:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$

kjer je:

A ... površina prečnega prereza v [cm^2]

f_y ... karakteristična napetost tečenja v [kN/cm^2]

γ_{M0} ... parcialni varnostni faktor, ki je po SIST EN 1993-1-1 enak 1.

Dejanska natezna nosilnost v večini primerov presega projektno vrednost nosilnosti. Dejanska napetost tečenja lahko namreč tudi za 20% ali več presega karakteristično vrednost, poleg tega v zgornjem izrazu ni upoštevana utrditev materiala, ki lahko doprinese k do 10% povečanju natezne nosilnosti. Omeniti je potrebno še hipen vnos obtežbe v primeru potresne obremenitve, zaradi katerega se napetost tečenja še dodatno zviša. Skupno povečanje natezne nosilnosti je tako ocenjeno na 10% do 35% (Elghazouli, 2003).

2.2 Tlačna nosilnost

Nosilnost elementa v tlaku pogojuje uklonska nosilnost. Nosilnost tlačne diagonale je zato v največji meri odvisna od vitkosti diagonale. V ta namen so za redno inženirsko prakso v večini standardov vpeljane uklonske krivulje, ki določajo redukcijo plastične nosilnosti v tlaku.

Standard SIST EN 1993-1-1 podaja za določitev tlačne nosilnosti naslednji izraz:

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{Af_y}{\gamma_{M1}}$$

kjer je χ brezdimenzionalna mejna nosilnost tlačnega elementa, odvisna od brezdimenzionalne vitkosti $\bar{\lambda}$ ter koeficienta nepopolnosti α . Določimo jo po spodnjem izrazu:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \left[\phi^2 - \bar{\lambda}^2 \right]^{0.5}}$$

kjer je:

$$\phi = 0.5 \left[1.0 + \alpha \bar{\lambda} - 0.2 + \bar{\lambda}^2 \right]$$

Koeficient nepopolnosti α določa uklonsko krivuljo posameznega elementa in je odvisen načina izdelave elementa (vroče valjanje, hladno oblikovanje) ter zajema zaostale napetosti ter geometrijske nepopolnosti, povezane z izdelavo elementa.

Preglednica 1: Koeficient nepopolnosti α ter uklonske krivulje

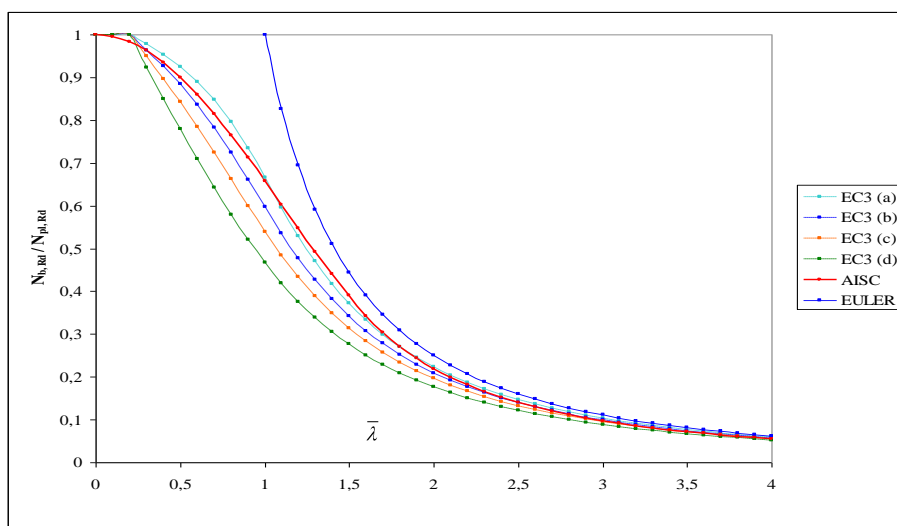
Ukl. krivulja	a_0	a	b	c	d
α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Po priporočilih AISC se uklonska nosilnost določi po izrazu:

$$N_{b,Rd} = Af_y 0.658^{\bar{\lambda}^2} ; \quad \bar{\lambda} \leq 1.5$$

$$N_{b,Rd} = Af_y \left(\frac{0.877}{\bar{\lambda}} \right) ; \quad \bar{\lambda} > 1.5$$

Uklonske sile, določene po priporočilih AISC, so v splošnem bolj konzervativne, saj je vpliv zaostalih napetosti in geometrijskih nepopolnosti na uklonsko nosilnost določen ne glede na obliko prečnega prereza ter način izdelave elementa. AISC uklonska krivulja se najbolj približa EC uklonski krivulji a, ki pa je določena z najmanjšim vplivom nepopolnosti.



Slika 1: Primerjava uklonskih krivulj

2.3 Vitkost

Vitkost elementa se določi kot največja vrednost izmed vitkosti pri čistem upogibnem uklonu ter vitkosti pri upogibno-torzijskem uklonu.

2.3.1 Vitkost pri upogibnem uklonu

V primeru čistega upogibnega uklona se relativna vitkost elementa glede na obravnavano os prečnega prereza določi po izrazu:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rd}}{N_{cr}}} = \frac{\lambda}{\lambda_1}$$

kjer sta:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\lambda = \frac{l_u}{i}$$

2.3.2 Vitkost pri upogibno-torzijskem uklonu

Pri nesimetričnih ter ekscentrično obremenjenih prečnih prerezih čisti upogibni uklon običajno ni mogoč, zato lahko nastopi upogibno-torzijski uklon. Relativna vitkost dvojno simetričnega prereza pri torzijskem uklonu se določi po izrazu:

$$\bar{\lambda}_t = \frac{\lambda_t}{\lambda_1}$$

kjer je:

$$\lambda_t = \frac{i_p}{\sqrt{\frac{1}{A} \left(\frac{GI_t}{\pi^2 E} + \frac{I_\omega}{l_u^2} \right)}}$$

Pri enojno simetričnih prerezih določimo kritično silo upogibno-torzijskega uklona kot najmanjšo izmed rešitev kvadratne enačbe:

$$\frac{I_p}{I_s} F^2 - F(F_y + F_t) + F_y F_t = 0$$

kjer sta:

$$F_t = \frac{1}{i_s^2} \left(EI_\omega \frac{\pi^2}{l_u^2} + GI_t \right)$$

$$F_y = \frac{\pi^2}{l_u^2} EI_y$$

Relativno vitkost nato določimo z izrazom:

$$\bar{\lambda}_t = \sqrt{\frac{N_{pl,Rd}}{F_{cr}}}$$

2.4 Posebna pravila za dimezioniranje centričnih povezij

2.4.1 SIST EN 1998-1

- **Osnovne zahteve**

Okvire s centričnimi povezji je potrebno projektirati tako, da plastifikacija natezних diagonal nastopi pred porušitvijo spojev in pred porušitvijo ali nestabilnostjo nosilcev in stebrov. Diagonalni elementi morajo imeti tako razporeditev, da pri spreminjanju smeri delovanja vodoravne obtežbe zagotavljajo podobne deformacijske lastnosti konstrukcije. Pri elastični globalni analizi se upošteva le natezna diagonala. Upoštevanje tako natezne kot tlačne diagonale je dovoljeno le pri uporabi nelinearne dinamične globalne analize.

- **Vitkost povezij**

Relativna vitkost je v okvirjih s centričnimi povezji omejena z:

$$1,3 < \bar{\lambda} \leq 2,0$$

Spodnja meja preprečuje preobremenitev stebrov okvirja pred uklonom tlačne diagonale. Pri diagonalnih elementih z majhno vitkostjo lahko namreč skupen vpliv tlačne in natezne diagonale pred uklonom diagonal presega vplive v območju mejne nosilnosti, ko je tlačna diagonala uklonjena, natezna pa plastificirana. Zgornja meja preprečuje prevelike pomike izven ravnine okvirja pri uklonu, saj bi le ti povzročili velike plastične deformacije v vzdolžni pločevini ter posledično porušitev le te zaradi nizkocikličnega utrujanja.

- **Kompaktnost prečnih prereзов povezij**

Prečni prerezi morajo biti vsaj v 2. razredu kompaktnosti.

Preglednica 2: Zahteve SIST EN 1993-1-1 za 2. razred kompaktnosti

Prerez	Pasnice	Stojine
L	$\frac{a}{d} \leq 11\varepsilon$	/
U	$\frac{b}{t} \leq 11\varepsilon$	$\frac{h}{d} \leq 38\varepsilon$
SHS	$\frac{a-3d}{d} \leq 42\varepsilon$	$\frac{a-3d}{d} \leq 38\varepsilon$

2.4.2 AISC

Priporočila AISC delijo okvirje s centričnimi povezji na dve skupini, in sicer na »Posebne okvire s centričnimi povezji« (angl. Special Concentrically braced frames, SCBF) ter na »Običajne okvire s centričnimi povezji« (angl. Ordinary Concentrically braced frames, OCBF). SCBF morajo biti zasnovani tako, da prenesejo znatne plastične deformacije, medtem ko so pri OCBF te plastične deformacije omejene. Pri SCBF je zato obvezno upoštevati tlačne diagonale ter velike deformacije v diagonalah in spojih. Da se zagotovi podobna odpornost v tlaku in nategu ter prepreči akumulacija neelastičnih deformacij, se mora najmanj 30% in največ 70% celotne horizontalne obremenitve prenesti z nateznimi diagonalami. V primerjavi s standardom SIST EN 1998-1, je v priporočilih AISC predpisana nižja omejitev vitkosti z namenom izkoristka večje nosilnosti togih diagonal, vendar morajo prečni prerezi zadostiti strožjim kriterijem seizmične kompaktnosti.

- **Vitkost**

Vitkost je omejena z:

$$\bar{\lambda} \leq 1,27$$

- **Kompaktnost prečnega prereza**

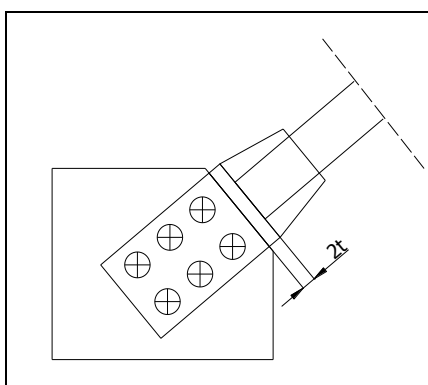
Prečni prerezi diagonal morajo zadoščati pogojem seizmične kompaktnosti.

Preglednica 3: Zahteve AISC za seizmično kompaktnost

Prerez	Pasnice in stojine
L	$\frac{a}{d} \leq 8,9\varepsilon$
U	$\frac{b}{t} \leq 8,9\varepsilon$
SHS	$\frac{a-3d}{d} \leq 19,1\varepsilon$

- Priključevanje diagonal

Da omogočimo formiranje plastičnih členkov v vozliščni pločevini pri uklonu izven ravnine, je potrebno spoje načrtovati tako, kot je prikazano na spodnji sliki, kjer je t debelina vozliščne pločevine.



Slika 2: Priključek diagonale

3 NUMERIČNA ANALIZA

Kot je bilo že v uvodu omenjeno, so bile numerične simulacije izvedene z namenom predhodne ocene za kasnejše laboratorijske teste. V ta namen smo pri modeliranju poskušali v kar največji meri upoštevati dejansko stanje glede geometrijskih in materialnih pogojev ter seveda pogojev podpiranja in obremenjevanja.

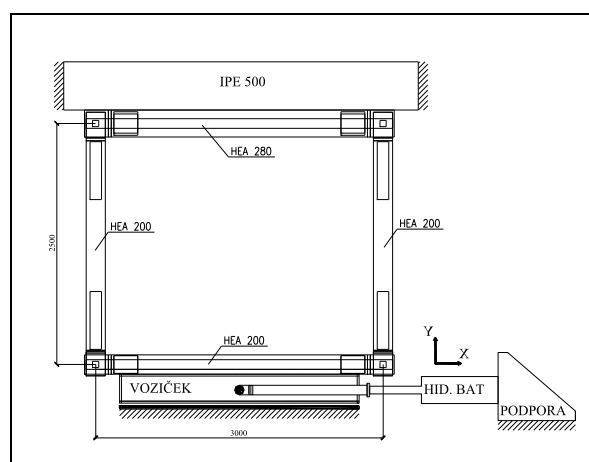
3.1 Zasnova laboratorijskih testov

V nadaljevanju je predstavljena zasnova laboratorijskih testov na obstoječem obremenilnem okvirju. Prikazane so dejanske geometrijske karakteristike obremenilnega okvirja ter diagonal, predvidenih za testiranje.

3.1.1 Obremenilni okvir

Obremenilni okvir je sestavljen iz dveh stebrov (HEA 200), zgornje prečke (HEA 280), ki je privijačena v nepomično prečko (IPE 500) preizkuševalne naprave ter spodnje prečke (HEA 200), ki je privijačena na voziček preizkuševalne naprave (Slika 3). Dolžina stebrov znaša 2,5 m, dolžina prečk 3 m. Na voziček je pritrjen hidravlični bat z največjim možnim pomikom ± 200 mm. Vnos obtežbe v obremenilni okvir predstavljajo vsiljeni pomiki bata. Vsi elementi okvirja so iz jekla kvalitete S 235.

Na spodnjo in zgornjo prečko obremenilnega okvirja je privarjena vozliščna pločevina debeline 2 cm. Na koncih obeh diagonal je privarjena vezna pločevina debeline 1,5 cm. Spoji diagonal na vozliščno pločevino so bili oblikovani po priporočilih AISC, tako da je bilo pri uklonu vpetih diagonal omogočeno formiranje plastičnega členka v vezni pločevini.



Slika 3: Obremenilni okvir

3.1.2 Geometrijske karakteristike prečnih prerezov diagonal

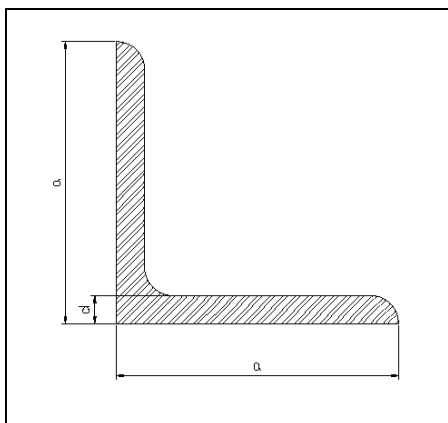
3.1.2.1 Kotniki

V spodnji preglednici so predstavljene geometrijske karakteristike uporabljenih kotnikov.

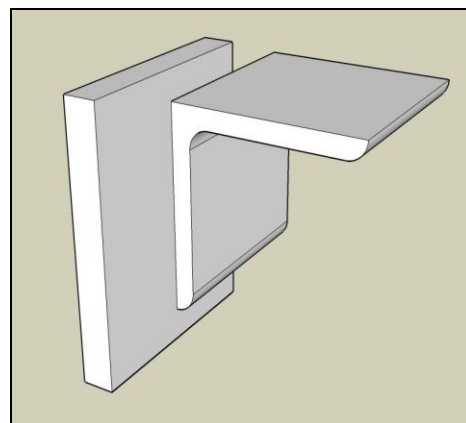
Preglednica 4: Geometrijske karakteristike kotnikov

	a [cm]	d [cm]	A [cm ²]	I_z [cm ⁴]	I_y [cm ⁴]	I_p [cm ⁴]	I_ω [cm ⁶]	I_t [cm ⁴]
L 100/100/10	10	1	19,2	280	73,3	353,3	0	6,3
L 80/80/8	8	0,8	12,3	115	29,6	144,6	0	2,6
L 70/70/7	7	0,7	9,4	67,1	17,6	84,7	0	1,5
L 60/60/6	6	0,6	6,9	36,1	9,4	45,5	0	0,8
L 50/50/5	5	0,5	4,8	17,4	4,6	22,0	0	0,4
L 40/40/4	4	0,4	3,1	7,09	1,86	8,9	0	0,16

Kotniki so na vozliščno pločevino priključeni ekscentrično (Slika 5).



Slika 4: Dimenzije prečnega prereza kotnika



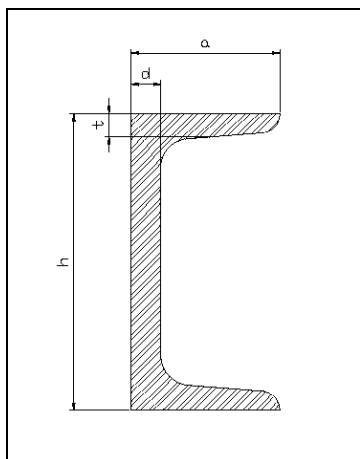
Slika 5: Ekscentrično priključevanje kotnika

3.1.2.2 U profili

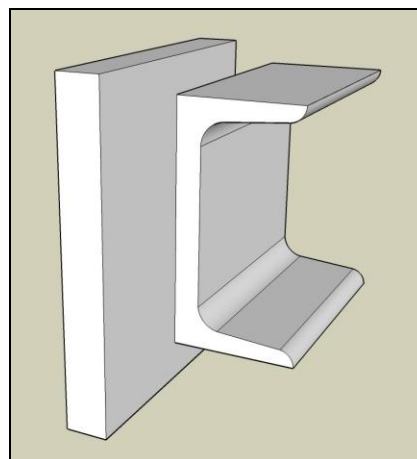
Geometrijske karakteristike uporabljenih U-profilov so podane v spodnji preglednici.

Preglednica 5: Geometrijske karakteristike U profilov

	h [cm]	b [cm]	d [cm]	t [cm]	A [cm ²]	I_y [cm ⁴]	I_z [cm ⁴]	I_p [cm ⁴]	I_ω [cm ⁶]	I_t [cm ⁴]
U 200	20	7,5	0,85	1,15	32,2	1910	148	2058	14084	11,7
U 140	14	6	0,7	1	20,4	605	62,7	667,7	2896	5,6
U 100	10	5	0,6	0,85	13,5	206	29,3	235,3	695,7	2,8
U 80	8	4,5	0,6	0,8	11	106	19,4	125,4	300,4	2,1
U 60	6	3	0,6	0,6	6,46	31,6	4,51	36,1	42,5	0,9
U 50	5	3,8	0,5	0,7	7,1	26,4	9,1	35,5	56,3	1,1



Slika 6: Dimezije prečnega prereza U-profila



Slika 7: Ekscentrično priključevanje U-profila

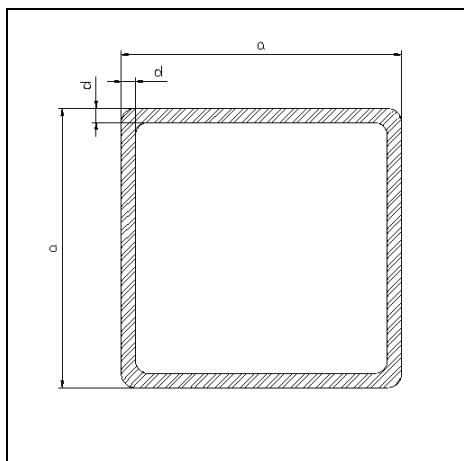
U-profilni so na vozliščno pločevino priključeni ekscentrično (Slika 7).

3.1.2.3 SHS cevi

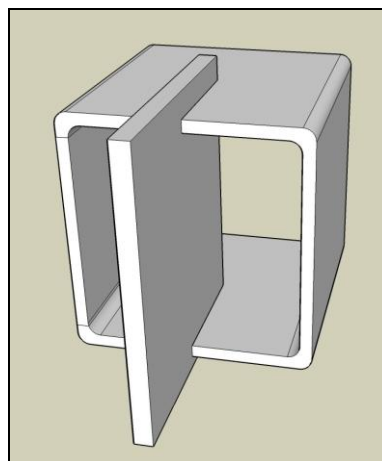
Geometrijske karakteristike prečnih prerezov so predstavljene v spodnji preglednici.

Preglednica 6: Geometrijske karakteristike SHS cevi

	a [cm]	d [cm]	A [cm ²]	I_y [cm ⁴]	I_z [cm ⁴]	I_p [cm ⁴]	I_ω [cm ⁶]	I_t [cm ⁴]
SHS 100/100/5	10	0,5	18,7	279	279	558	4167	439
SHS 80/80/5	8	0,5	14,7	137	137	274	1365	274
SHS 70/70/4	7	0,4	10,1	72,1	72,1	144,2	560,2	119
SHS 60/60/3	6	0,3	6,7	36,2	36,2	72,4	194,4	56,9
SHS 50/50/2	5	0,2	3,7	14,1	14,1	28,2	52,1	22,6



Slika 8: Dimenzije prečnega prereza SHS cevi



Slika 9: Priključevanje SHS cevi

3.2 Numerično modeliranje

Nelinearna analiza po metodi končnih elementov (MKE) je bila izvedena s programskim orodjem ABAQUS. V veliki meri smo upoštevali dejansko geometrijo okvirja in prečnih prerezov, materialne karakteristike ter pogoje podpiranja in obremenjevanja.

3.2.1 Splošno o modeliranju

Prečki in stebra okvirja, diagonalni ter vzdolžni in vzdolžni pločevine so bile modelirane z štiri-vzdolžnimi elementi z uporabo reducirane integracije S4R. Debeline KE ustrezajo debelinam modeliranih pločevin. Za račun ravnotežnega stanja je bila uporabljena Newtonova metoda, pri čemer smo vsiljevali pomik, saj smo le tako lahko spremljali odziv okvirja v primeru stabilnostnih problemov.

3.2.2 Modeliranje materiala

Jeklo kvalitete S235 smo pri monotoni obremenitvi modelirali kot elasto-plastični material z elastičnim modulom $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$, strižnim modulom $G = 8077 \text{ kN/cm}^2$ ter Poissonovim količnikom $\nu = 0.3$. Plastični del diagrama so predstavljali rezultati enoosnega nateznega preizkusa (). Za nelinearno analizo v ABAQUSu je bilo potrebno nominalne

vrednosti materialnega diagrama prevesti v prave (Cauchyjeve) napetosti σ_{prave} ter v logaritemske plastične deformacije ϵ_{ln}^{pl} po izrazih:

$$\sigma_{prave} = \sigma_{nom} (1 + \epsilon_{nom})$$

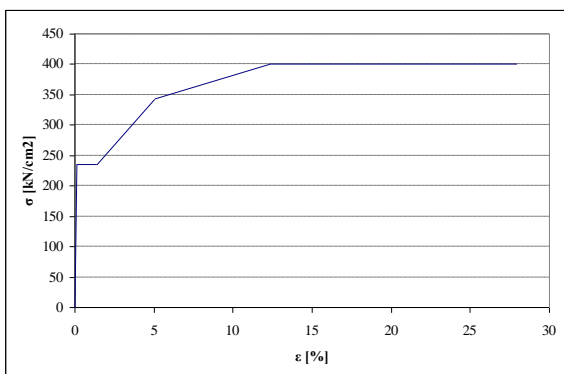
$$\epsilon_{ln}^{pl} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) - \frac{\sigma_{prave}}{E}$$

Preglednica 7: Nominalne vrednosti napetosti in deformacij

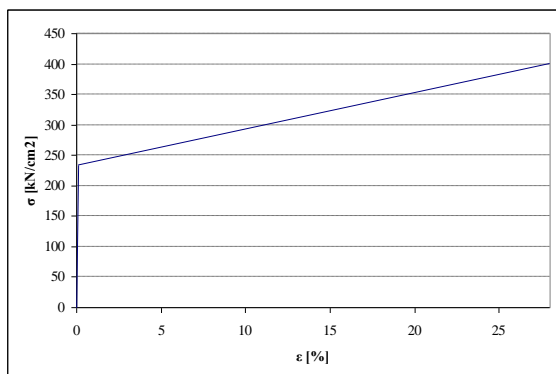
σ_{nom} [kN/cm ²]	ϵ_{nom} [%]
0,0	0,0
235,0	0,001
236,0	0,014
344,0	0,051
400,0	0,124
400,6	0,280

Preglednica 8: Prave vrednosti napetosti in deformacij

σ_{prave} [kN/cm ²]	ϵ_{ln}^{pl} [%]
235,3	0,0
238,3	0,003
361,5	0,033
450,2	0,095
512,7	0,222



Slika 10: Elasto-plastični diagram jekla S235



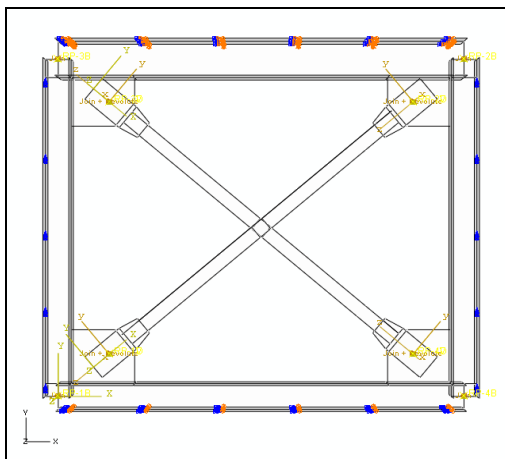
Slika 11: Bilinearni elasto-plastični diagram jekla S235

Pri ciklični obremenjevanju je bilo jeklo S235 modelirano z bilinearnim elasto–plastičnim diagramom z utrditvijo (Slika 11). Uporabljen je bil linearni kinematični model utrjevanja, ki upošteva Bauschingerjev efekt.

3.2.3 Modeliranje robnih pogojev, spojev ter obremenitve

- **Robni pogoji**

Zgornja prečka obremenilnega okvirja (HEA 280) je nepomično podprta v vseh treh smereh ($U1 = U2 = U3 = 0$), poleg tega ima preprečene torzijske zasuke ($UR1 = 0$). Oba stebra (HEA 200) imata preprečene torzijske zasuke ($UR1 = 0$). Spodnja prečka je nepomično podprta v smeri pravokotno na okvir ($U3 = 0$), prav tako ima preprečene torzijske zasuke ($UR1 = 0$).



Slika 12: Robni pogoji

- **Spoji**

Spoji prečk in stebrov obremenilnega okvirja so bili v vseh simulacijah členkasto modelirani:

$$U1_{prečka} = U1_{steber}$$

$$U2_{prečka} = U2_{steber}$$

$$U3_{prečka} = U3_{steber}$$

Pogoje priključevanja in spajanja diagonal pa lahko v splošnem razdelimo na dva tipa. V prvem tipu (tip I) smo obravnavali diagonale brez stikovanja na križanju, ki so členkasto

(Ia) ali togo (Ib) priključene na vozliščno pločevino okvirja. V drugem tipu (tip II) smo začetnim pogojem priključevanja diagonal na vozliščno pločevino dodali še spajanje na križanju diagonal. Spoji na križanju so tako bili izvedeni členkasto (IIc, IId) in togo (IIe, II f).

Členek v priključku smo modelirali tako, da smo sprostili le zasuk diagonale v ravnini okvirja (Slika 12), zasuk diagonale izven ravnine okvirja pa je v vseh variantah pogojevala vezna pločevina.

Za sistemsko dolžino diagonale je bila vzeta razdalja med točkami priključevanja diagonale na vozliščno pločevino in je znašala $L = 293$ cm.

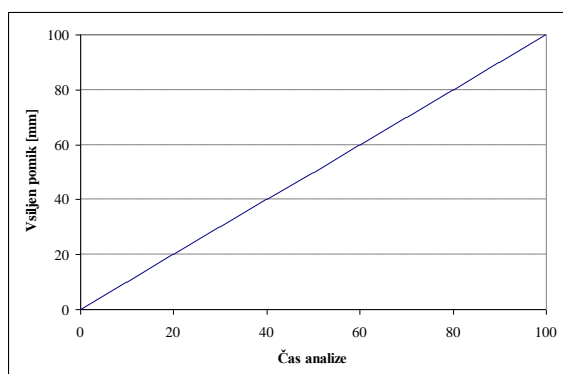
Uklonske dolžine nestikovanih diagonal smo določili z izrazom za členkasto vpete tlačene palice, saj je v primeru Ia diagonala dejansko bila členkasto vpeta, v primeru Ib pa je bilo v vozliščni pločevini omogočeno formiranje plastičnega členka pri uklonu tlačene diagonale. Pri določevanju uklonskih dolžin spajanih diagonal smo predpostavili, da natezna diagonala omogoča zadostno podporo tlačeni diagonali, zato je bila kot sistemska dolžina vzeta polovična dolžina diagonale.

Preglednica 9: Uklonske dolžine diagonal

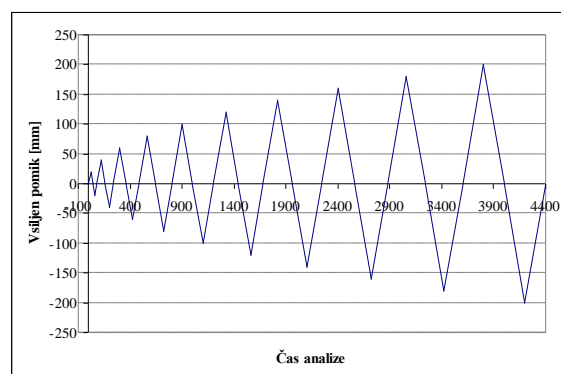
Tip	Varianta	Priključek diagonale na okvir	Spajanje diagonal	Uklonska dolžina
I	a	členkast	/	$l_u = L$
	b	tog	/	$l_u = L$
II	c	členkast	členkasto	$l_u = \frac{L}{2}$
	d	tog	členkasto	$l_u = \frac{L}{2}$
	e	členkast	togo	$l_u = 0,7 \cdot \frac{L}{2}$
	f	tog	togo	$l_u = 0,7 \cdot \frac{L}{2}$

• **Obremenitev**

Pomik je bil vsiljevan preko spodnje prečke obremenilnega okvirja. Pri monotonem obremenjevanju se je pomik linearno povečeval do vrednosti 20 cm. Ciklično obremenjevanje je vsebovalo skupno 10 ciklov, v vsakem ciklu se je pomik povečal za 2 cm ter tako v desetem ciklu dosegel končno vrednost 20 cm.



Slika 13: Potek pomika pri monotonem obremenjevanju



Slika 14: Potek pomika pri cikličnem obremenjevanju

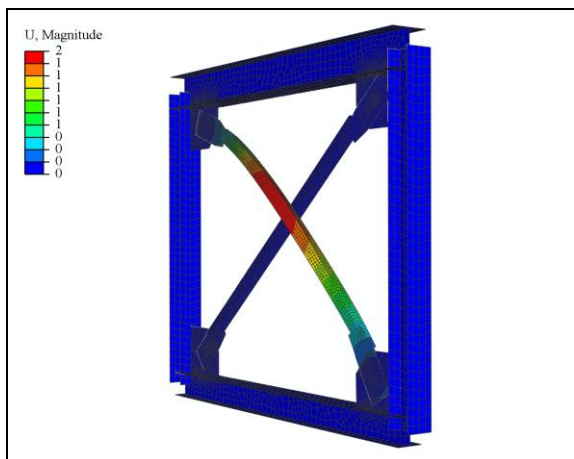
3.2.4 Začetne geometrijske nepopolnosti

Začetne geometrijske nepopolnosti smo upoštevali kot prvo uklonsko obliko diagonal. Velikosti nepopolnosti so bile določene v skladu s standardom SIST EN 1993-1-1.

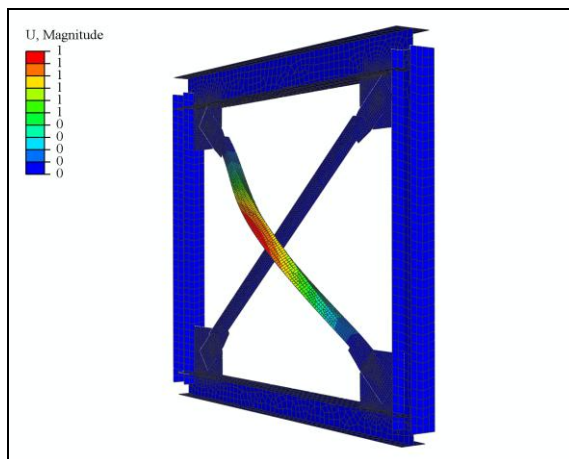
Preglednica 10: Velikost nepopolnosti

Profil	Uklonska krivulja	e_0/L (pl. analiza)	e_0 [cm]
L	b	1/250	1,17
U	c	1/200	1,46
SHS	a	1/300	0,97

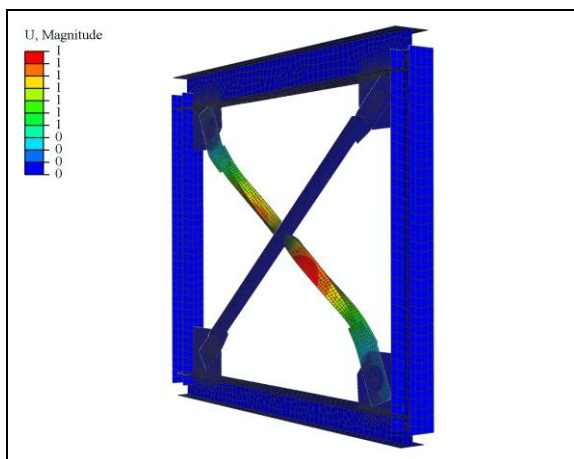
V nadaljevanju so podane tipične prve uklonske oblike za vse tri obravnavane prereze ter vseh 6 variant priključevanja ter stikovanja diagonal.



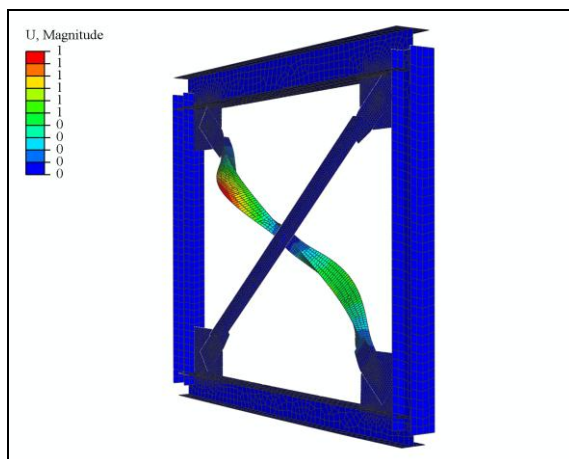
Slika 15: 1. uklonska oblika – L (Ia)



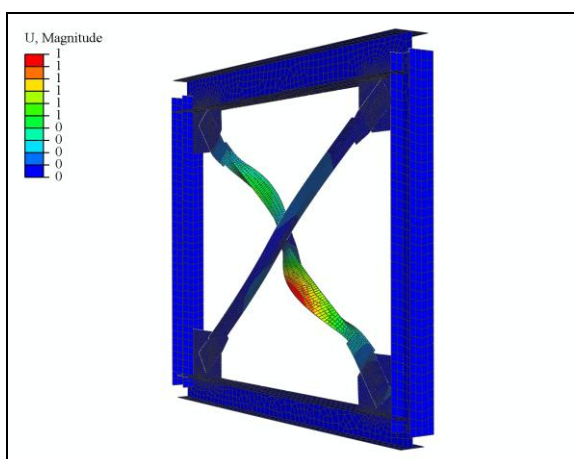
Slika 16: 1. uklonska oblika – L (Ib)



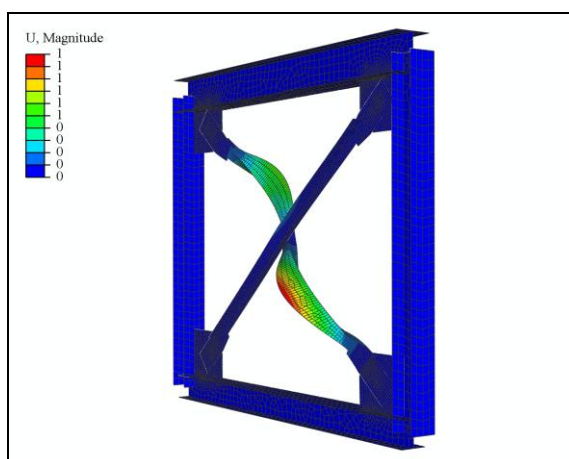
Slika 17: 1. uklonska oblika – L (IIc)



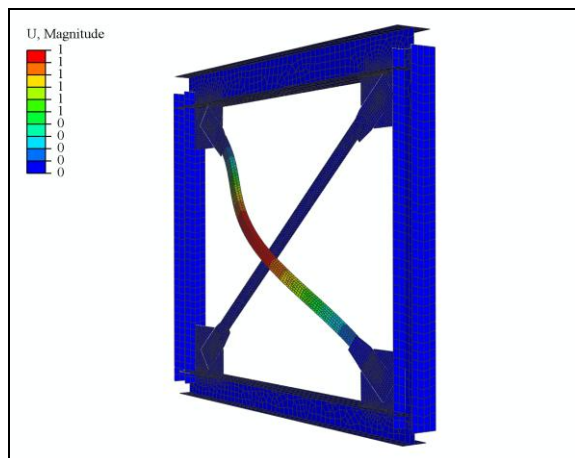
Slika 18: 1. uklonska oblika – L (IId)



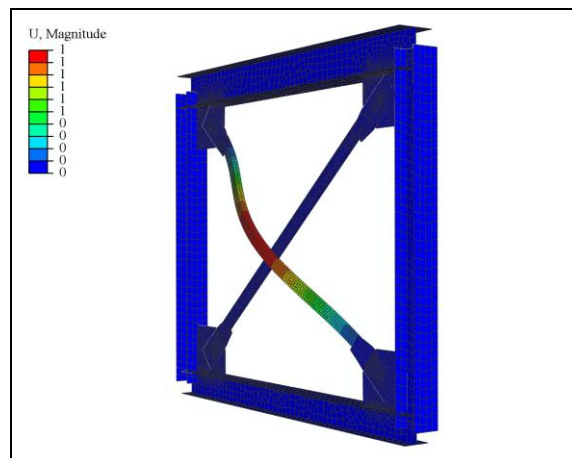
Slika 19: 1. uklonska oblika – L (IIe)



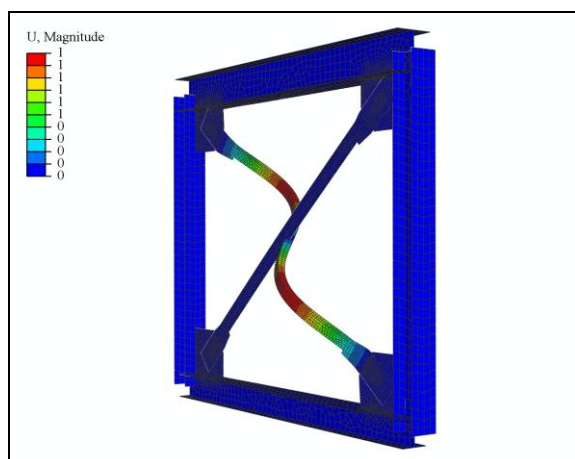
Slika 20: 1. uklonska oblika – L (IIIf)



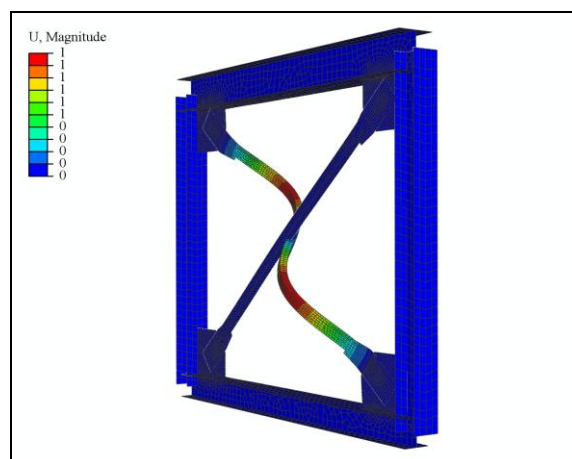
Slika 21: 1. uklonska oblika – U (Ia)



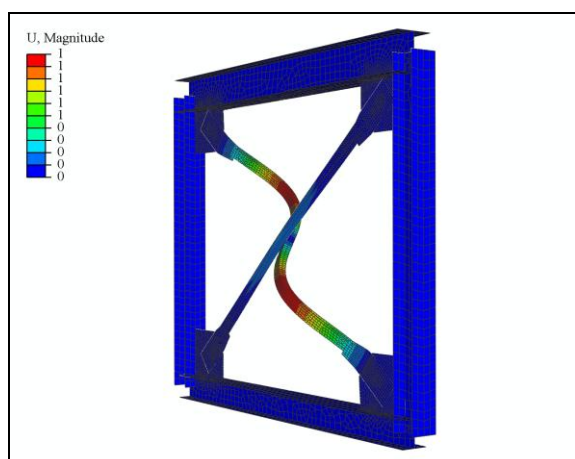
Slika 22: 1. uklonska oblika – U (Ib)



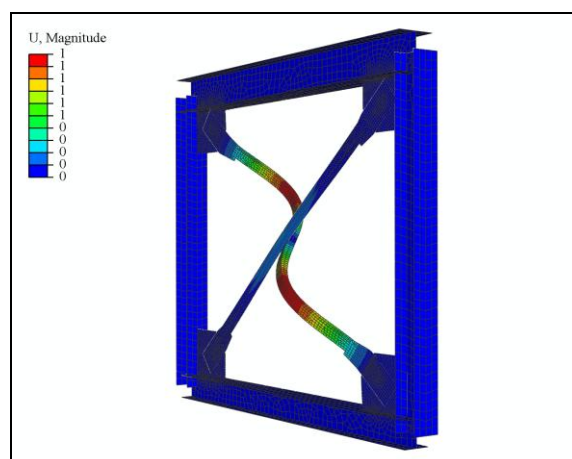
Slika 23: 1. uklonska oblika – U (IIc)



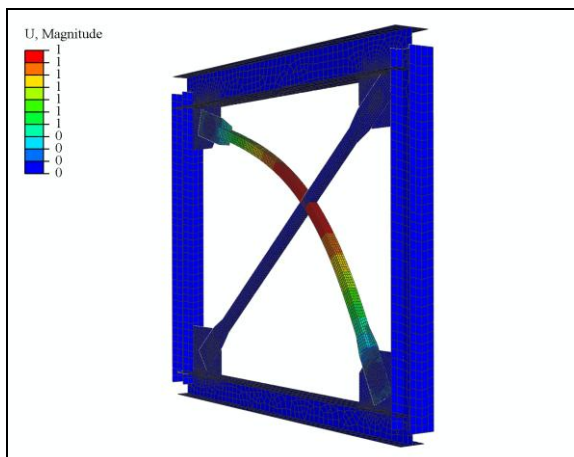
Slika 24: 1. uklonska oblika – U (IId)



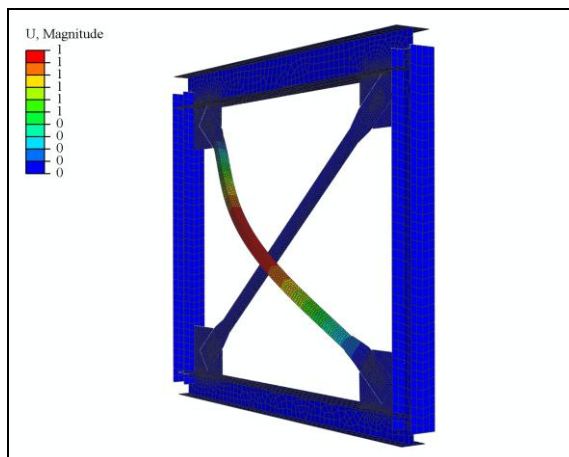
Slika 25: 1. uklonska oblika – U (IIe)



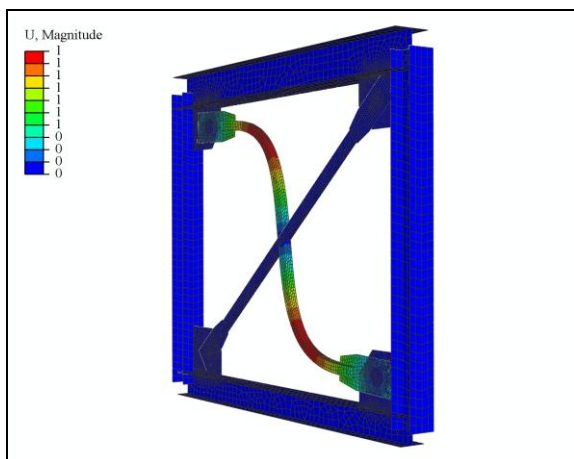
Slika 26: 1. uklonska oblika – U (IIf)



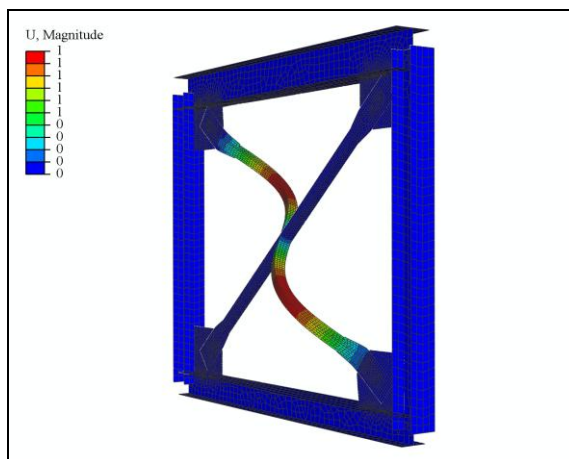
Slika 27: 1. uklonska oblika – SHS (Ia)



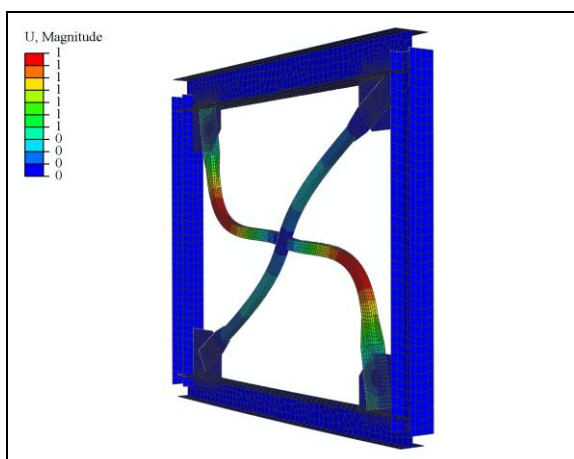
Slika 28: 1. uklonska oblika – SHS (Ib)



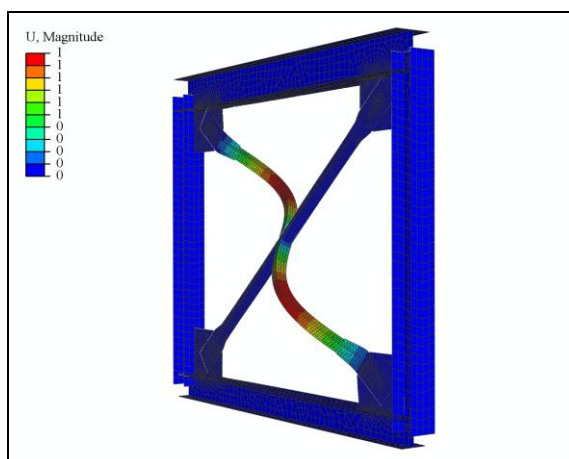
Slika 29: 1. uklonska oblika – SHS (IIc)



Slika 30: 1. uklonska oblika – SHS (IId)



Slika 31: 1. uklonska oblika – SHS (IIe)



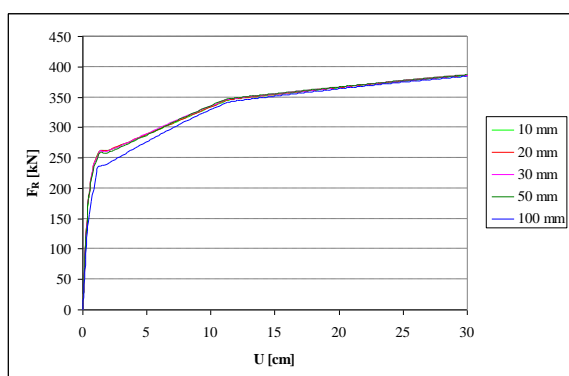
Slika 32: 1. uklonska oblika – SHS (IIf)

3.2.5 Kalibracija mreže in izbira končnih elementov

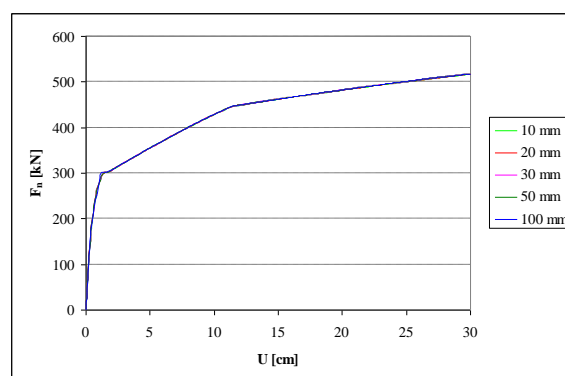
Za določitev optimalne gostote mreže končnih elementov po diagonali je bilo testiranih pet mrež različnih gostot:

- 100 mm mreža (dolžina stranice KE: 100 mm, število KE: 80)
- 50 mm mreža (dolžina stranice KE: 50 mm, število KE: 270)
- 30 mm mreža (dolžina stranice KE: 30 mm, število KE: 730)
- 20 mm mreža (dolžina stranice KE: 20 mm, število KE: 1500)
- 10 mm mreža (dolžina stranice KE: 10 mm, število KE: 6400)

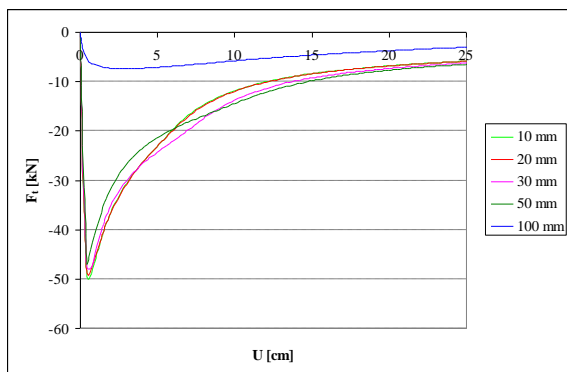
Na spodnjih slikah je prikazana primerjava rezultatov, dobljenih z uporabo različnih gostot mreže.



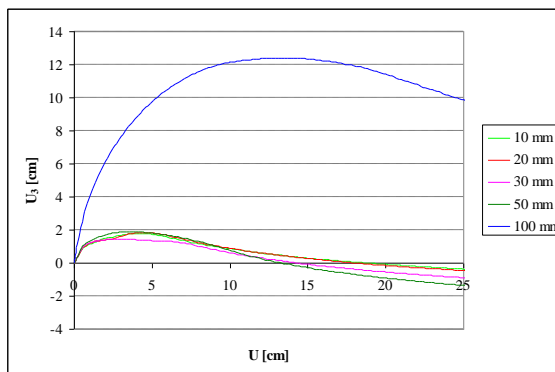
Slika 33: Primerjava horizontalnih reakcij na okvir



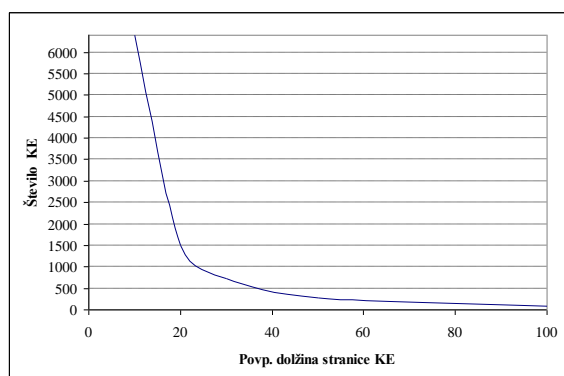
Slika 34: Primerjava sil v natezni diagonali



Slika 35: Primerjava sil v tlačni diagonali



Slika 36: Primerjava pomikov sredinske točke tlačne diagonale izven ravnine



Slika 37: Odvisnost števila KE od gostote mreže KE

Izbrana je bila 20 mm mreža, saj zadostuje konvergenčnim pogojem (dopustna razlika znaša 1%) in istočasno omogoča sprejemljivo število končnih elementov ter s tem povezan računski čas simulacij.

Izbrani so bili končni elementi tipa S4R – štiri-vozliščni lupinasti elementi z reducirano integracijo. Integracija se reducira le pri izračunu togosti elementa, masna matrika in razporeditev obtežbe se določita s točno integracijo.

4 REZULTATI NUMERIČNIH SIMULACIJ

Izvedene numerične simulacije lahko v grobem razdelimo na dva dela. Prvi, obširnejši del tako predstavljajo simulacije z monotonim obremenjevanjem, katerih namen je bil ugotoviti splošne značilnosti v obnašanju centričnih povezij. Osredotočili smo se predvsem na obnašanje tlačne diagonale v odvisnosti od pogojev priključevanja in spajanja (ter s tem povezane vitkosti) ter od oblike prečnega prereza diagonale. V drugem delu so na primeru prečnega prereza iste oblike opravljene simulacije s cikličnim obremenjevanjem, s katerimi smo želeli določiti vpliv priključevanja in stikovanja na izmenično tlačno ter natezno obremenjene diagonale.

4.1 Monotono obremenjevanje

V sledečem poglavju so predstavljeni rezultati numeričnih simulacij z monotonim obremenjevanjem. Modeliranih je bilo 16 prečnih prerezov, od tega 6 kotnikov, 5 U profilov ter 5 SHS cevi. Skupno je bilo tako opravljenih skoraj 100 numeričnih simulacij .

Pri vsaki simulaciji smo spremljali vsiljevan horizontalen pomik, sili v natezni in tlačni diagonali, horizontalno reakcijo na okvir, največje pomike tlačne diagonale v ravnini in izven ravnine okvirja ter največje plastične deformacije v tlačni diagonali. Posebej smo se osredotočili na omenjene količine pri treh vrednostih horizontalnega pomika in sicer pri 25 mm, 100 mm ter 200 mm. Priporočila FEMA namreč podajajo vrednosti etažnih nagibov za oceno poškodovanosti objekta. Obstoječim stopnjam poškodovanosti smo dodali še vmesno stanje znatnih poškodb.

Preglednica 11: Stopnje poškodovanosti objekta po priporočilih FEMA

Stopnja poškodovanosti	Opis poškodb	Etažni nagib
Majhne poškodbe (ang. Immediate Occupancy Level)	Konstrukcija ohrani svojo prvotno nosilnost in togost. Dopustne so manjše razpoke v nekonstrukcijskih elementih (fasade, predelni zidovi, ...). Možna je takojšnja uporaba objekta.	$\phi = 0,01$
Poškodbe tik pred porušitvijo (ang. Collapse Prevention Level)	Nosilnost in togost konstrukcije sta bistveno zmanjšani, vendar je konstrukcija še vedno sposobna nositi vertikalno obtežbo. Nekonstrukcijski elementi so znatno poškodovani, možne so lokalne porušitve.	$\phi = 0,08$

Preglednica 12: Velikost horizontalnega pomika za različne stopnje poškodovanosti

Stopnja poškodovanosti	Etažni nagib ϕ	Etažni pomik u
Majhne poškodbe	0,01	2,5 cm
Znatne poškodbe	0,04	10 cm
Poškodbe tik pred porušitvijo	0,08	20 cm

Sile, ki so prikazane na diagramih v nadaljevanju, so normirane na natezno plastično nosilnost prečnega prereza, določeno po SIST EN 1993-1-1, največji pomiki v smeri uklona pa so normirani na računsko uklonsko dolžino diagonale.

4.1.1 Kotniki

Kot je bilo že omenjeno, je bilo v numeričnih simulacijah uporabljenih 6 različnih prečnih prerezov kotnikov. Pri primerjavi rezultatov numerične analize z vrednostimi, določenimi po standardu SIST EN 1993-1-1, je bila upoštevana merodajna od relativne vitkosti pri upogibnem in upogibno-torzijskem uklonu.

Preglednica 13: Relativne vitkosti kotnikov pri upogibnem in upogibno-torzijskem uklonu

	a		b		c		d		e		f	
	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_t$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_t$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_t$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_t$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_t$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_t$
L 100/100/10	1,60	0,86	1,60	0,86	0,79	0,54	0,79	0,54	0,56	0,50	0,56	0,50
L 80/80/8	2,00	1,05	2,00	1,05	1,00	0,60	1,00	0,60	0,70	0,52	0,70	0,52
L 70/70/7	2,28	1,19	2,28	1,19	1,14	0,66	1,14	0,66	0,80	0,54	0,80	0,54
L 60/60/6	2,67	1,39	2,67	1,39	1,33	0,74	1,33	0,74	0,93	0,58	0,93	0,58
L 50/50/5	3,19	1,67	3,19	1,67	1,59	0,86	1,59	0,86	1,11	0,65	1,11	0,65
L 40/40/4	4,01	2,07	4,01	2,07	2,00	1,06	2,00	1,06	1,4	0,77	1,4	0,77

OP.: Relativne vitkosti, ki ne ustrezajo omejitvam iz SIST EN 1998-1, so izpisane z rdečo barvo.

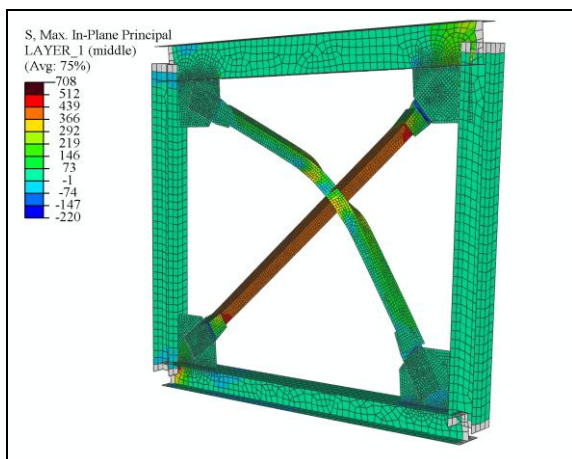
Deformiranje kotnikov je v največji meri odvisno od načina priključevanja ter s tem povezane vitkosti diagonal. V vseh primerih, kjer sta bili diagonalni členkasto priključeni na okvir (Ia, IIc, IIe), se je tlačna diagonala uklonila v ravnini okvirja. V primerih, kjer sta bili diagonalni togo priključeni na okvir (Ib, IId, IIe), se je tlačna diagonala uklonila izven ravnine okvirja. Omeniti je še potrebno, da so se kotniki v vseh primerih uklonili z upogibno-torzijskim uklonom, čeprav je bil računsko vedno merodajen upogibni uklon. Upogibno-torzijski uklon je povzročilo ekscentrično pritrjevanje ter nesimetričnost prečnega prereza

Preglednica 14: Pregled simulacij kotnikov

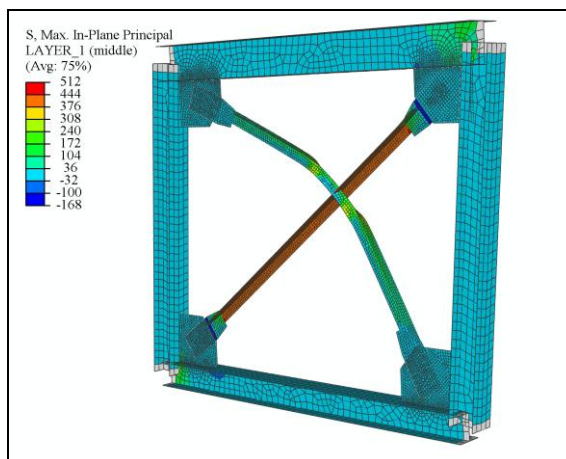
Tip	Varianta	Priključek diagonale na okvir	Spajanje diagonal	Uklon
I	a	členkast	/	v ravnini okvirja
	b	tog	/	izven ravnine okvirja
II	c	členkast	členkasto	v ravnini okvirja
	d	tog	členkasto	izven ravnine okvirja
	e	členkast	togo	v ravnini okvirja
	f	tog	togo	izven ravnine okvirja

V nadaljevanju je prikazano deformirano stanje okvirja pri horizontalnem pomiku $U = 20$ cm za vsako varianto priključevanja in spajanja diagonal ter za tri različne vitkosti diagonal.

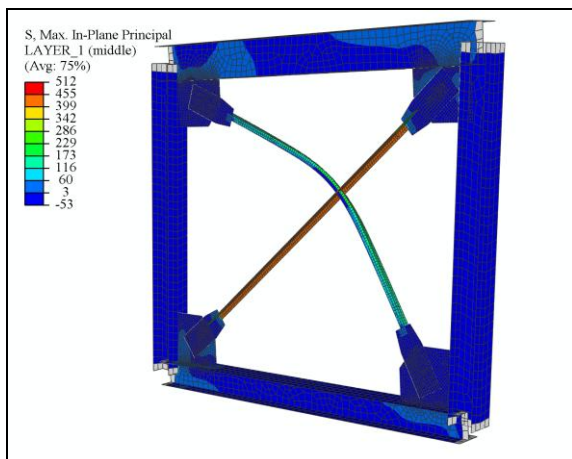
Pri členkasto priključenih nestikovanih diagonalah (Ia) se je tlačna diagonala v vseh simulacijah kotnikov uklonila v ravini okvirja, v manjši meri je bil prisoten tudi uklon izven ravnine okvirja. Pri bolj togih elementih se je v sredinskem delu tlačne diagonale tvorilo območje velikih plastičnih deformacij, medtem ko so deformacije v vitki diagonalah ostale elastične.



Slika 38: L 100/100/10 (Ia)

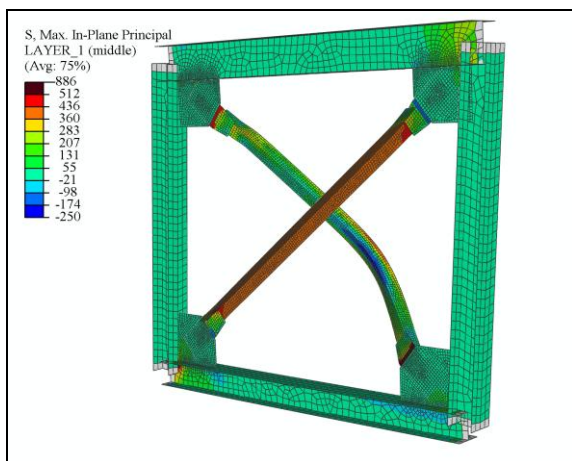


Slika 39: L 70/70/7 (Ia)

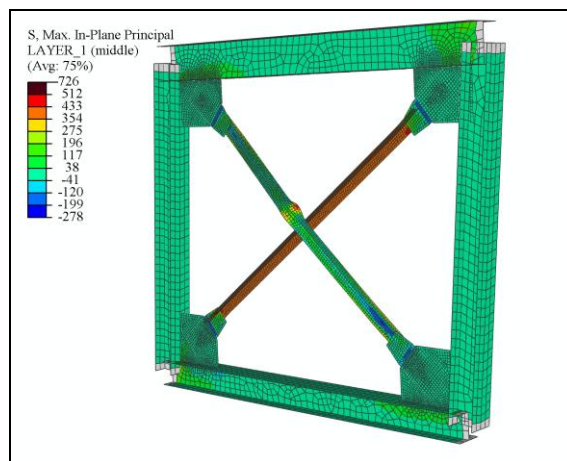


Slika 40: L 40/40/4 (Ia)

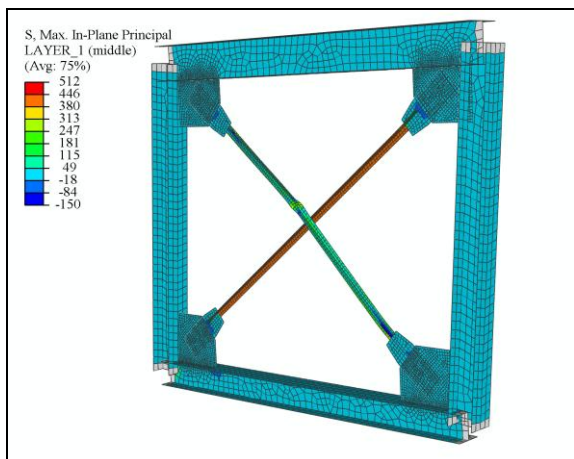
Togo priključena diagonala (Ib) se je v vseh izvedenih simulacijah uklonila izven ravnine okvirja. Pri tem se je pri bolj togih elementih v vezni pločevini na vsakem koncu diagonale ter na sredini diagonale tvorilo območje velikih plastičnih deformacij, deformacije v vitkih tlačnih diagonalah pa so ravno prešle v plastično območje.



Slika 41: L 100/100/10 (Ib)



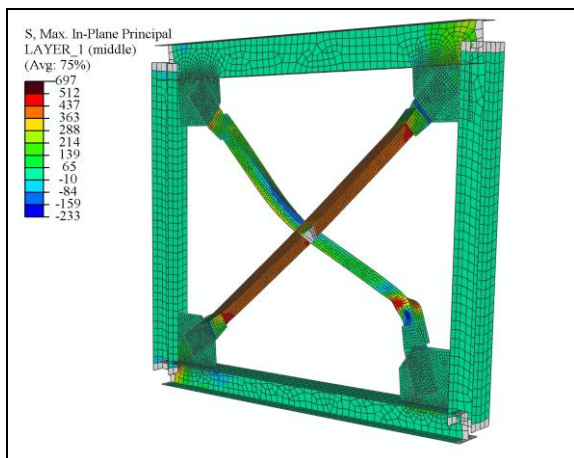
Slika 42: L 70/70/7 (Ib)



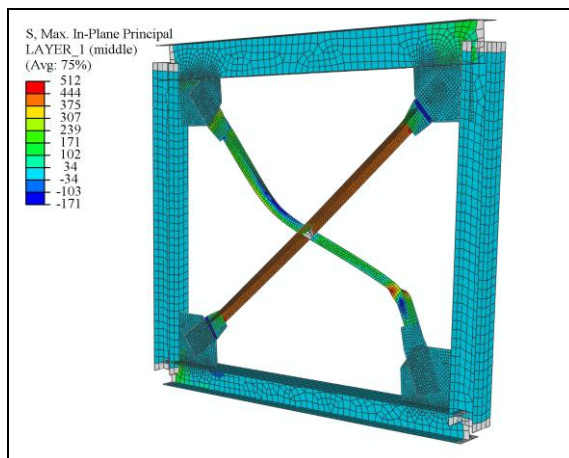
Slika 43: L 40/40/4 (Ib)

Stikovanje diagonal je povzročilo znatno povečanje uklonske nosilnosti, zato so se v vseh primerih v tlačnih diagonalah formirali plastični členki.

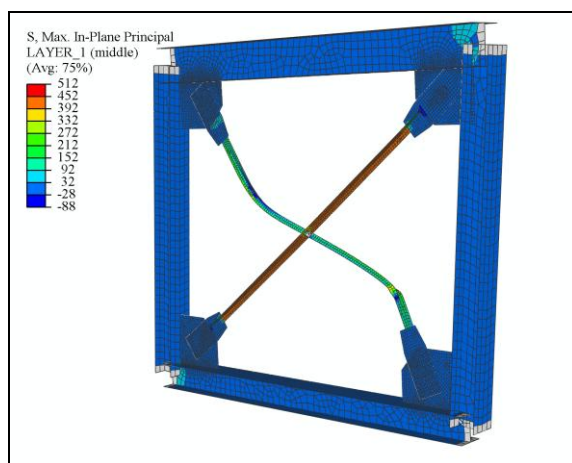
Členkasto priključena diagonala (IIc) se je v vseh primerih uklonila v ravnini okvirja, pri končni vrednosti pomika je bila polovica diagonale uklonjene, v drugi polovici diagonale se je tvoril plastični členek v bližini členkastega vpetja diagonale. V bolj togih diagonalah so deformacije dosegale vrednosti, ki pripadajo natezni trdnosti, medtem ko se vitke diagonale ravno začele plastično deformirati.



Slika 44: L 100/100/10 (IIc)

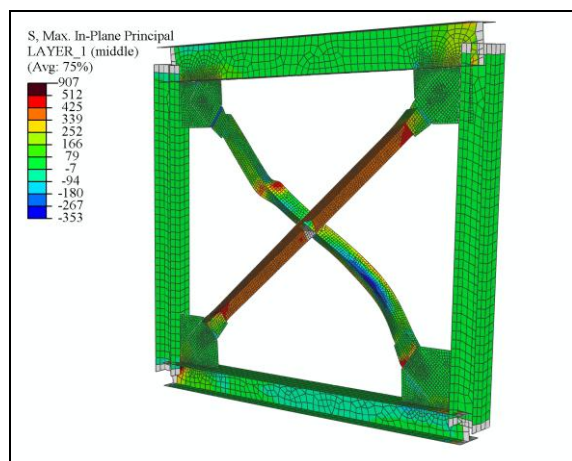


Slika 45: L 70/70/7 (IIc)

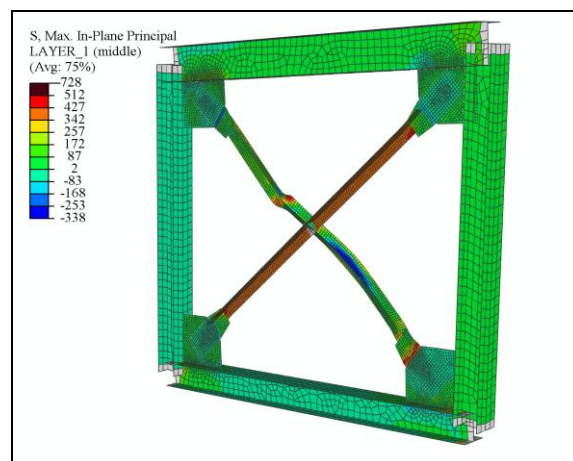


Slika 46: L 40/40/4 (IIc)

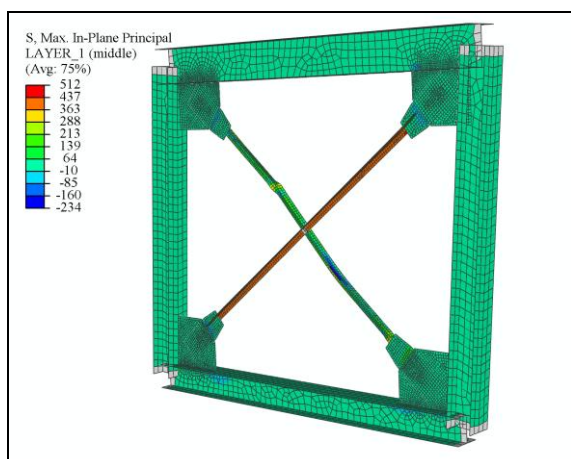
V primeru togega vpetja ter členkastega stikovanja diagonal (IIc) so se plastični členki tvorili v vezni pločevini ob uklonu diagonale izven ravnine ter v bližini členkastega stikovanja diagonal.



Slika 47: L 100/100/10 (IIc)

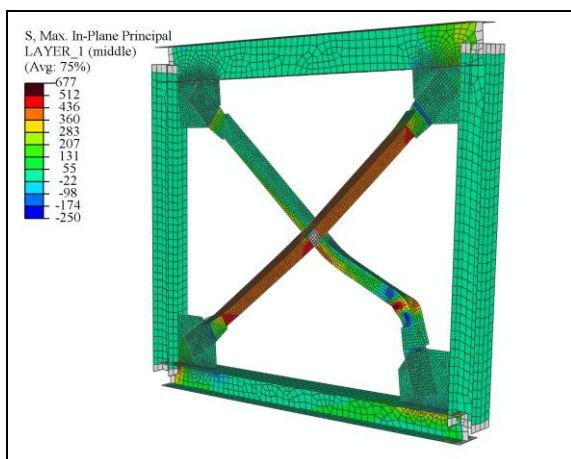


Slika 48: L 70/70/7 (IIc)

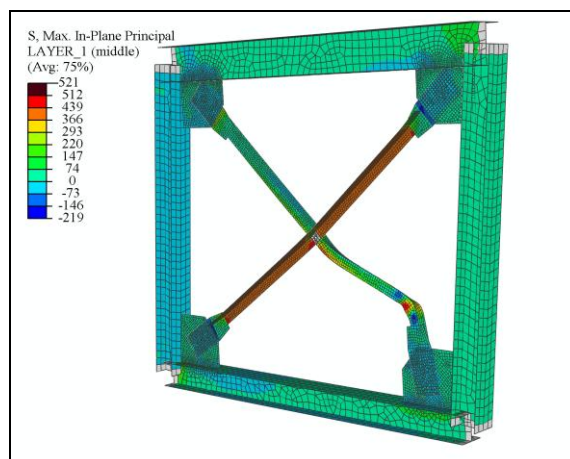


Slika 49: L 40/40/4 (IIe)

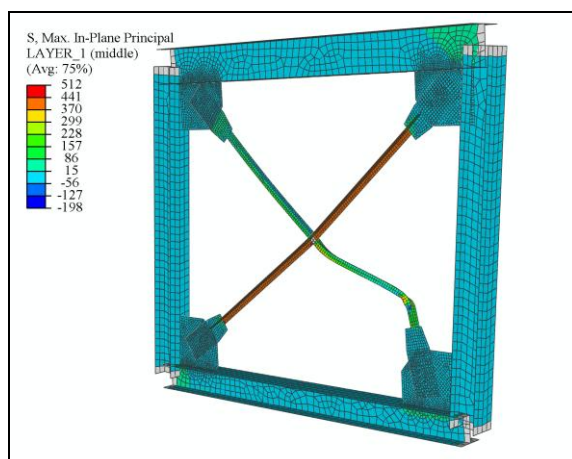
Deformiranje členkasto vpete ter togo stikovane diagonale (IIe) se izvrši na eni polovici diagonale, kjer se ob členkastem vpetju tvori plastični členek, medtem ko so deformacije v drugi polovici diagonale elastične.



Slika 50: L 100/100/10 (IIe)

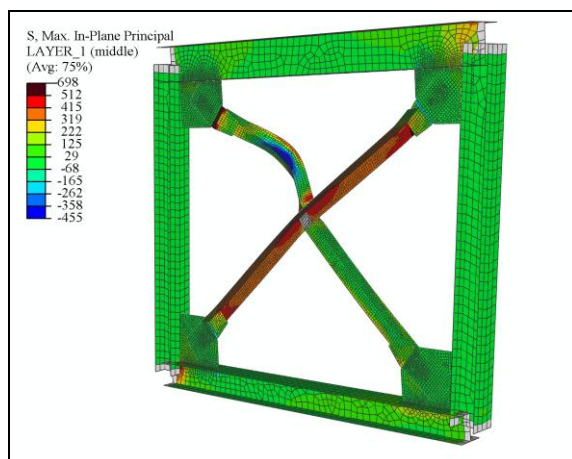


Slika 51: L 70/70/7 (IIe)

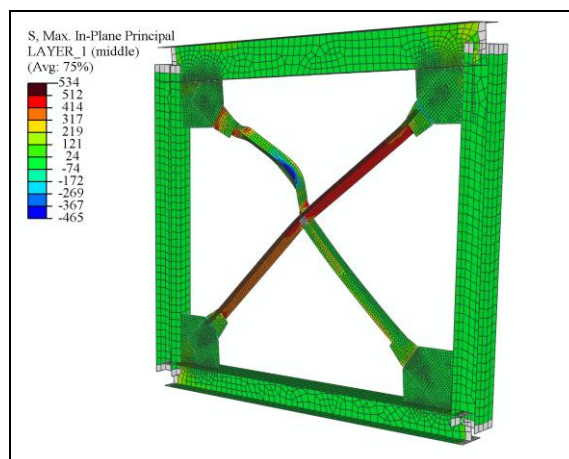


Slika 52: L 40/40/4 (IIe)

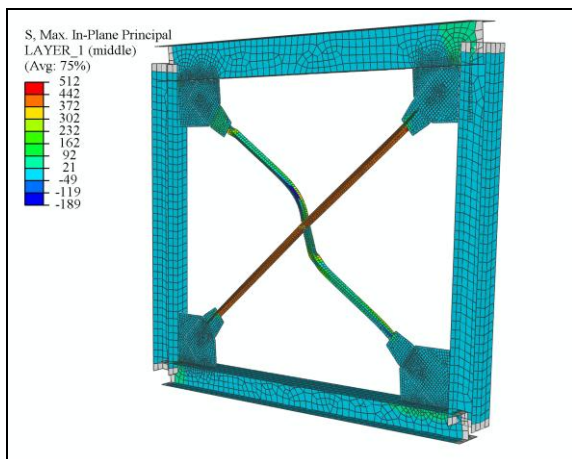
V primeru, da diagonale priključujemo in stikujemo togo (IIf), se tlačna deformacija izvršuje na eni polovici diagonale in šele po formiranju plastičnih členkov na mestu vpetja in stikovanja ter na sredini se začne deformirati tudi druga polovica diagonale.



Slika 53: L 100/100/10 (IIf)



Slika 54: L 70/70/7 (IIf)

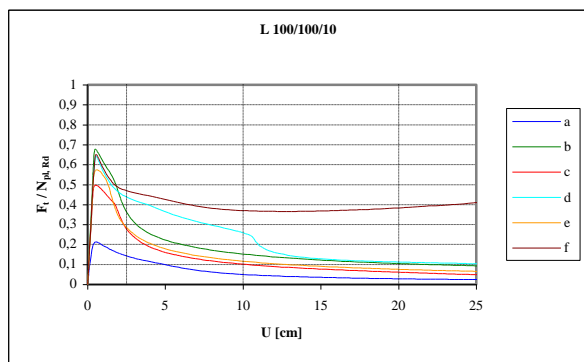


Slika 55: L 40/40/4 (IIf)

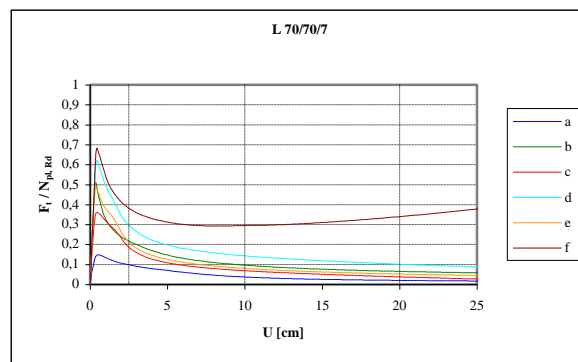
4.1.1.1 Tlačna diagonala

V nadaljevanju so predstavljene bistvene značilnosti tlačne diagonale glede uklonske sile in nosilnosti tlačne diagonale v post-kritičnem območju, t.j. nosilnosti tlačne diagonale po uklonu. Za oceno poškodovanosti tlačne diagonale smo primerjali dva parametra in sicer največji pomik tlačne diagonale v smeri prevladujočega uklona ter največje plastične deformacije v tlačni diagonali pri določenih mejnih pomikih.

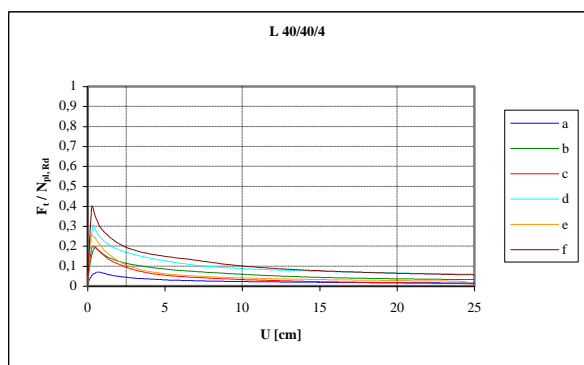
Pri diagonalah z manjšo vitkostjo (L 100/100/10) opazimo izrazito višjo uklonsko nosilnost v vseh primerih togega priključevanja diagonale na okvir, saj je v temu primeru za uklon potrebna plastifikacija vezne pločevine. Najmanjša uklonska sila je bila tako dosežena v nestikovani diagonali s členkastim priključkom (Ia) in je znašala 20 % natezne plastične nosilnosti prereza, največja uklonska sila pa v diagonali s togim vpetjem v okvir ter togim stikovanjem diagonal (IIf) in je znašala skoraj 70% natezne plastične nosilnosti prereza. V temu primeru je tudi jasno videna izrazito višja nosilnost elementa v post-kritičnem območju, ki se po pomiku 10 cm začne celo povečevati. Kot je bilo že omenjeno, se celotna tlačna deformacija diagonale najprej izvrši na prvi polovici diagonale, saj togo stikovanje z natezno diagonalo nudi zadostno podporo tlačni polovici, po formiranju plastičnih členkov pa se nosilnost povečuje zaradi aktivacije druge polovice diagonale.



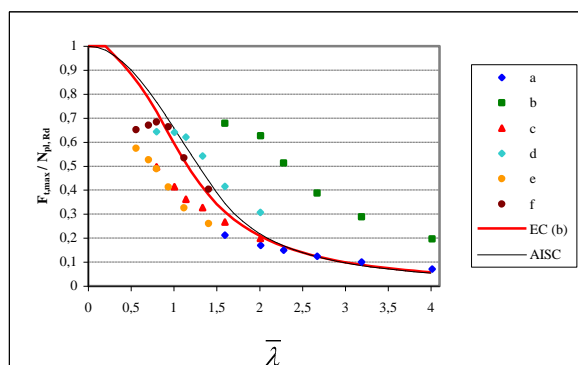
Slika 56: Potek sile v tlačni diagonali (L 100/100/10)



Slika 57: Potek sile v tlačni diagonali (L 70/70/7)



Slika 58: Potek sile v tlačni diagonali (L 40/40/4)

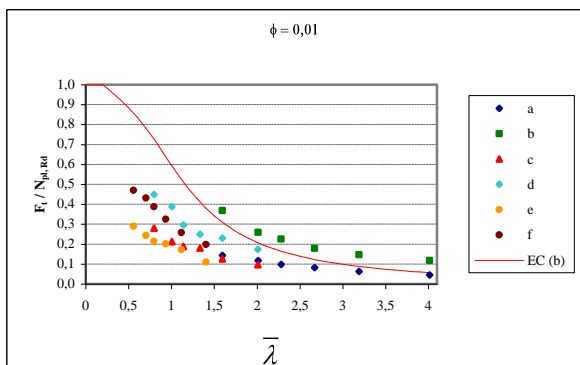
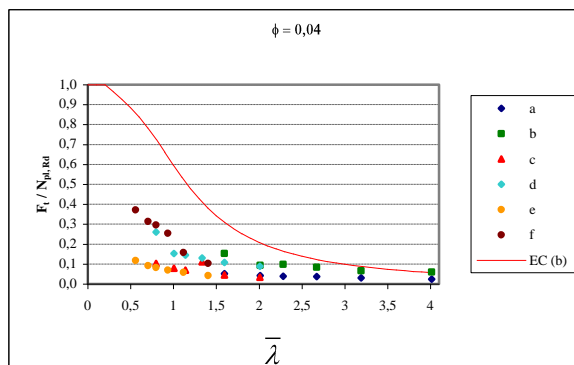
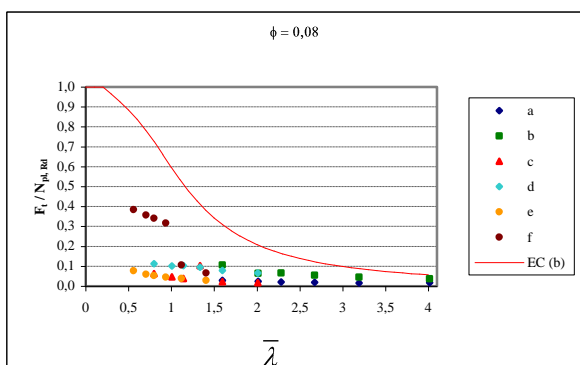


Slika 59: Uklonske sile kotnikov

Če uklonske sile v diagonalah primerjamo z uklonsko krivuljo po SIST EN 1993-1-1, ugotovimo, da imajo večjo nosilnost diagonale z togim vpetjem (posebno Ib), razen v območju majhnih vitkosti, kjer se v diagonali formira plastični členek pred pojavom uklona. Vrednost uklonskih sil členkasto priključenih diagonal (Ia, IIc, IIe) je v skoraj vseh primerih nižja od vrednosti v standardu. Pri togih elementih se razlika še povečuje, medtem ko pri vitkih elementih dosežemo boljše ujemanje. Razlogov za odstopanja je več. Vrednosti uklonskih sil po standardu SIST EN 1993-1-1 so določene z merodajno vitkostjo glede na glavne osi prereza, dejansko pa pri kotniku zaradi ekscentričnosti vnosa obtežbe nastopi kombinacija uklona okoli obeh glavnih osi. Poleg tega so bile za nelinearno analizo uporabljene s standardom določene velikosti nepopolnosti, kar je še dodatno znižalo uklonske sile.

Opazna je tudi podobnost pri uklonskih silah v primerih IIc in IIe ter IID in IIf. Zaradi tega lahko sklepamo, da natezna diagonala sicer nudi zadostno podporo tlačni diagonali pri

omejitvi pomikov, ne pa tudi pri omejitvi zasukov. To lahko vidimo tudi pri zgornjem prikazu deformiranja okvirja, kjer se v primeru togo stikovanih diagonal lahko vidi zasuk natezne diagonale pri uklonu tlačne diagonale.

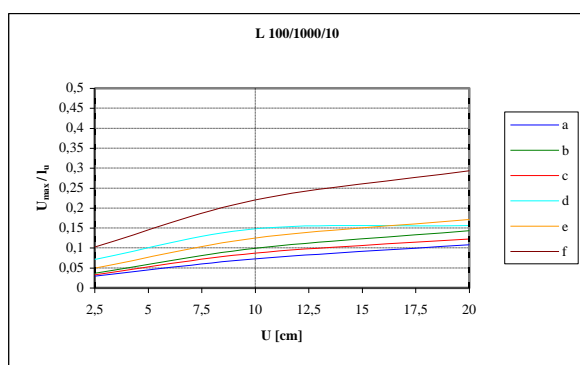
Slika 60: Sila v tlačni diagonali pri $\phi = 0,01$ Slika 61: Sila v tlačni diagonali pri $\phi = 0,04$ Slika 62: Sila v tlačni diagonali pri $\phi = 0,08$

Pri povečevanju pomika se sila v tlačni diagonali znižuje; največja redukcija je tako dosežena v območju vitkosti $\bar{\lambda} = 0,7 - 1,5$. Prav tako je redukcija pri togo vpetih diagonalah večja napram členkastemu vpetju.

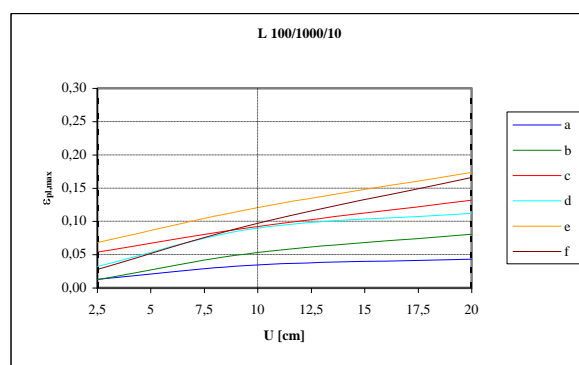
Preglednica 15: Povprečna redukcija tlačne nosilnosti

Območje vitkosti	$0,5 < \bar{\lambda} < 1,4$	$1,5 < \bar{\lambda} < 4,0$
$\phi = 0,01$	50 %	30 %
$\phi = 0,04$	83 %	72 %
$\phi = 0,08$	89 %	84 %

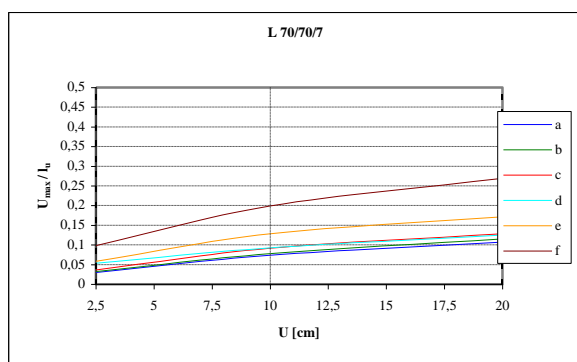
Kot je bilo že omenjeno, smo za oceno poškodovanosti diagonal vpeljali dva parametra: največji pomik v smeri uklona, normiran z uklonsko dolžino diagonale ter največje plastične deformacije v tlačni diagonali. Največji relativni pomik v smeri uklona se ne glede na vitkost diagonale zgodi pri togo priključenih in togo spajanih diagonalah (IIf), najmanjši pa pri členkasto priključenih diagonalah (Ia). Na splošno so pomiki v smeri uklona večji pri togo priključenih diagonalah (Ib, IId, IIf), medtem ko so največje plastične deformacije prisotne pri členkasto priključenih diagonalah.



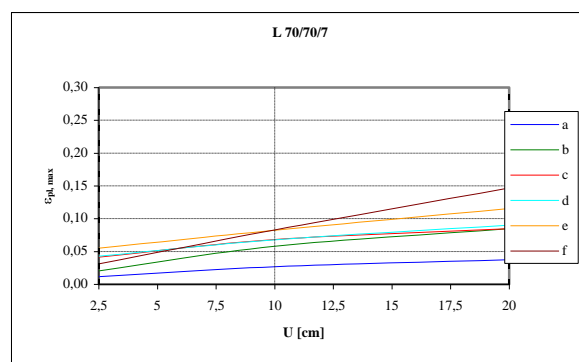
Slika 63: Največji normirani pomiki tlačne diagonale v smeri uklona (L 100/100/10)



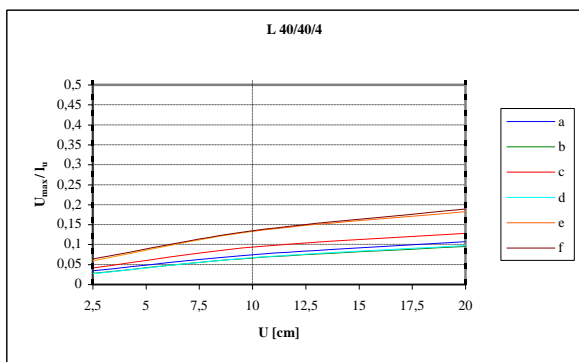
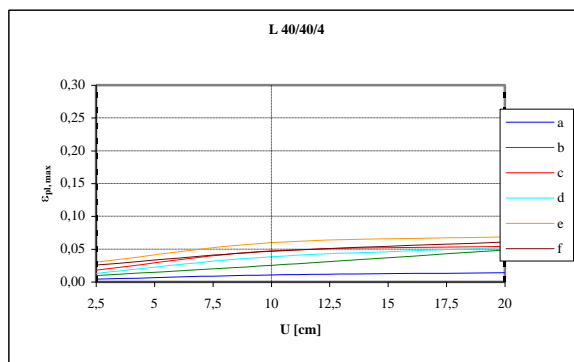
Slika 64: Največje plastične deformacije v tlačni diagonali (L 100/100/10)



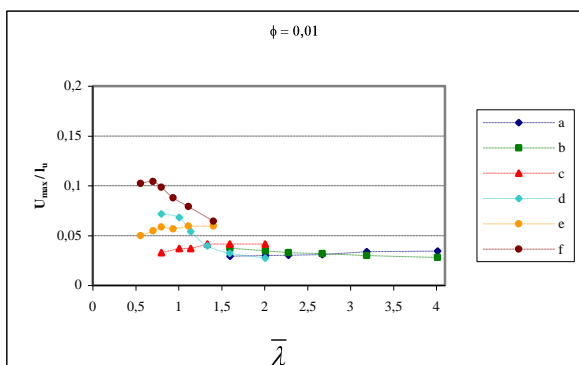
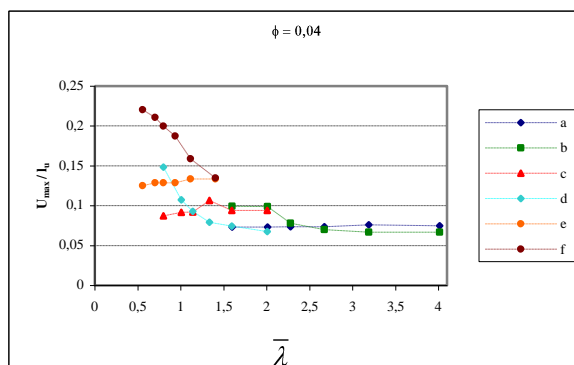
Slika 65: Največji normirani pomiki tlačne diagonale v smeri uklona (L 70/70/7)

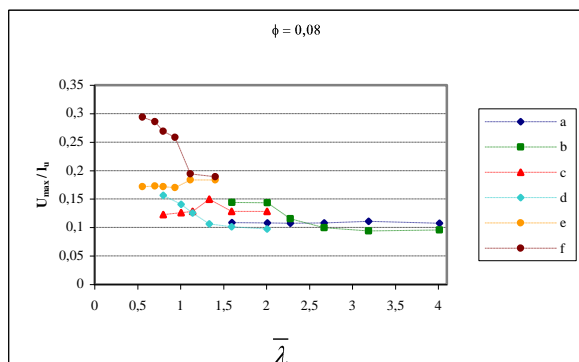


Slika 66: Največje plastične deformacije v tlačni diagonali (L 70/70/7)

Slika 67: Največji normirani pomiki tlačne diagonale v smeri uklona ($L 40/40/4$)Slika 68: Največje plastične deformacije v tlačni diagonali ($L 40/40/4$)

Če primerjamo največje normirane pomike v smeri uklona pri različnih vitkosti, ugotovimo, da se pomiki togo priključenih diagonal (pomiki izven ravnine okvirja) z vitkostjo manjšajo. V območju majhnih vitkosti je padec še posebno izrazit, ter se z večanjem vitkosti izgublja. Pomiki členkasto priključenih diagonal (pomiki v ravnini okvirja) z vitkostjo ne spreminjajo.

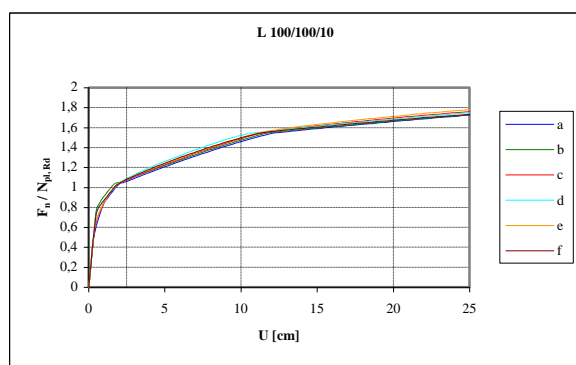
Slika 69: Največji normirani pomiki v smeri uklona pri $\phi = 0,01$ Slika 70: Največji normirani pomiki v smeri uklona pri $\phi = 0,04$



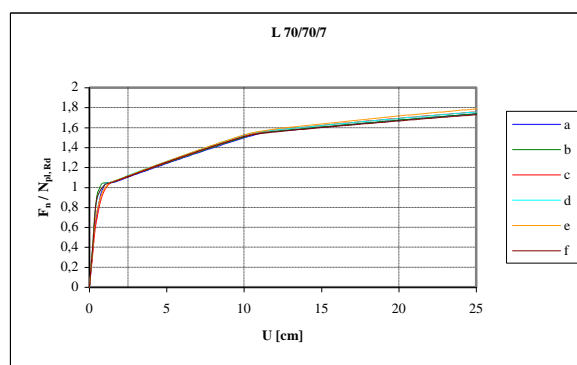
Slika 71: Največji normirani pomiki v smeri uklona pri $\phi = 0,08$

4.1.1.2 Natezna diagonala

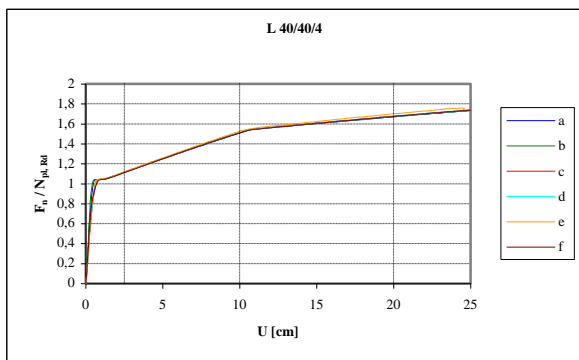
Iz primerjave potekov nateznih sil za izbrane prečne prereze lahko ugotovimo, da pogoji vpetja in stikovanja na natezno nosilnost nimajo bistvenega vpliva. Opazimo lahko sicer majhne razlike, ki pa so posledica začetnih geometrijskih nepopolnosti. Za varianto Ia in Ib (nestikovane diagonale) so bile geometrijske nepopolnosti upoštevane samo za tlačno diagonalo, za variante IIC, IID, IIE in IIF (stikovane diagonale) pa so bile geometrijske nepopolnosti upoštevane tako za tlačno kot tudi natezno diagonalo.



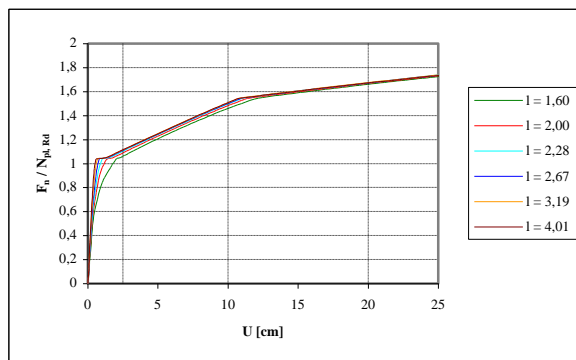
Slika 72: Sila v natezni diagonali (L 100/100/10)



Slika 73: Sila v natezni diagonali (L 70/70/7)



Slika 74: Sila v natezni diagonali (L 40/40/4)

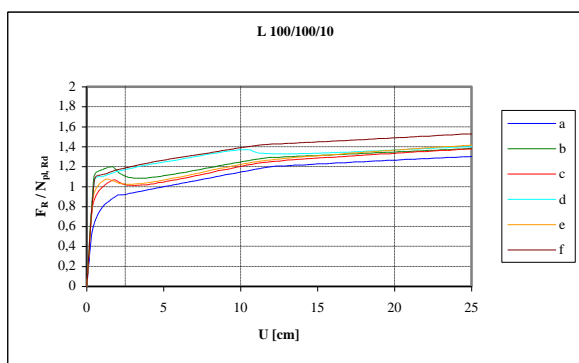


Slika 75: Potek sile v natezni diagonali pri različnih vitkostih

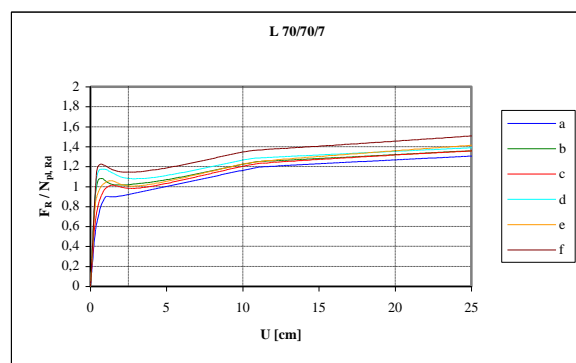
Če primerjamo potek nateznih sil v diagonalah z istimi pogoji vpetja in stikovanja ter različnimi vitkostmi, ugotovimo, da se z zmanjševanjem vitkosti elementa izgublja plato tečenja ter da je za dosego iste sile potreben večji pomik. Kot je bilo že večkrat omenjeno, so kotniki ekscentrično pritrjeni na vozliščno pločevino, kar v diagonali pri natezni obremenitvi povzroča dodatni moment, katerega vpliv se večja z zmanjševanjem vitkosti.

4.1.1.3 Horizontalna reakcija na okvir

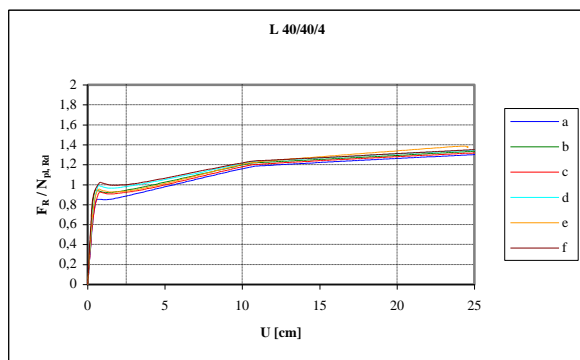
Horizontalna reakcija na okvir prevzame horizontalne komponente sil v natezni ter tlačni diagonali. Jasno je razvidno povišanje reakcijske sile za diagonale z visoko uklonsko silo ter veliko nosilnostjo v post-kritične območju.



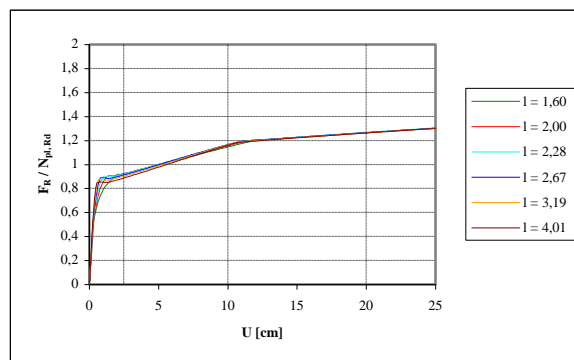
Slika 76: Horizontalna reakcija na okvir (L 100/100/10)



Slika 77: Horizontalna reakcija na okvir (L 70/70/7)



Slika 78: Horizontalna reakcija na okvir (L 40/40/4)



Slika 79: Potek horizontalne reakcije pri različnih vitkosti

4.1.2 U profili

Pri vseh simulacijah z uporabo U-profilov prevladuje uklon izven ravnine okvirja, razen v primeru profila U 50, kjer je zaradi vitkosti elementa ter členkastega vpetja diagonale prevladujoč uklon v ravnini okvirja.

Preglednica 16: Pregled simulacij U-profilov

Tip	Varianta	Priključek diagonale na okvir	Stikovanje diagonal	Uklon
I	a	členkast	/	izven ravnine okvirja
	b	tog	/	izven ravnine okvirja
II	c	členkast	členkasto	izven ravnine okvirja
	d	tog	členkasto	izven ravnine okvirja
	e	členek	togo	izven ravnine okvirja
	f	tog	togo	izven ravnine okvirja

Pri primerjavi rezultatov numerične analize z vrednostimi, določenimi po standardu SIST EN 1993-1-1, je bila ponovno upoštevana merodajna od relativne vitkosti pri upogibnem in upogibno-torzijskem uklonu.

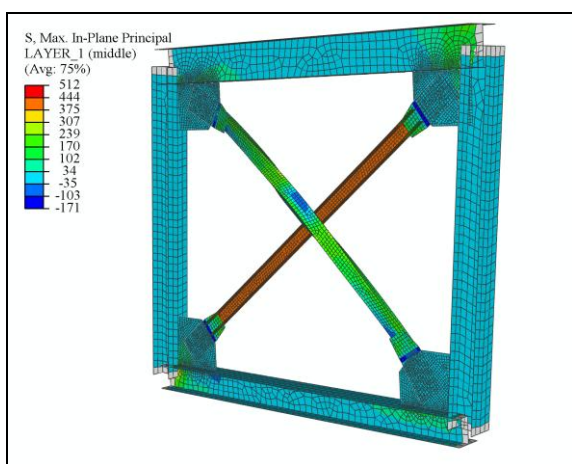
Preglednica 17: Relativne vitkosti U-profilov pri upogibnem in upogibno-torzijskem uklonu

	a		b		c		d		e		f	
	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_t$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_t$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_t$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_t$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_t$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}_t$
U 140	1,78	0,74	1,78	0,74	0,89	0,56	0,89	0,56	0,62	0,47	0,62	0,47
U 100	2,12	0,89	2,12	0,89	1,06	0,60	1,06	0,60	0,74	0,51	0,74	0,51
U 80	2,34	1,06	2,34	1,06	1,17	0,63	1,17	0,63	0,82	0,52	0,82	0,52
U 60	3,73	1,43	3,73	1,43	1,87	0,74	1,87	0,74	1,31	0,56	1,31	0,56
U 50	2,76	1,66	2,76	1,66	1,38	0,88	1,38	0,88	0,96	0,67	0,96	0,67

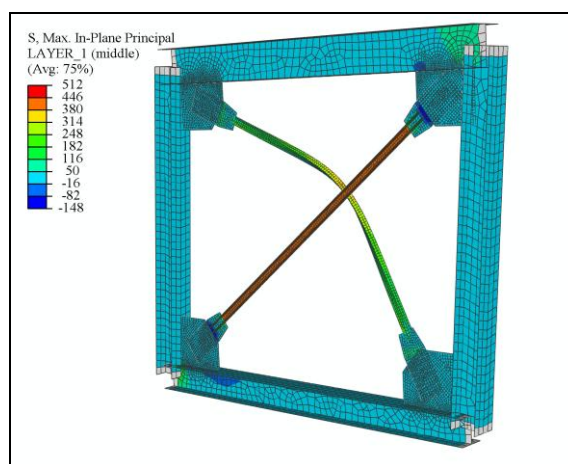
* Relativne vitkosti, ki ne ustrezajo omejitvam SIST EN 1998-1, so izpisane z rdečo barvo

Na spodnjih slikah je prikazan potek napetosti in deformiranje okvirja z diagonalama za vseh šest variant priključevanja in spajanja diagonal, ter za dve različni vitkosti diagonal. Rezultati ustrezajo vrednosti horizontalnega pomika $U = 20$ cm.

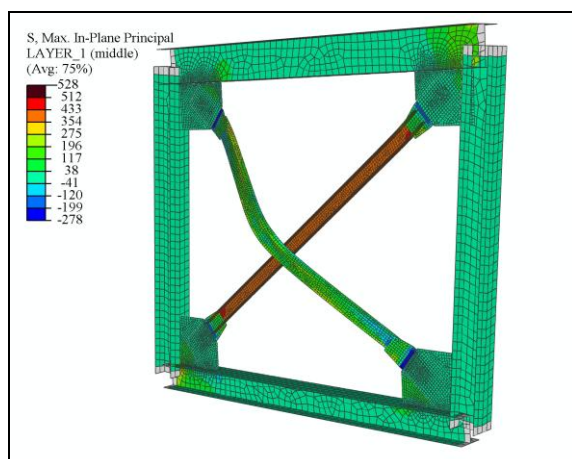
Pri členkasto priključeni diagonali (Ia) je izrazit upogibno-torzijski uklon, zaradi česar so napetosti v plastičnem območju. Togo priključena diagonala (Ib) se nasprotno ukloni upogibno izven ravnine pri nizkih elastičnih napetostih, saj se celotna plastična deformacija izvrši samo v vezni pločevini.



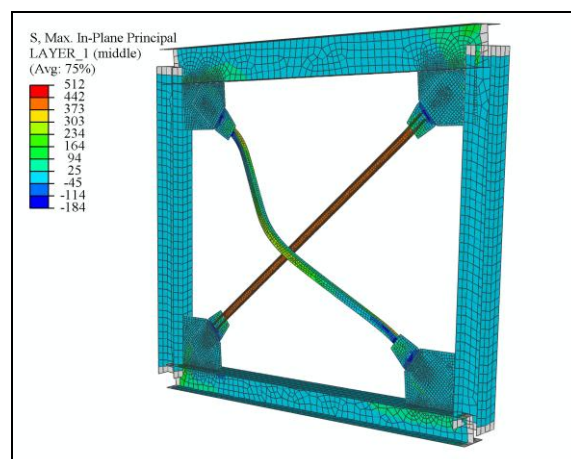
Slika 80: U 100 (Ia)



Slika 81: U 50 (Ia)

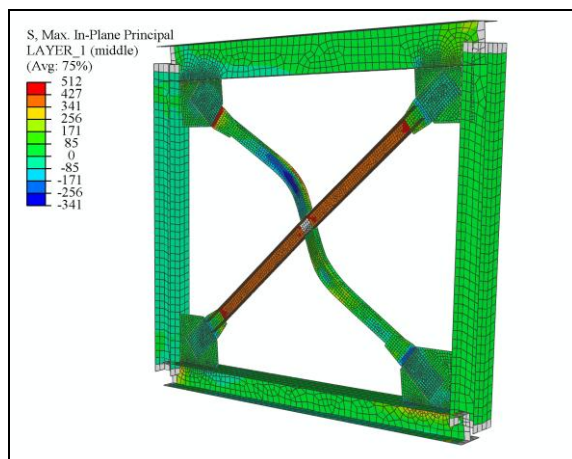


Slika 82: U 100 (Ib)

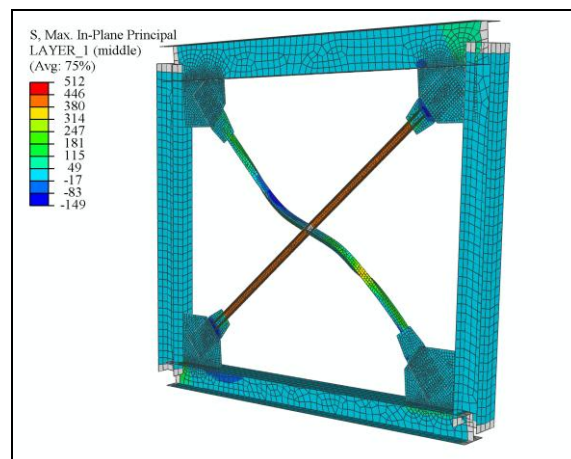


Slika 83: U 50 (Ib)

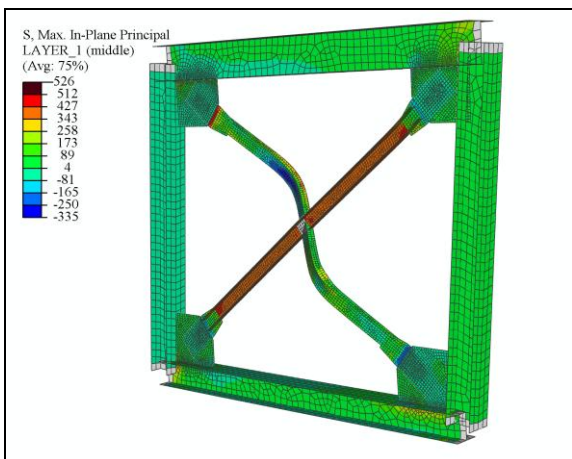
Spajanje diagonal povzroči v tlačni diagonal bistveno višje plastične napetosti, ki dosežejo največjo vrednost pri primeru togo priključene in togo spajane diagonale (IIf). Napetosti so s eveda višje pri toгих elementih.



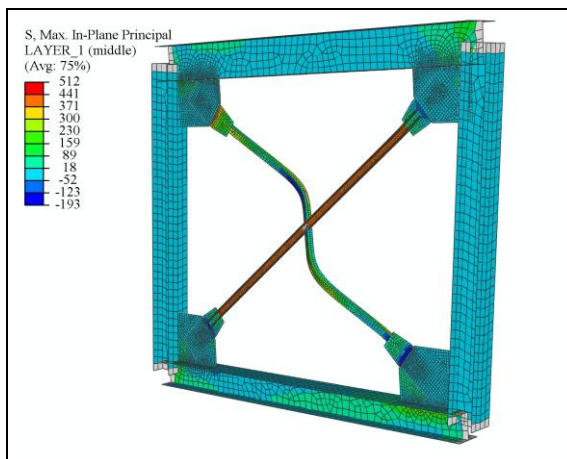
Slika 84: U 100 (IIc)



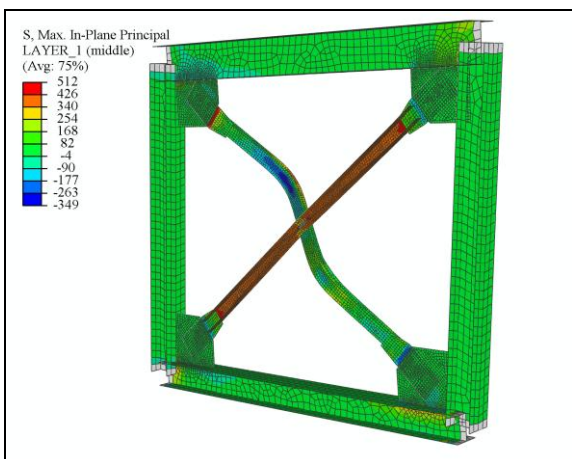
Slika 85: U 50 (IIc)



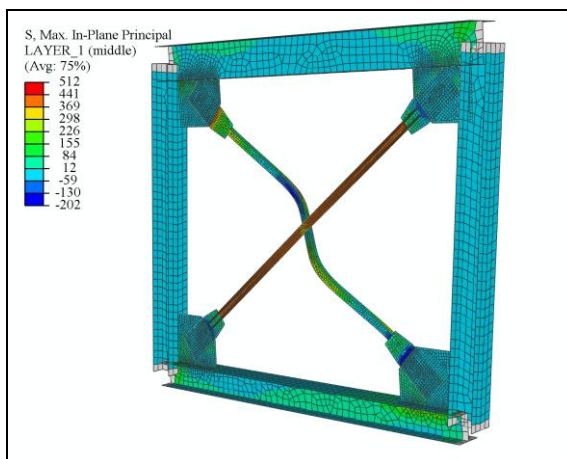
Slika 86: U 100 (II d)



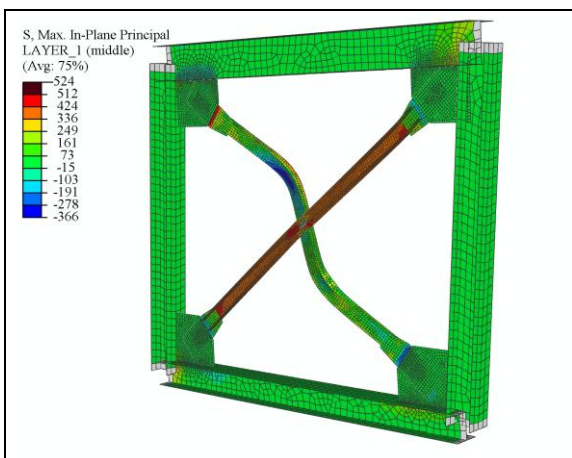
Slika 87: U 50 (II d)



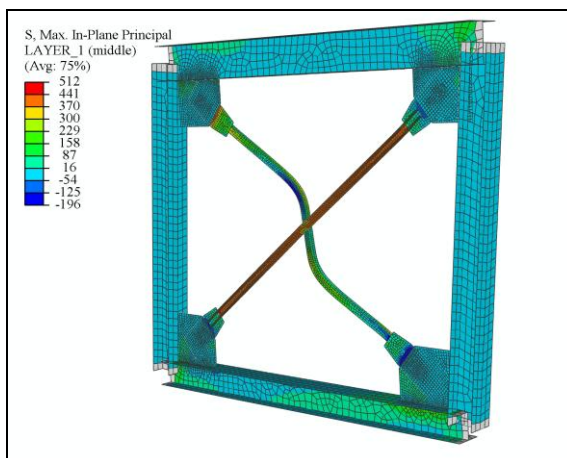
Slika 88: U 100 (II e)



Slika 89: U 50 (II e)



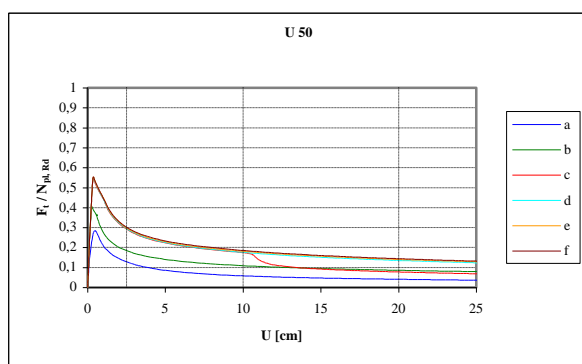
Slika 90: U 100 (II f)



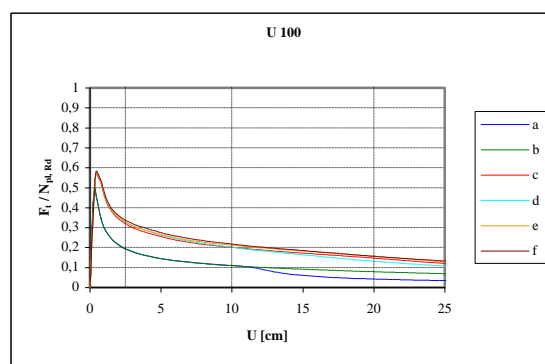
Slika 91: U 50 (II f)

4.1.2.1 Tlačna diagonala

Ker se v vseh simulacijah U profili izklonijo iz ravnine okvirja, so razlike v uklonskih silah ter nosilnosti v post-kritičnem območju prisotne le med stikovanimi in nestikovanimi diagonalami. Tako je uklonska nosilnost stikovanih diagonal za dobrih 10 % višja od nosilnosti nestikovanih diagonal.

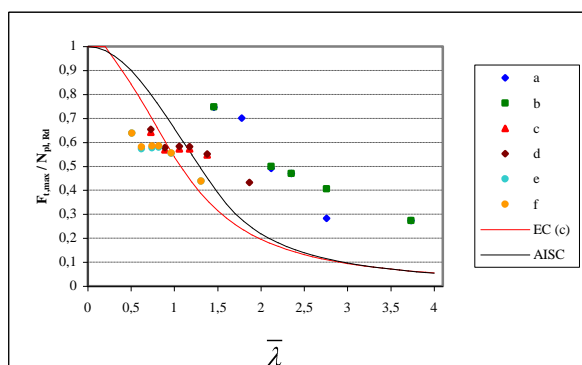


Slika 92: Sila v tlačni diagonali (U 50)

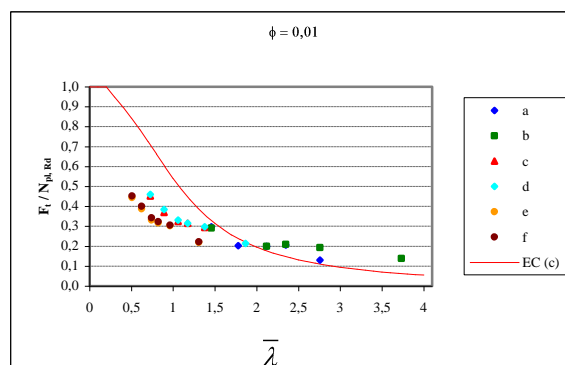


Slika 93: Sila v tlačni diagonali (U 100)

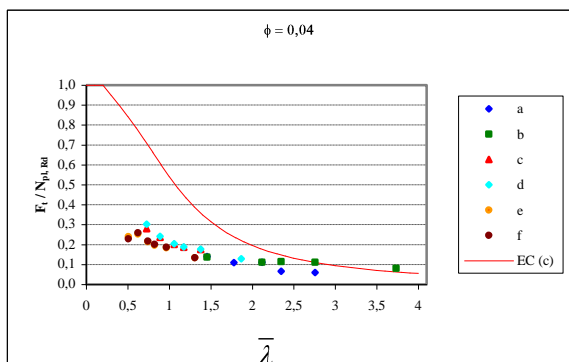
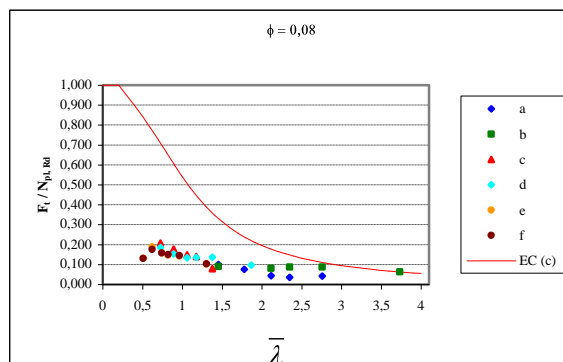
Če primerjamo uklonske sile iz rezultatov numeričnih simulacij z vrednostmi SIST EN 1993-1-1, ugotovimo, da so dobljene uklonske sile za primer nestikovanih diagonal (Ia, Ib) višje, pri stikovanih diagonalah oz. v območju majhnih vitkosti pa zopet nižje za približno 20%. Največja redukcija uklonske nosilnosti je podobno kot pri kotnikih prisotna v območju vitkosti $\bar{\lambda} = 0,5 - 1,5$, redukcija je večja pri togo priključenih diagonalah.



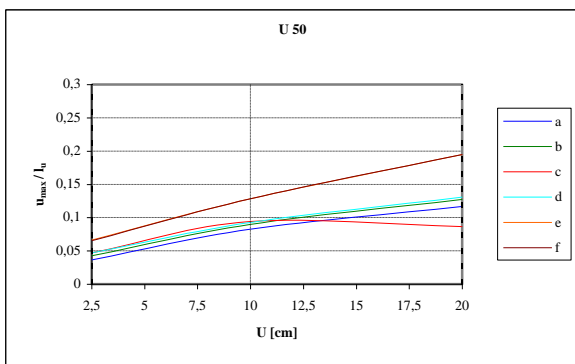
Slika 94: Uklonske sile U profilov



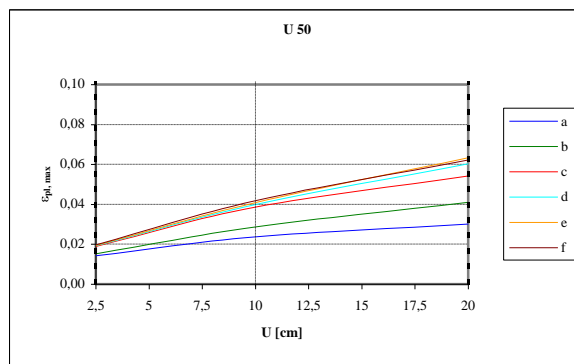
Slika 95: Sila v tlačni diagonali pri $\phi = 0,01$

Slika 96: Sila v tlačni diagonali pri $\phi = 0,04$ Slika 97: Sila v tlačni diagonali pri $\phi = 0,08$

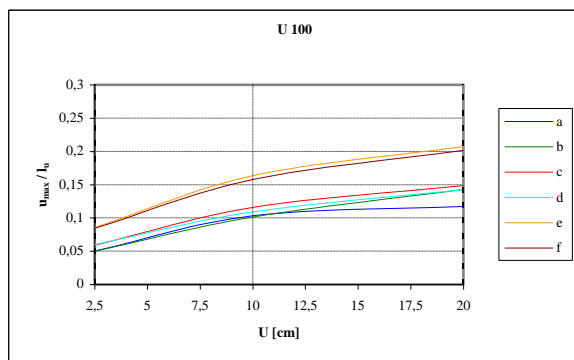
Za oceno poškodovanosti diagonale smo zopet uporabili največji normiran pomik ter največje plastične deformacije tlačene diagonale. Največji normiran pomik v smeri uklona ter največje plastične deformacije so bile istočasno dosežene pri togo vpetih diagonalah (Ile in IIf). Plastične deformacije so pri U profilih zelo nizke, saj pri pomiku, ki odgovarja stanju tik pred porušitvijo, znašajo manj kot 10%.



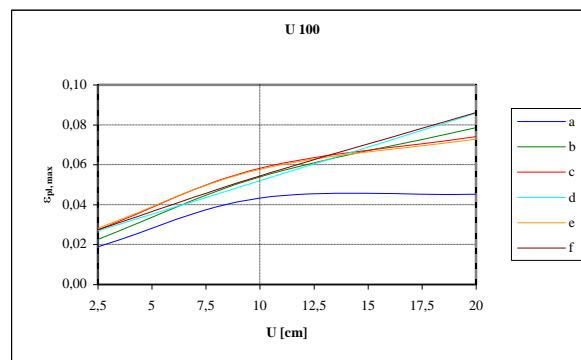
Slika 98: Največji normirani pomiki tlačene diagonale (U 50)



Slika 99: Največje plastične deformacije v tlačni diagonali (U 50)

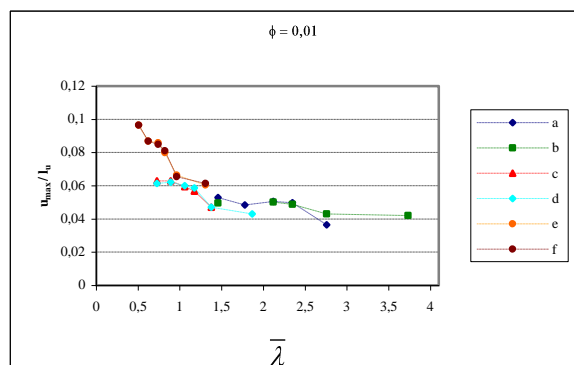


Slika 100: Največji normirani pomiki tlačene diagonale (U 100)

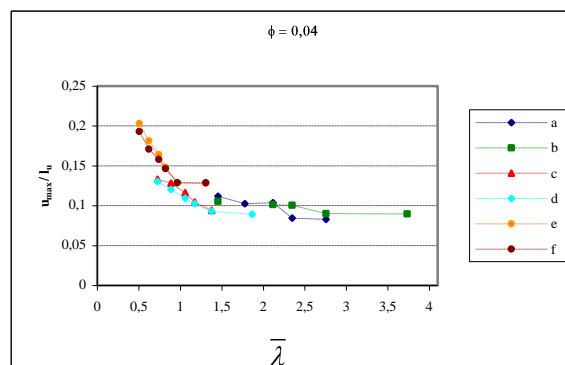


Slika 101: Največje plastične deformacije v tlačeni diagonali (U 100)

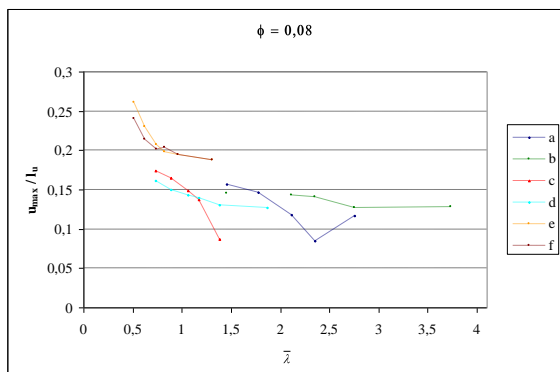
Največji pomiki iz ravnine se z večanjem vitkosti zmanjšujejo. Padeč je bolj izrazit v območjih majhnih vitkosti. Pri velikih vitkosti namreč plastični členek nastane pri nižjih napetostih, zato so tudi zahteve po plastičnem deformiranju v temu primeru manjše. Uklon je tako manj izrazit, pomiki v smeri uklona se temu primerno zmanjšajo.



Slika 102: Največji normirani pomiki tlačene diagonale pri $\phi = 0,01$



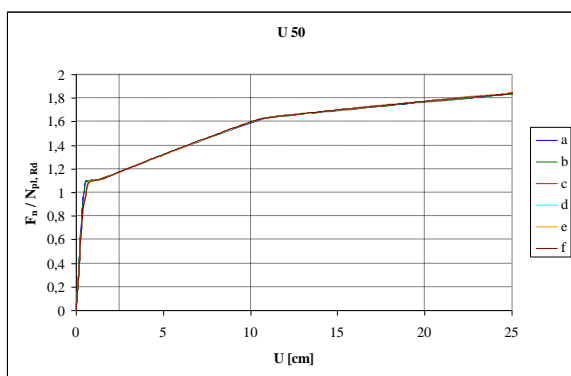
Slika 103: Največji normirani pomiki tlačene diagonale pri $\phi = 0,04$



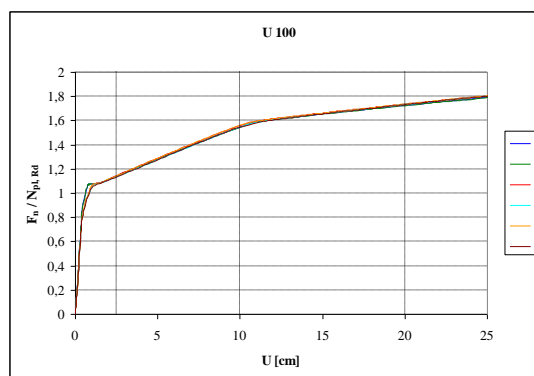
Slika 104: Največji normirani pomiki tlačene diagonale pri $\phi = 0,08$

4.1.2.2 Natezna diagonala

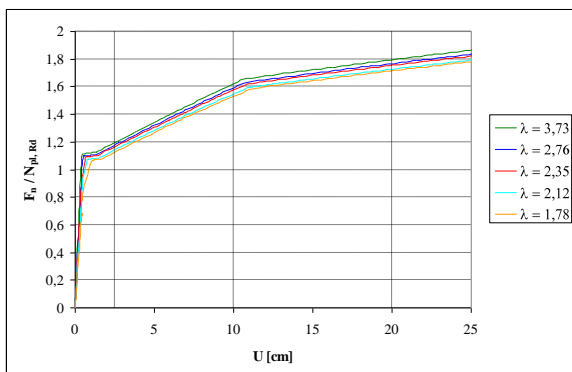
Sila v natezni diagonali se pri različnih pogojih stikovanja ter spajanja diagonal ne razlikuje bistveno. Vpliv ekscentričnosti pritrjevanja je viden, če primerjamo silo v nateznih diagonalah pri istih pogojih stikovanja ter spajanja, a različnih vitkosti. Vitke diagonale imajo izrazit plato tečenja, ki se z zmanjševanjem vitkosti izgublja ter znižuje. Vpliv dodatnega momenta namreč povzroči dodatne napetosti, zaradi katerih se plastifikacija v diagonali prične pri nižji natezni sili.



Slika 105: Sila v natezni diagonali (U 50)



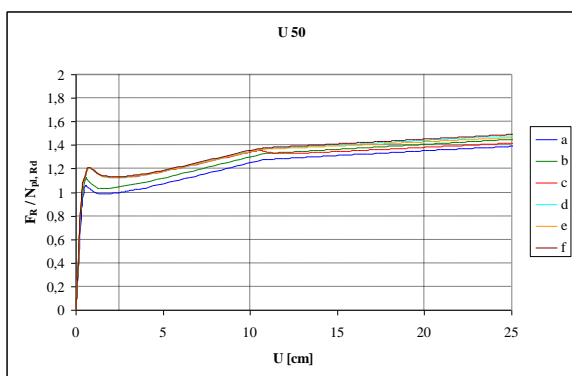
Slika 106: Sila v natezni diagonali (U 100)



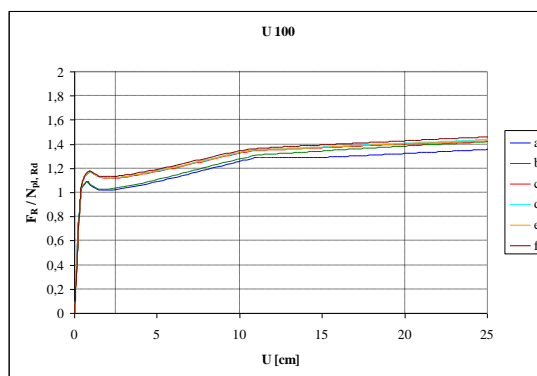
Slika 107: Potek sile v natezni diagonali pri različnih vitkostih

4.1.2.3 Horizontalna reakcija na okvir

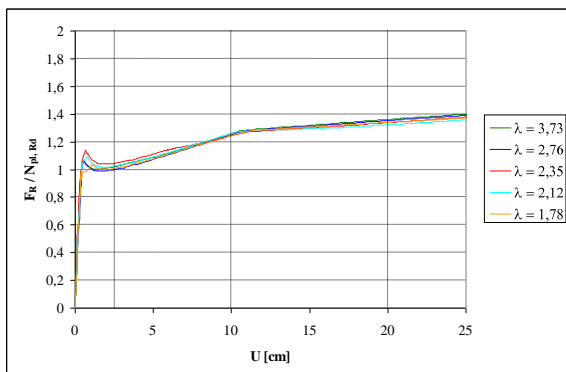
Najvišja horizontalna reakcija na okvir se pojavi v primeru stikovanih diagonal, kjer je reakcijska sila do 10% večja kot pri nestikovanih diagonalah.



Slika 108: Horizontalna reakcija na okvir (U 50)



Slika 109: Horizontalna reakcija na okvir (U 100)



Slika 110: Potek horizontalnih reakcij pri različnih vitkosti

4.1.3 SHS profili

SHS cevi so se kot edini modelirani simetrični profili v primeru členkastega vpetja uklonili v ravnini okvirja, v primeru togega vpetja pa izven ravnine okvirja.

Preglednica 18: Pregled simulacij SHS profilov

Tip	Varianta	Priključek diagonale na okvir	Stikovanje diagonal	Uklon
I	a	členkast	/	v ravnini okvirja
	b	tog	/	izven ravnine okvirja
II	c	členkast	členkasto	v ravnini okvirja
	d	tog	členkasto	izven ravnine okvirja
	e	členek	togo	v ravnini okvirja
	f	tog	togo	izven ravnine okvirja

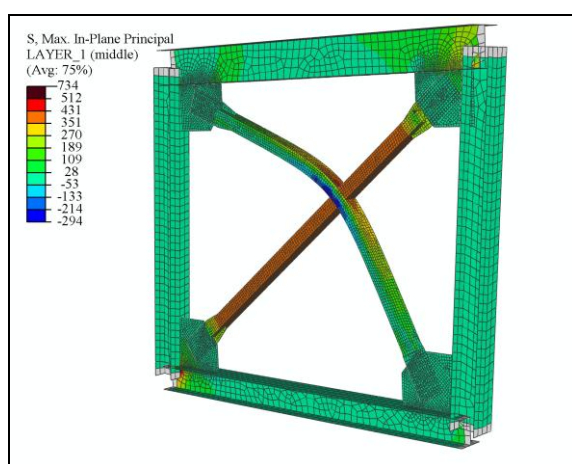
Pri primerjavi numerični rezultatov z vrednostmi iz standarda SIST EN 1993-1-1, je bila upoštevana vitkost pri upogibnem uklonu, saj je torzijska odpornost SHS cevi neprimerno večja od upogibne.

Preglednica 19: Relativne vitkosti SHS profilov pri upogibnem uklonu

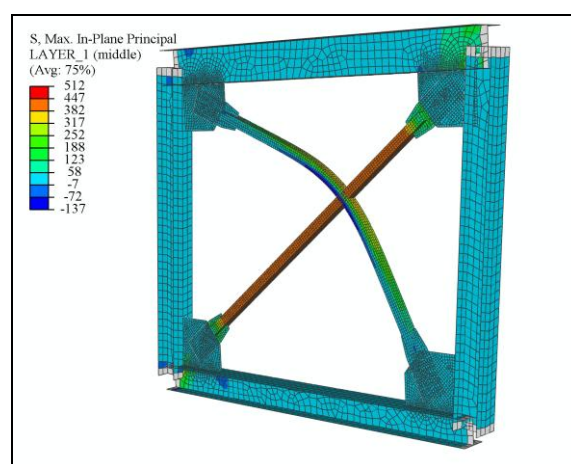
	a	b	c	d	e	f
	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}$
SHS 100/100/5	0,81	0,81	0,40	0,40	0,28	0,28
SHS 80/80/5	1,02	1,02	0,51	0,51	0,36	0,36
SHS 70/70/4	1,17	1,17	0,58	0,58	0,41	0,41
SHS 60/60/3	1,35	1,35	0,67	0,67	0,47	0,47
SHS 50/50/2	1,61	1,61	0,80	0,80	0,56	0,56

OP.: Relativne vitkosti, ki ne ustrezajo omejitvam SIST EN 1998-1, so izpisane z rdečo barvo.

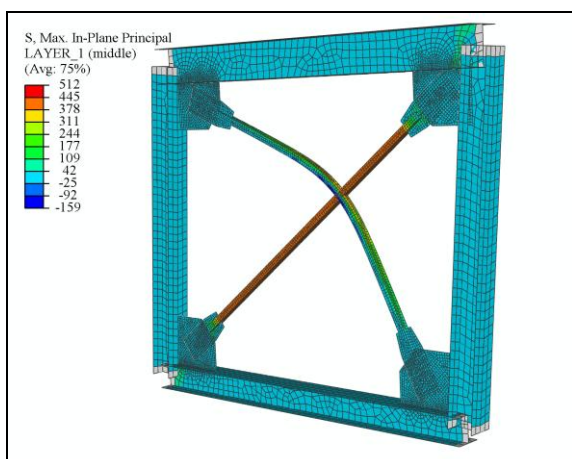
Uklon SHS cevi je bil seveda najbolj odvisen od pogojev priključevanja ter stikovanja diagonal. V primeru členkastega priključevanja (Ia), se je toga tlačna diagonalna uklonila pri plastičnih napetostih, medtem ko so bile napetosti v vitki diagonalni pod mejo plastičnosti. Uklon izven ravnine (Ib) se je zgodil pod precej višjimi napetostmi s formiranjem plastičnega členka ne glede na vitkost.



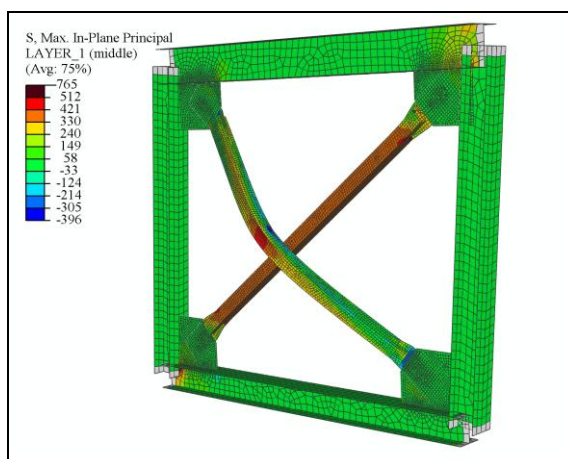
Slika 111: SHS 100/100/5 (Ia)



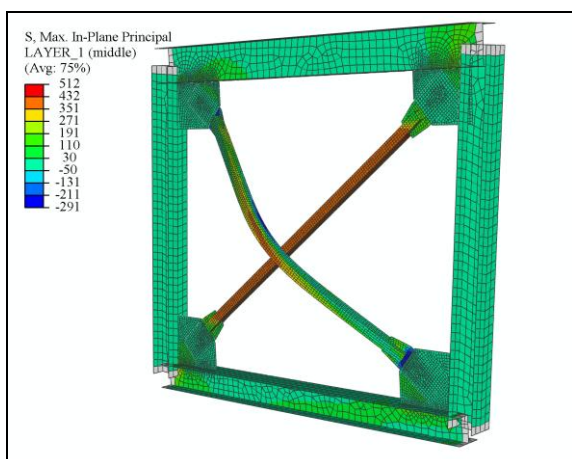
Slika 112: SHS 70/70/4 (Ia)



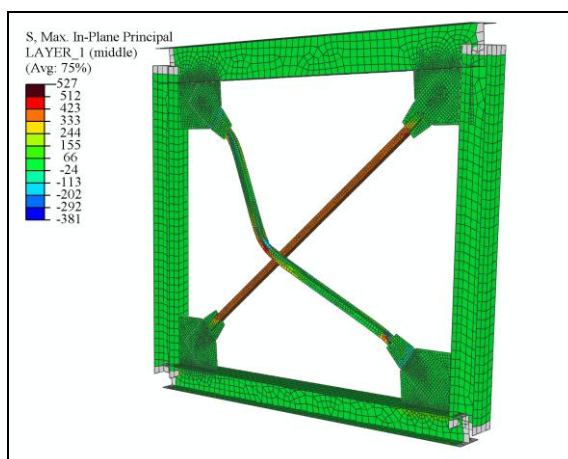
Slika 113: SHS 50/50/2 (Ia)



Slika 114: SHS 100/100/5 (Ib)

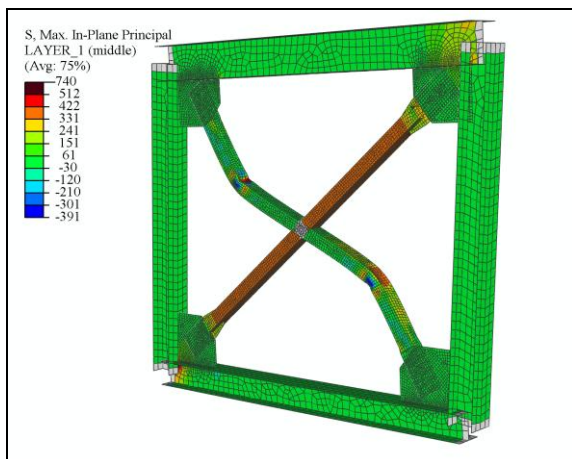


Slika 115: SHS 70/70/7 (Ib)

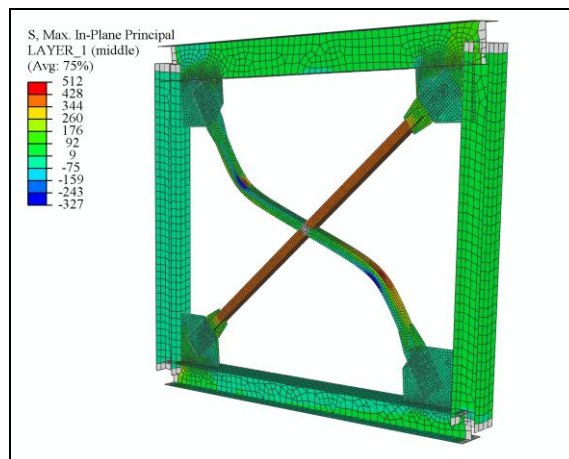


Slika 116: SHS 50/50/2 (Ib)

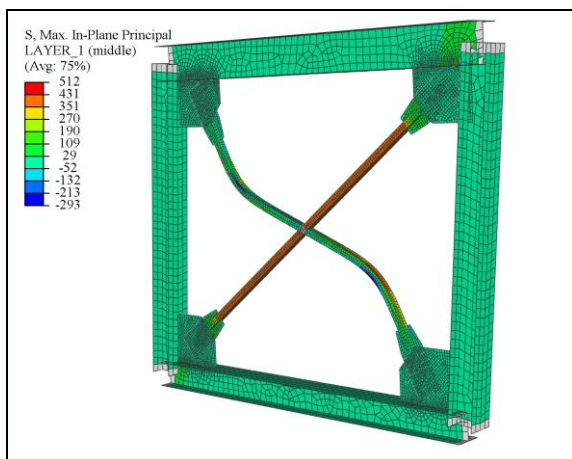
Stikovanje diagonal je v tolikšnji meri zmanjšalo vitkost tlačne diagonale, da so se v vseh simulacijah stikovanih diagonal oblikovala območja izjemo visokih plastičnih napetostih, ki so v primeru togih elementov dosegla natezno trdnost, kar je seveda povzročilo porušitev diagonale.



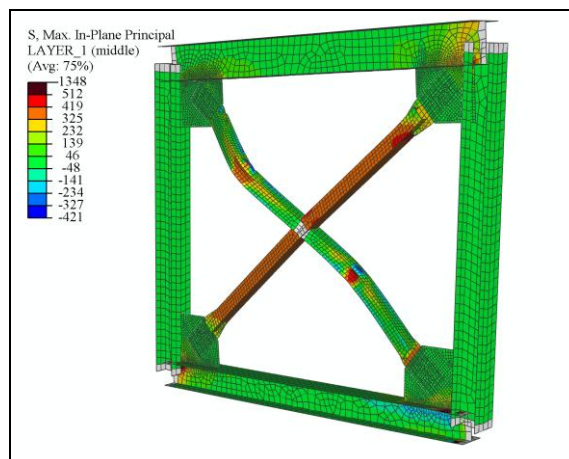
Slika 117: SHS 100/100/5 (IIc)



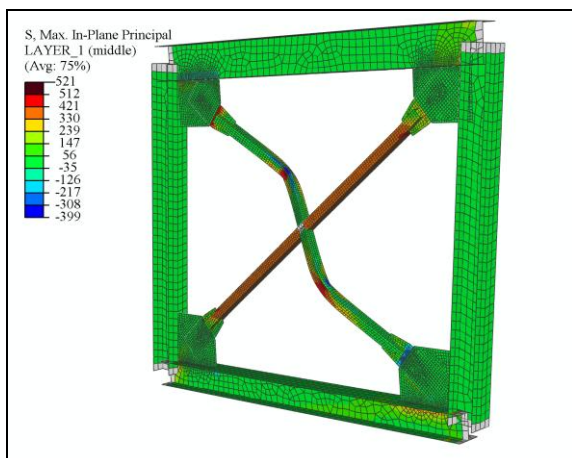
Slika 118: SHS 70/70/4 (IIc)



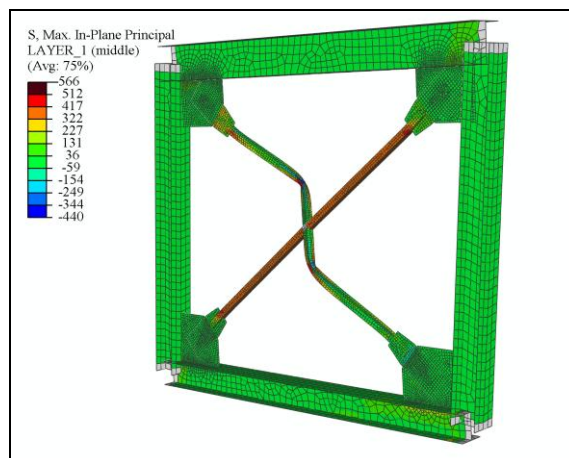
Slika 119: SHS 50/50/2 (IIc)



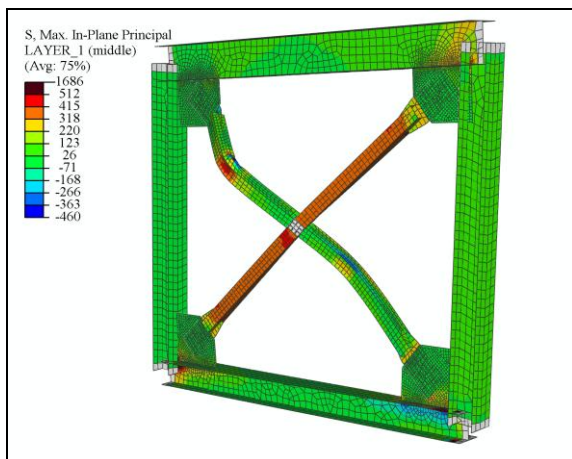
Slika 120: SHS 100/100/5 (IIId)



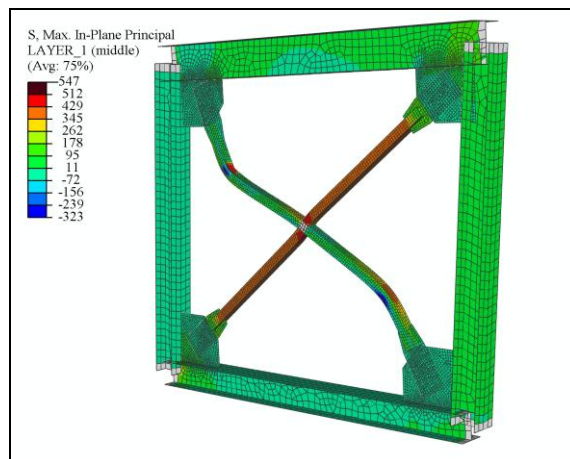
Slika 121: SHS 70/70/4 (IIId)



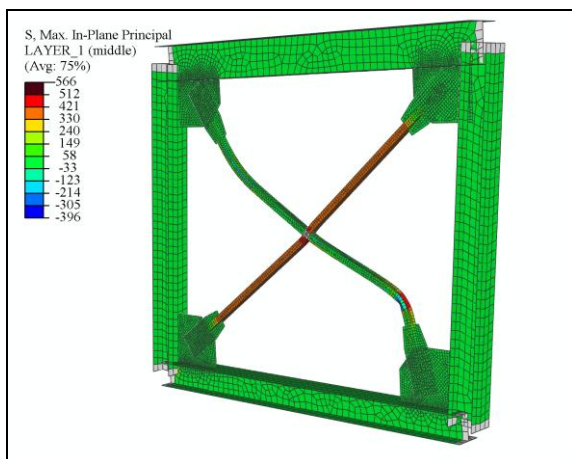
Slika 122: SHS 50/50/2 (IIId)



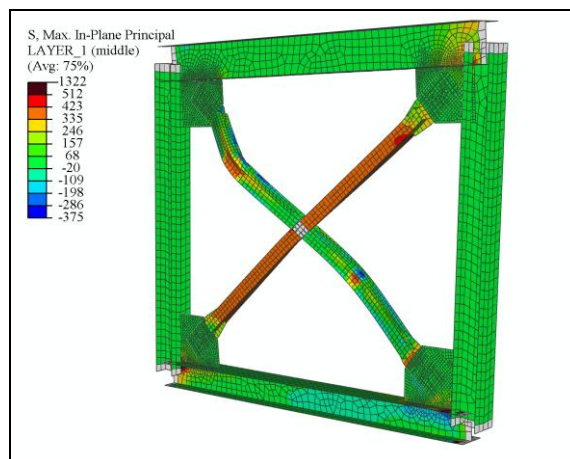
Slika 123: SHS 100/100/5 (Ile)



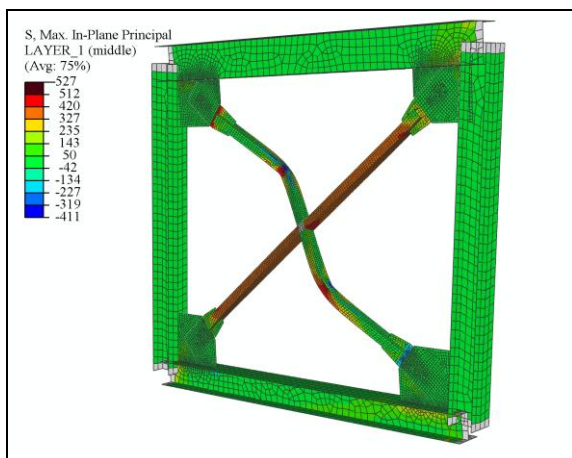
Slika 124: SHS 70/70/4 (Ile)



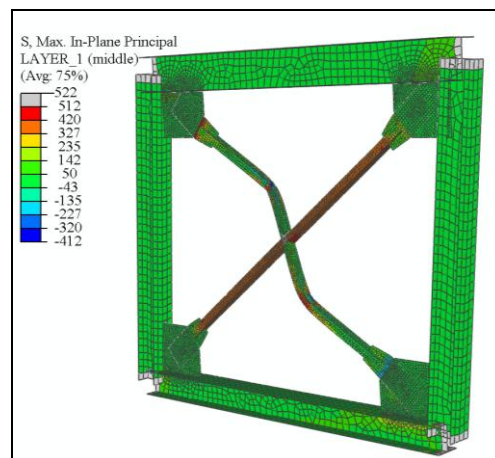
Slika 125: SHS 50/50/2 (Ile)



Slika 126: SHS 100/100/5 (IIf)



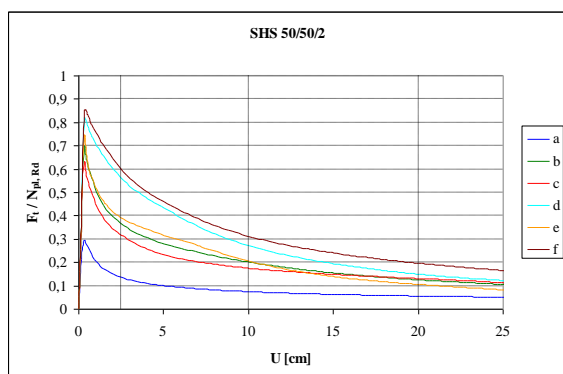
Slika 127: SHS 70/70/4 (IIf)



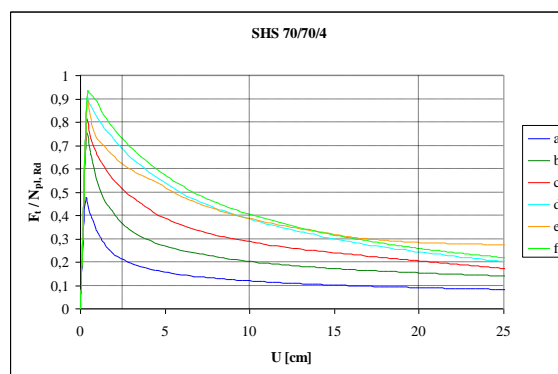
Slika 128: SHS 50/50/2 (IIf)

4.1.3.1 Tlačna diagonala

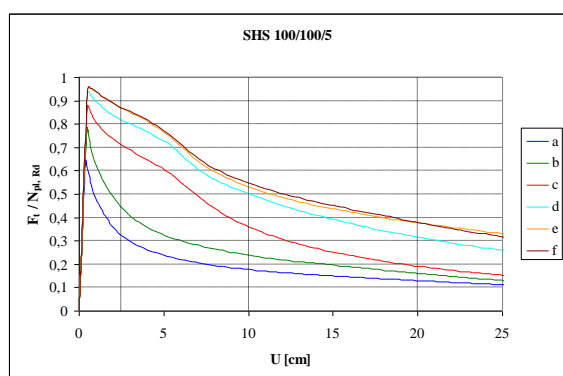
Tlačna nosilnost SHS cevi je izredno visoka, saj imajo cevi veliko uklonsko odpornost, poleg tega se uklonijo v čistem upogibu. Najvišja uklonska nosilnost (IIf) tako znaša čez 90% natezne plastične nosilnosti prereza.



Slika 129: Sila v tlačni diagonali (SHS 50/50/2)

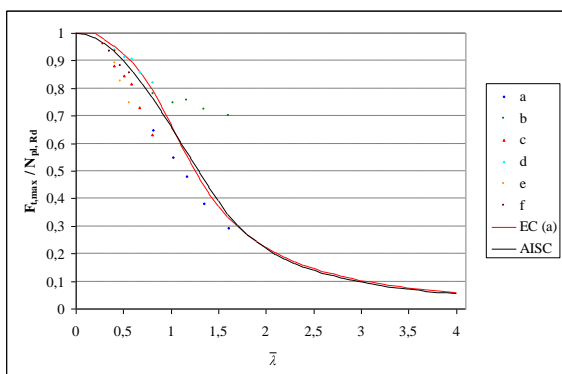


Slika 130: Sila v tlačni diagonali (SHS 70/70/4)

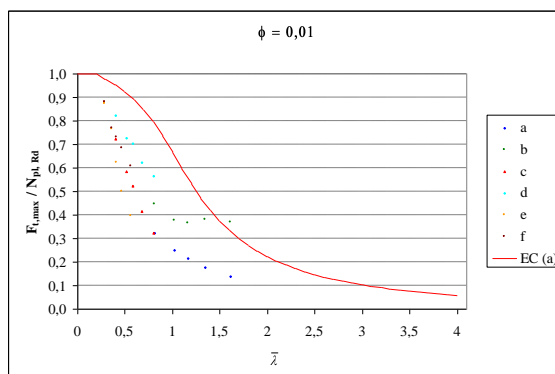
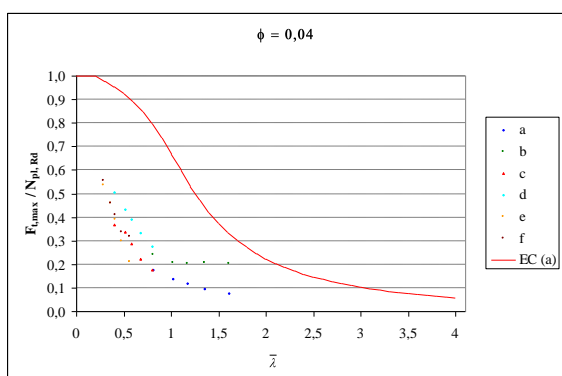
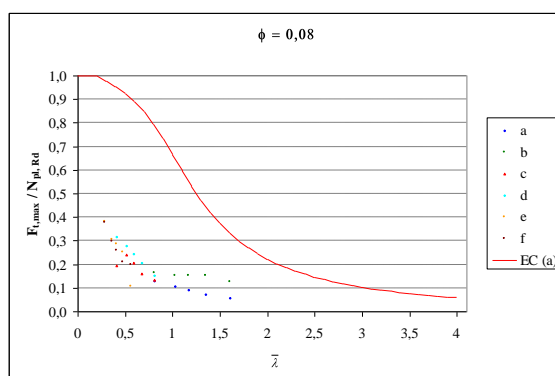


Slika 131: Sila v natezni diagonali (SHS 100/100/5)

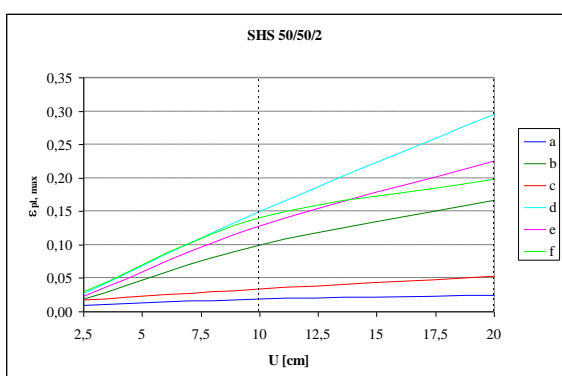
Numerično določene uklonske sile se zelo dobro ujemajajo z vrednostmi, določenimi po SIST EN 1993-1-1. SHS cevi se namreč uklonijo v čistem upogibnem uklonu, zato uklonske dolžine ter vitkost elementov ustrezajo dejanskemu obnašanju diagonale. Redukcija uklonske sile je največja v območju vitkosti $\bar{\lambda} = 0,7 - 1,2$, poleg tega je redukcija izrazitejša za členkasto vpete diagonale.



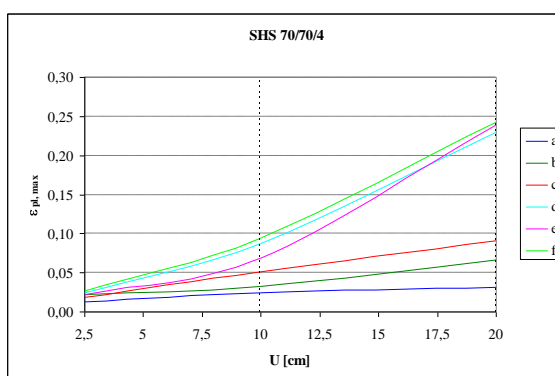
Slika 132: Uklonske sile SHS profilov

Slika 133: Sila v tlačni diagonali pri $\phi = 0,01$ Slika 134: Sila v tlačni diagonali pri $\phi = 0,04$ Slika 135: Sila v tlačni diagonali pri $\phi = 0,08$

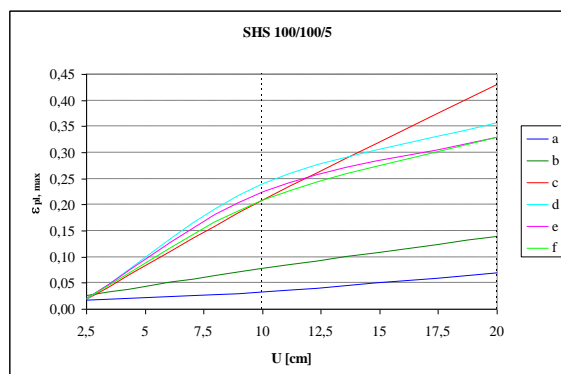
Ker se pri uklonu večine SHS profilov formira območje visokih plastičnih napetosti, ter tako do dejanskega uklona sploh ne pride, so pomiki v smeri uklona temu primerno manjši. Zato smo za oceno poškodovanosti tlačne diagonale uporabili samo plastične napetosti v tlačni diagonali.



Slika 136: Največje plastične deformacije v tlačni diagonali (SHS 50/50/2)



Slika 137: Največje plastične deformacije v tlačni diagonali (SHS 70/70/4)

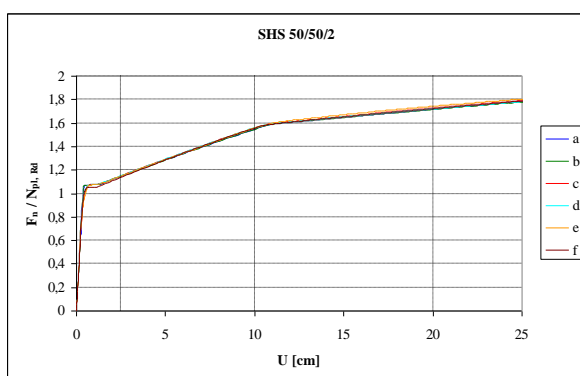


Slika 138: Največje plastične deformacije v tlačni diagonali (SHS 100/100/5)

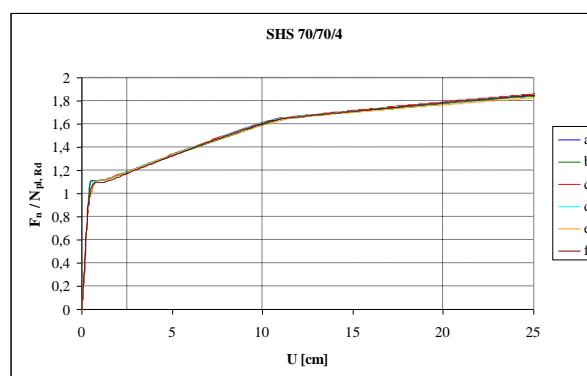
Iz zgornjih diagramov je jasno razvidno, da se v SHS ceveh formirajo izredno visoke plastične napetosti, ki v primeru pomika $U = 20$ cm presežejo deformacijo pri natezni trdnosti (22%), kar pa dejansko pomeni porušitev elementa. SHS cevi tako izkazujejo izredno majhno primernost za uporabo v povezjih centričnih okvirjev, saj je običajno merodajna porušitev zaradi lokalnega izbočenja v diagonali.

4.1.3.2 Natezna diagonala

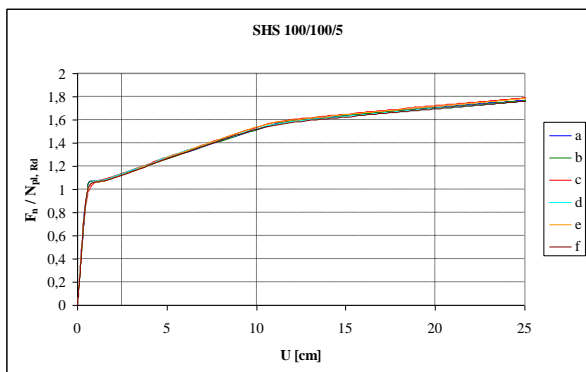
Iz spodnjih slik lahko vidimo, da pogoji priključevanja in stikovanja na natezno nosilnost diagonal nimajo vidnega vpliva. Ker so cevi na vozliščno pločevino pritrjene v težišču, se v natezni diagonali ne pojavijo bistvena odstopanja v poteku natezne sile glede na vitkost.



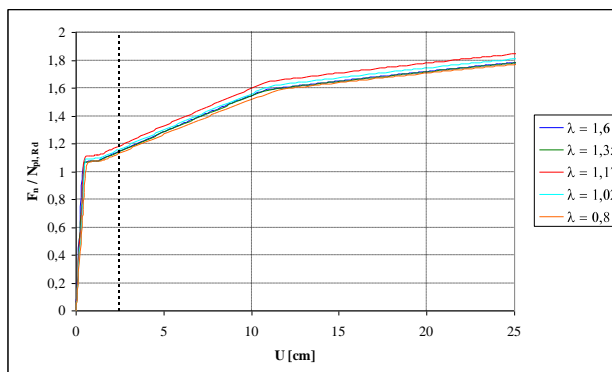
Slika 139: Sila v natezni diagonali (SHS 50/50/2)



Slika 140: Sila v natezni diagonali (SHS 70/70/4)



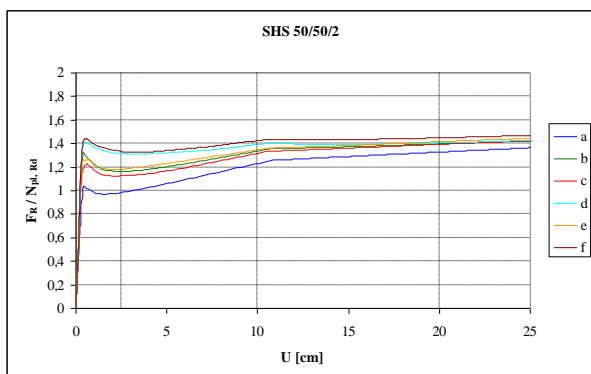
Slika 141: Sila v natezni diagonali (SHS 100/100/5)



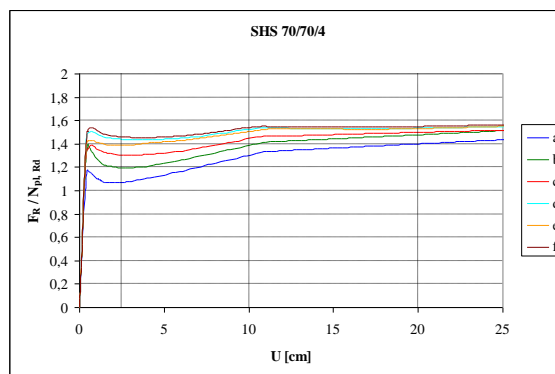
Slika 142: Sila v natezni diagonali pri različnih vitkosti

4.1.3.3 Horizontalna reakcija na okvir

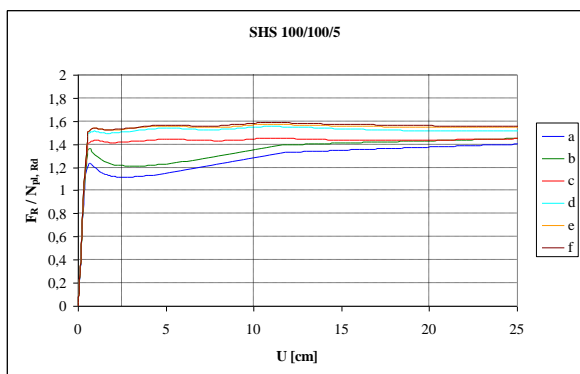
Horizontalna reakcija na okvir se povečuje skladno z uklonsko nosilnostjo diagonale.



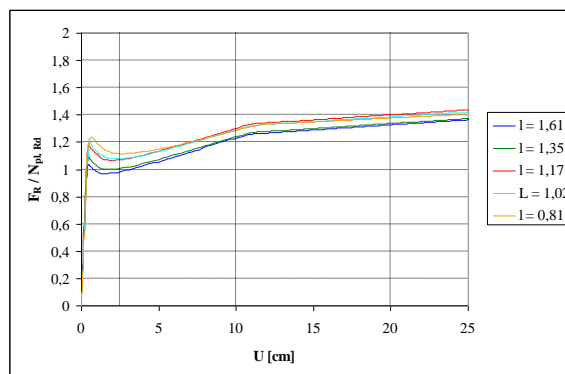
Slika 143: Horizontalna reakcija na okvir (SHS 50/50/2)



Slika 144: Horizontalna reakcija na okvir (SHS 70/70/4)



Slika 145: Horizontalna reakcija na okvir (SHS 100/100/5)



Slika 146: Horizontalna reakcija na okvir v odvisnosti od vitkosti

4.2 Ciklično obremenjevanje

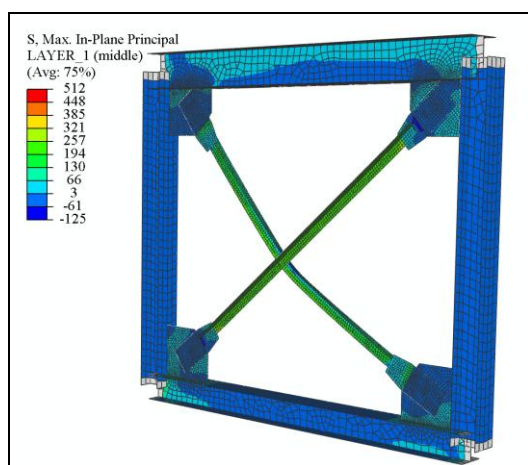
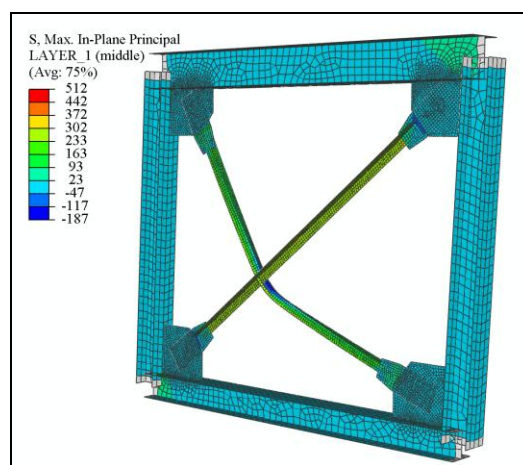
V sledečem poglavju so predstavljeni rezultati šestih numeričnih cikličnih simulacij. Simulacije so bile izvedene z uporabo istega prečnega prereza diagonal (L 60/60/6) pri različnih pogojih priključevanja in spajanja diagonal. Ciklično obremenjevanje je bilo sestavljeno iz 10 ciklov; v vsakem ciklu se je pomik povečal za 2 cm. Tako je vrednost pomika v zadnjem ciklu znašala 20 cm.

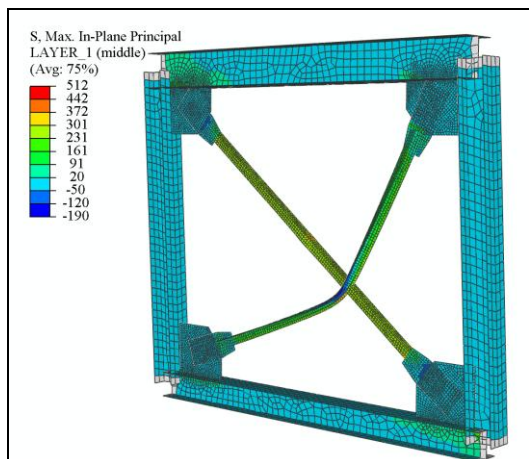
Pri cikličnem obremenjevanju se v posamezni diagonali izmenjujeta natezna in tlačna obremenitev. Ko je diagonala obremenjena natezno, so prisotne pozitivne (natezne) deformacije. Diagonala se najprej plastificira, temu sledi povišanje sile v diagonalni zaradi utrditve materiala. Če je diagonala natezno obremenjena preko meje plastičnosti, je del tega raztezka elastične (povratne) narave, del pa je plastične (nepovratne) narave. Če torej diagonalo obremenimo preko meje plastičnosti, bodo v naslednjem ciklu nadaljne natezne deformacije prisotne šele takrat, ko bo presežena velikost največjega pomika prejšnjega cikla. V tlaku se diagonala izkloni, v območju največje ukrivljenosti diagonale se tvori plastični členek. Pri naslednjem nateznem ciklu se diagonala ponovno izravna preko neelastičnih deformacij v plastičnem členku. Sčasoma se v tlaku na mestu plastičnega členka pojavi lokalno izbočenje, ki dodatno zniža silo v uklonski diagonalni. Porušitev se zgodi v nateznem ciklu na mestu lokalnega izbočenja.

Uklonska sila je v vseh primerih najvišja v drugem ciklu. Razlog za tako obnašanje leži v geometrijskih nepopolnostih, ki smo jih pripisali tlačnim diagonalam. Kot je bilo že omenjeno, se pomik v naslednjem ciklu poveča za 2 cm, kar v tlačeni diagonalni ni dovolj za nastanek koncentracij plastičnih napetost, je pa dovolj za izravnanje elementa v naslednjem ciklu. Po drugem ciklu je v vsakem naslednjem ciklu prisotna redukcija uklonske sile zaradi Baushingerjevega efekta, zaostalih deformacij iz prejšnjih ciklov ter lokalnega izbočenja diagonale.

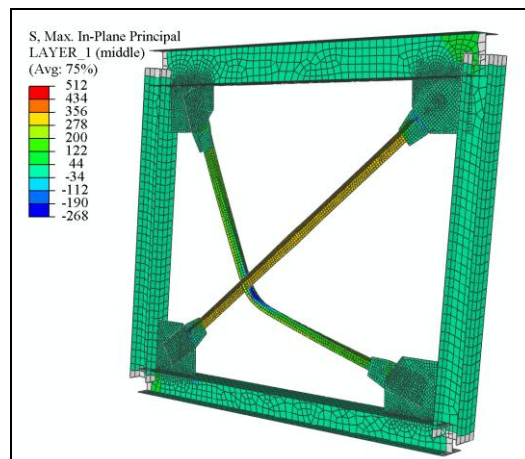
Na spodnjih slikah so prikazani rezultati cikličnih numeričnih simulacij za vsak pogoj priključevanja ter spajanja diagonal. Pomik $U = 4$ cm ustreza največjemu pomiku v prvem ciklu. Pomika $U = \pm 12$ cm ustrezata največjemu pomiku v 5 ciklu ter pomika $U = \pm 20$ cm ustrezata največjemu pomiku v zadnjem, destem ciklu. Na koncu je podana še deformirana lega centričnih diagonal po končanem cikličnem obremenjevanju.

V členkasto vpeti diagonalah z vitkostjo $\bar{\lambda} = 2,67$ se plastične napetosti v tlačni diagonalah pojavijo šele po petem ciklu, pri manjših pomikih je tlačena diagonalna v elastičnem območju. Pri zadnjem ciklu je tudi že jasno vidna lokacija plastičnega členka na sredini diagonal. Po končanem obremenjevanju so v obeh diagonalah prisotne velike nepovratne deformacije. Uklonska sila je največja v prvem ciklu, redukcija uklonskih sil pri povečevanju števila ciklov ni izrazito opazna.

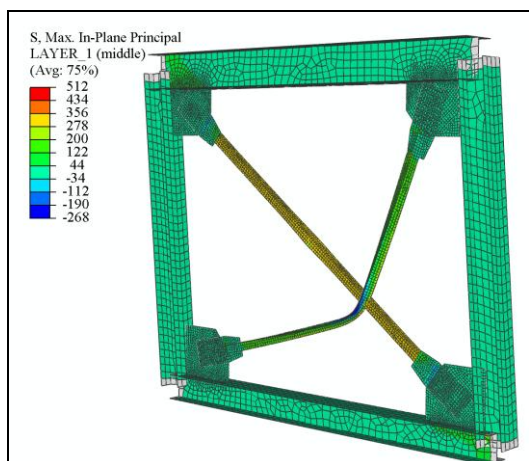
Slika 147: Ia, $U = 4$ cmSlika 148: Ia, $U = 12$ cm



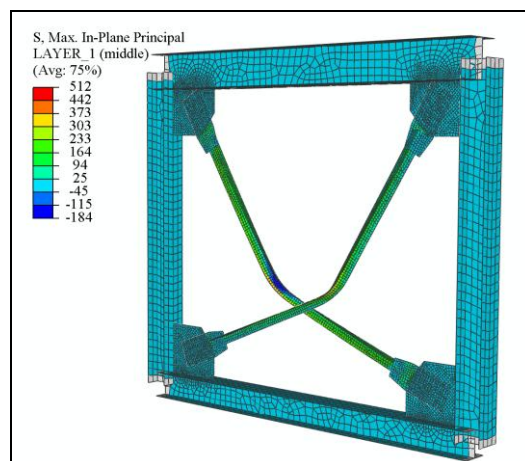
Slika 149: Ia, U = -12 cm



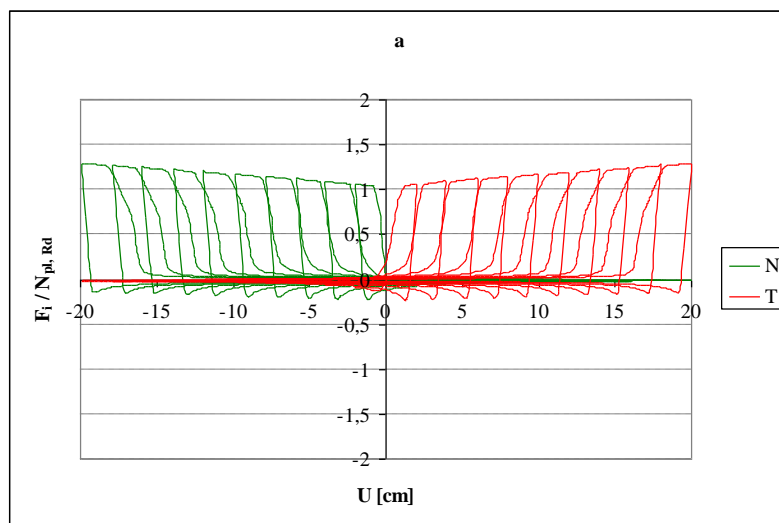
Slika 150: Ia, U = 20 cm



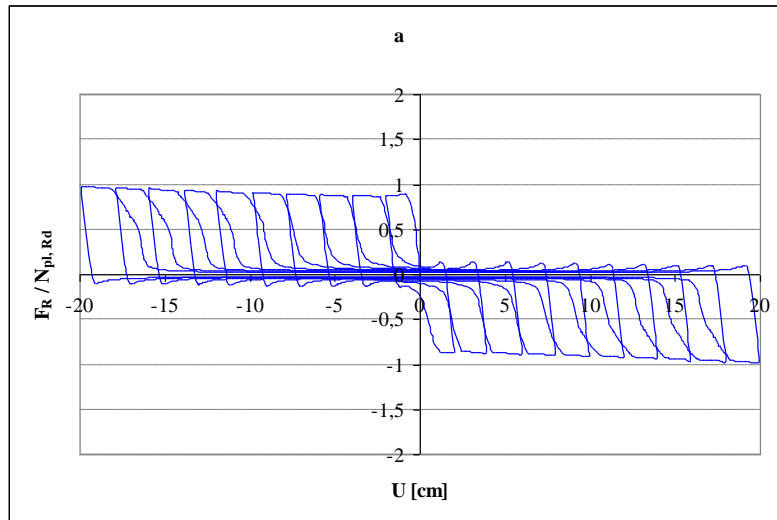
Slika 151: Ia, U = -20 cm



Slika 152: Ia, U = 0 cm

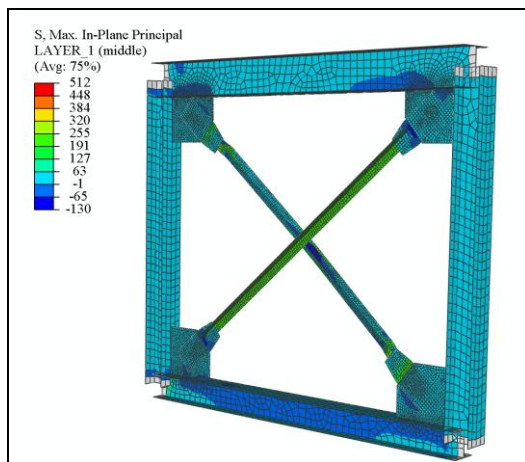


Slika 153: Potek sile v tlačni in natezni diagonali (Ia)

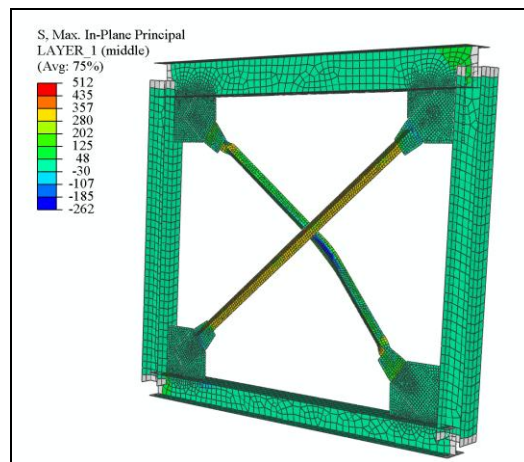


Slika 154: Potek horizontalne reakcije (Ia)

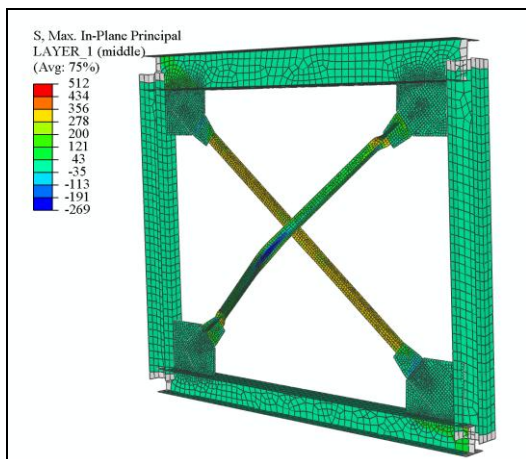
Pri togo vpetih diagonalah (Ib) se plastične napetosti pojavijo že v petem ciklu. V zadnjem, destem ciklu, je na mestu plastičnega členka že opazno lokalno izbočenje stranice kotnika. Uklonska nosilnost je bistveno višja kot v primeru Ia, opazna je tudi izrazita redukcija uklonskih sil.



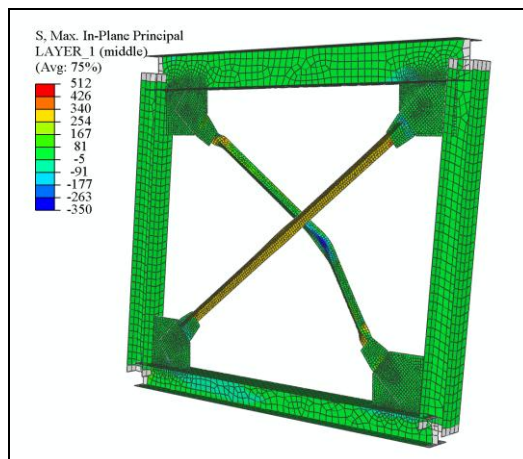
Slika 155: Ib, U = 4cm



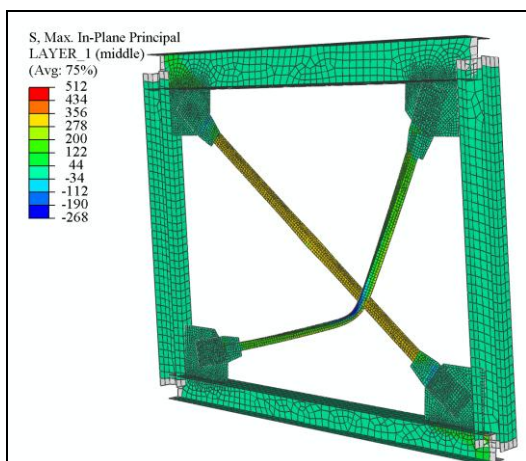
Slika 156: Ib, U = 12 cm



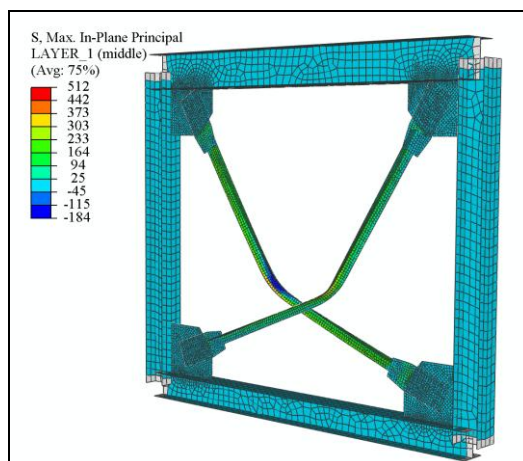
Slika 157: Ib, U = -12 cm



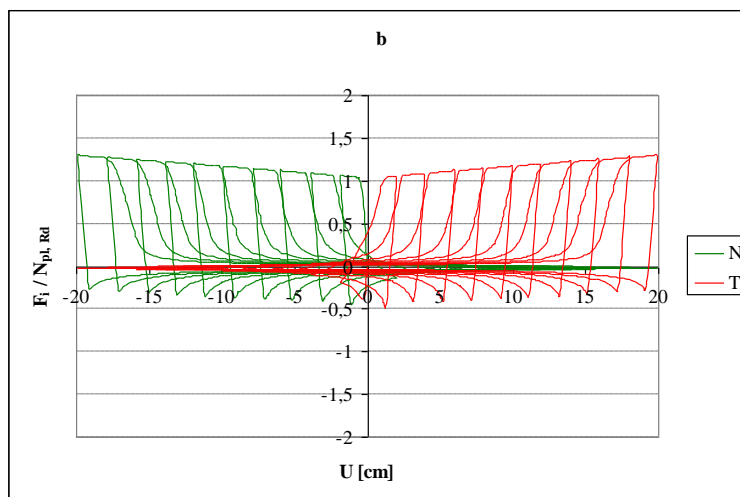
Slika 158: Ib, U = 20 cm



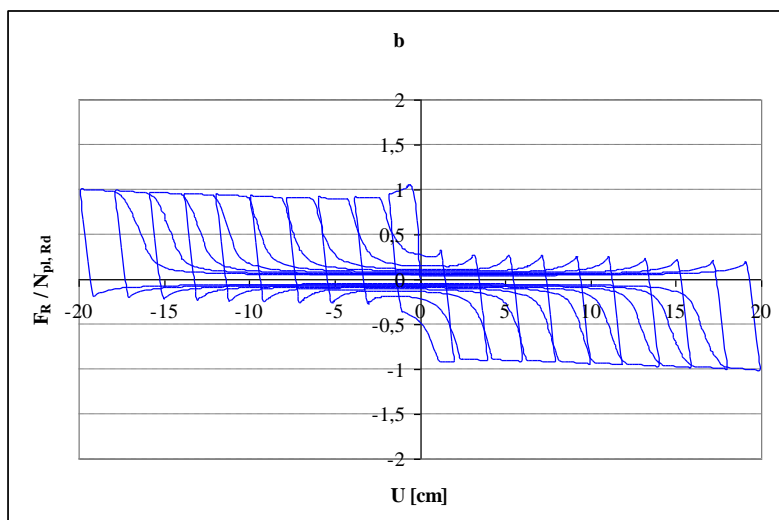
Slika 159: Ib, U = -20 cm



Slika 160: Ib, U = 0 cm

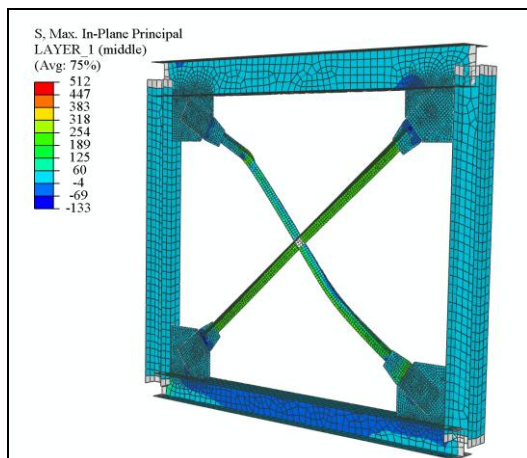


Slika 161: Potek sile v tlačni in natezni diagonali (Ib)

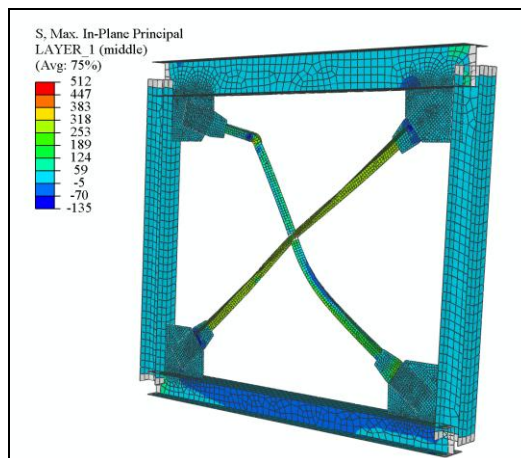


Slika 162: Potek horizontalne reakcije (Ib)

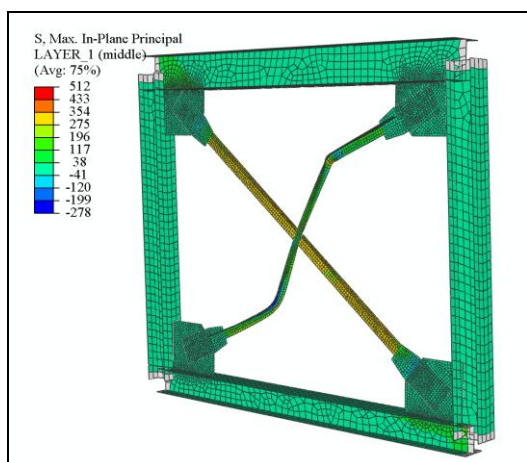
V primeru stikovane diagonale IIc z vitkostjo $\bar{\lambda} = 1,33$ se plastični členek formira že po prvem ciklu.



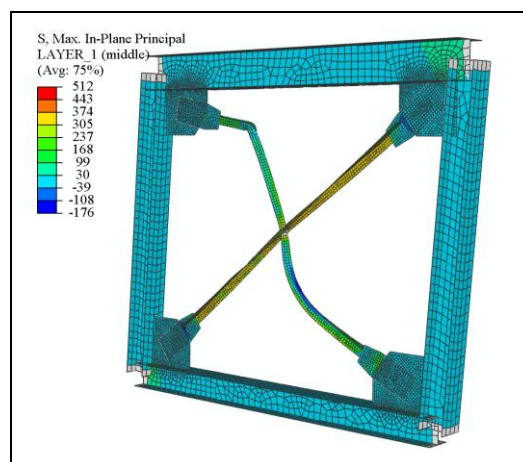
Slika 163: IIc, U = 4 cm



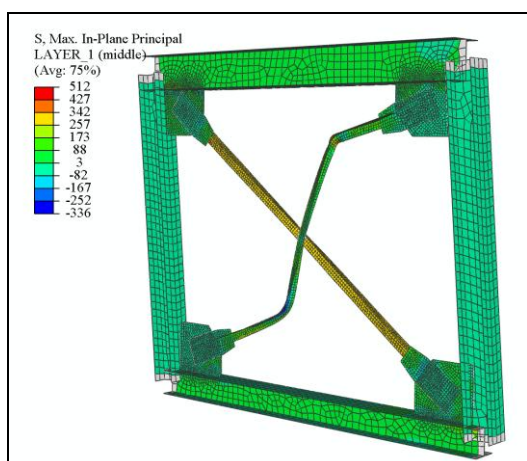
Slika 164: IIc, U = 12 cm



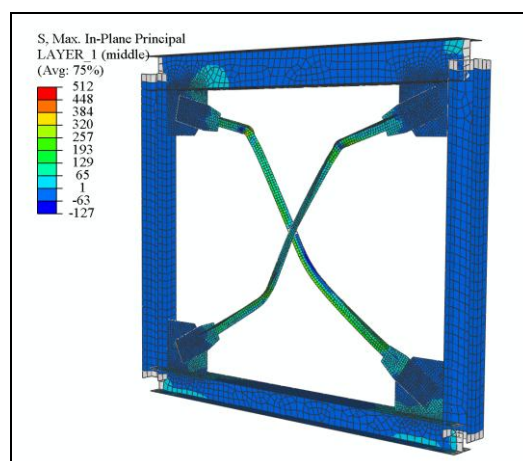
Slika 165: IIc, U = -12 cm



Slika 166: IIc, U = 20 cm

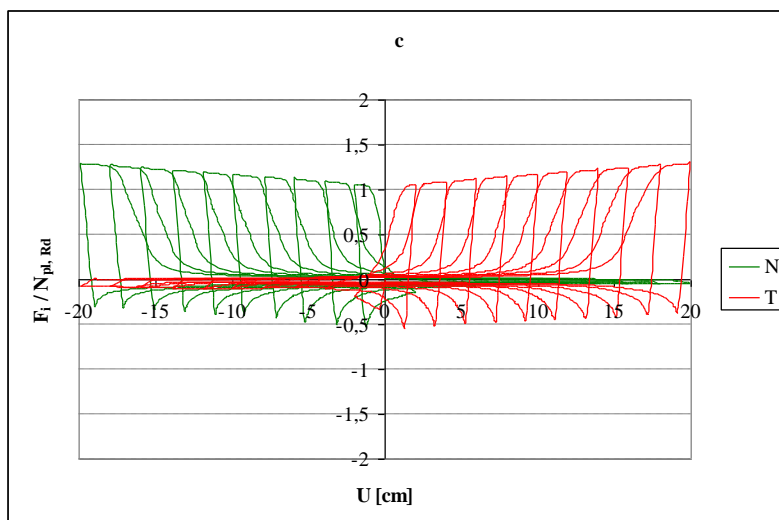


Slika 167: IIc, U = -20 cm

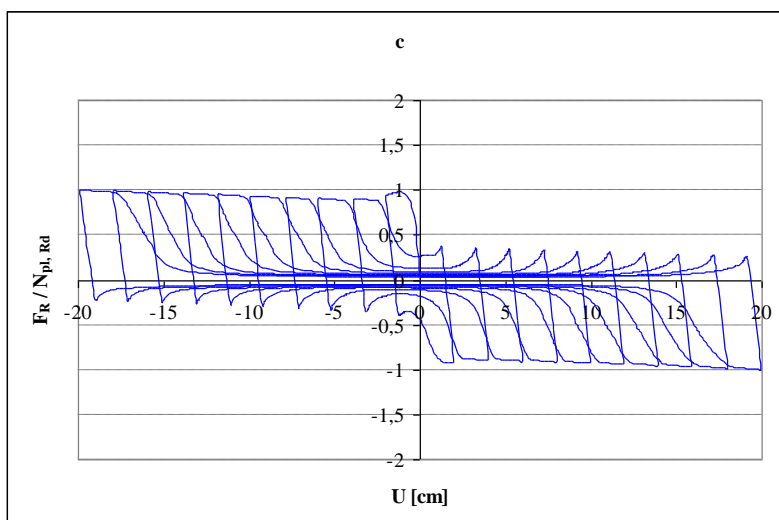


Slika 168: IIc, U = 0 cm

Prav tako je opazna izrazita redukcija uklonske nosilnosti z naraščanjem števila ciklov.

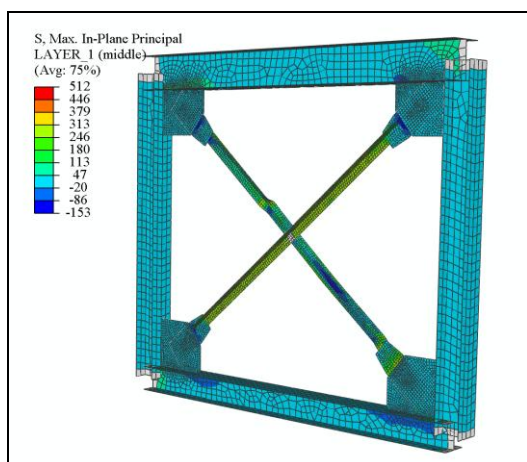


Slika 169: Potek sile v tlačni in natezni diagonali (IIC)

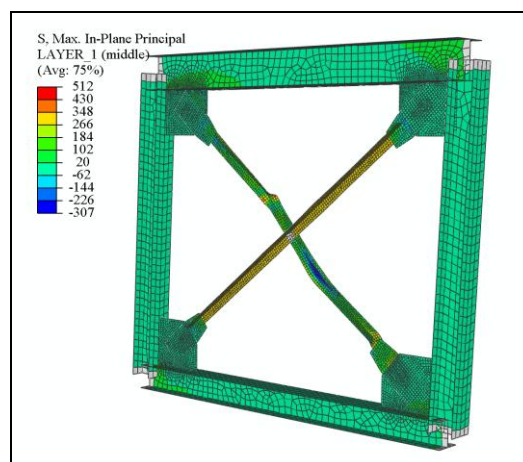


Slika 170: Potek horizontalne reakcije (IIC)

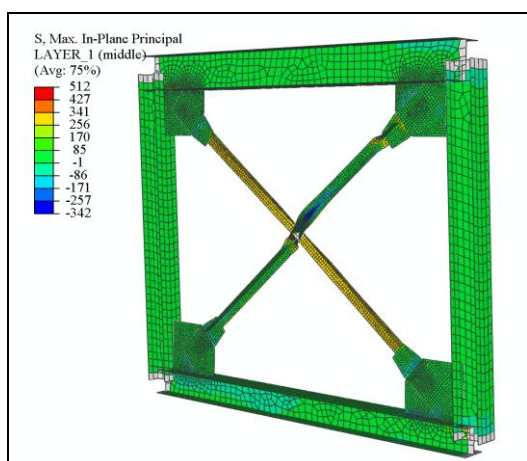
V primeru togo priključene in členaksto spojene diagonale se plastični členki formirajo do 5 cikla. V obeh diagonalah se členki nahajajo v bližini členkastega spoja diagonal. Pri 10 ciklu bi v diagonalah nastopila porušitev, saj so napetosti dosegle natezno trdnost.



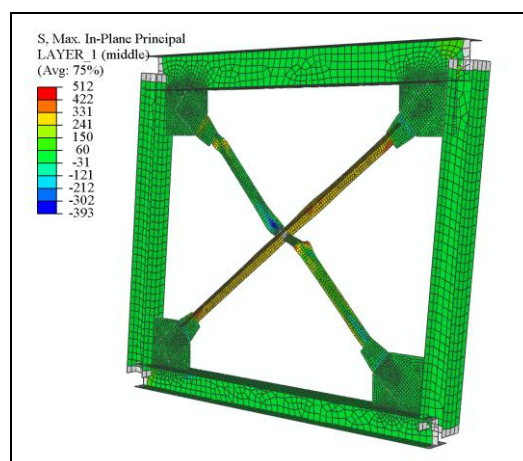
Slika 171: IId, U = 4 cm



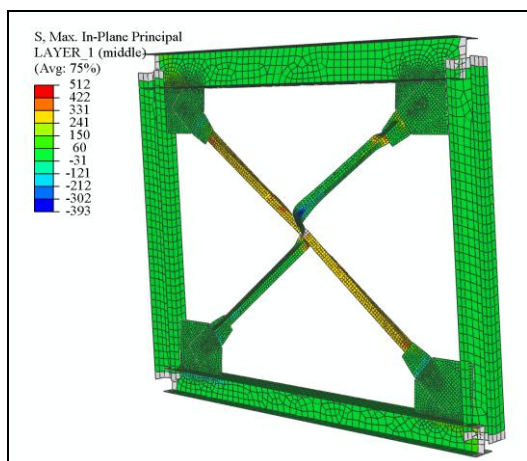
Slika 172: IId, U = 12 cm



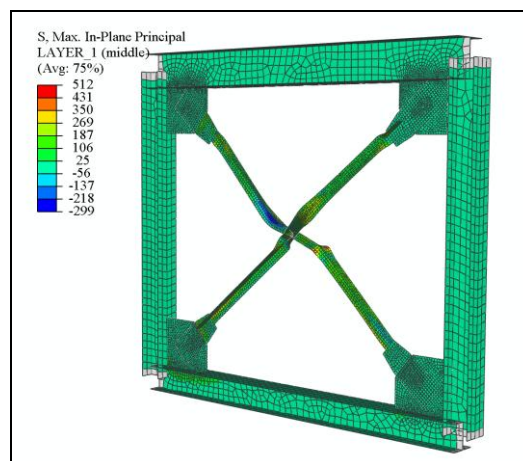
Slika 173: IId, U = -12 cm



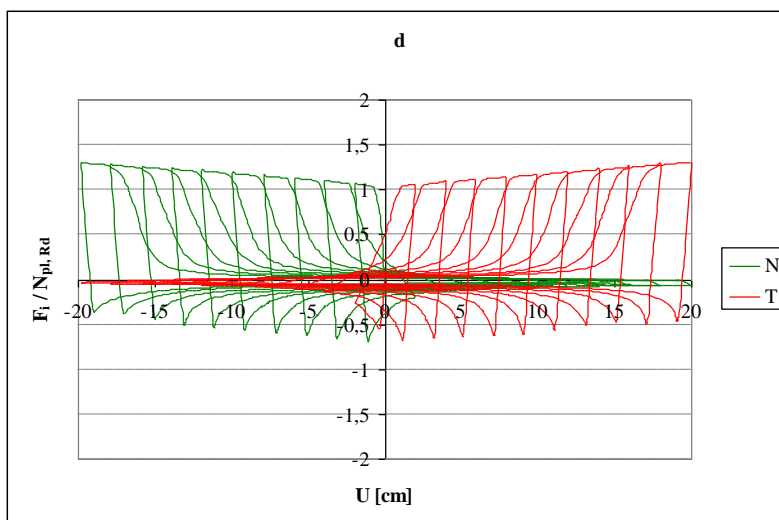
Slika 174: IId, U = 20 cm



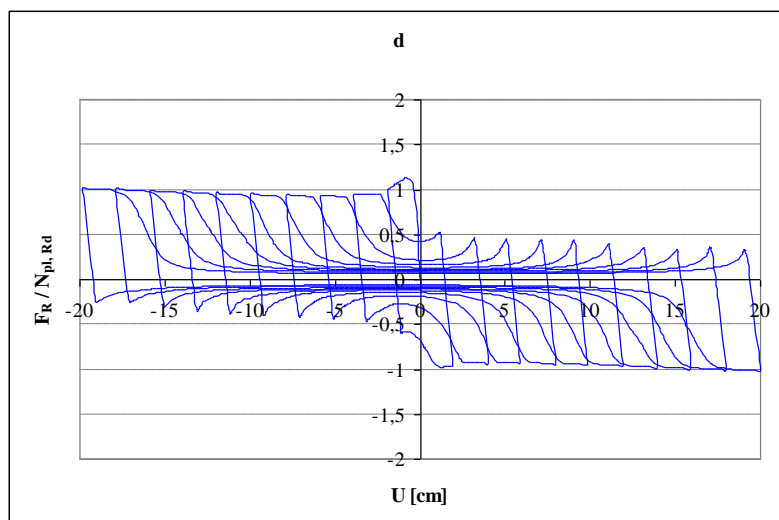
Slika 175: IId, U = -20 cm



Slika 176: IId, U = 0 cm

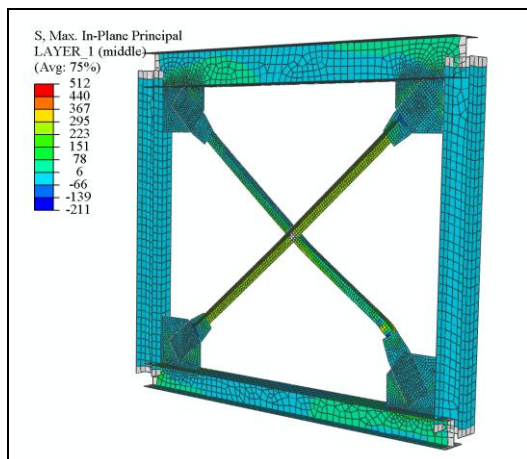


Slika 177: Potek sile v tlačni in natezni diagonali (IIId)

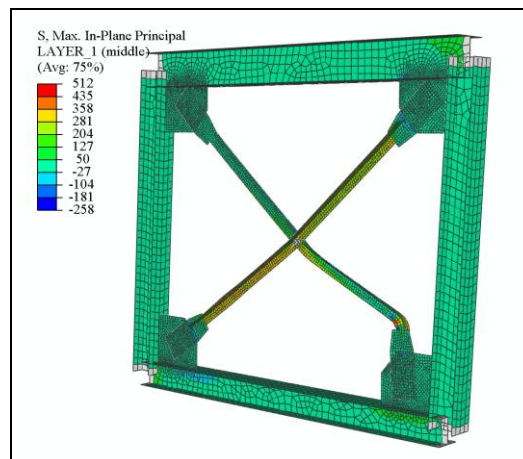


Slika 178: Potek horizontalne reakcije (IIId)

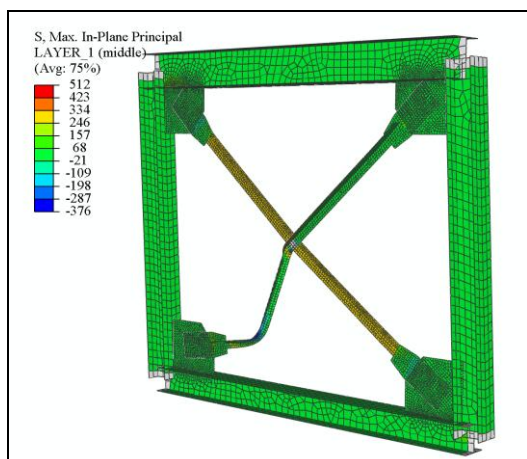
V primeru diagonal IIe z vitkostjo $\bar{\lambda} = 0,93$ se plastični členek formira že pred petim ciklom v bližini členkastega priključka diagonale na okvir. Pojav lokalnega izbočenja v tlačni diagonali se v naslednjem ciklu pozna kot padec sile v tlačni diagonali, ko je le ta natežno obremenjena.



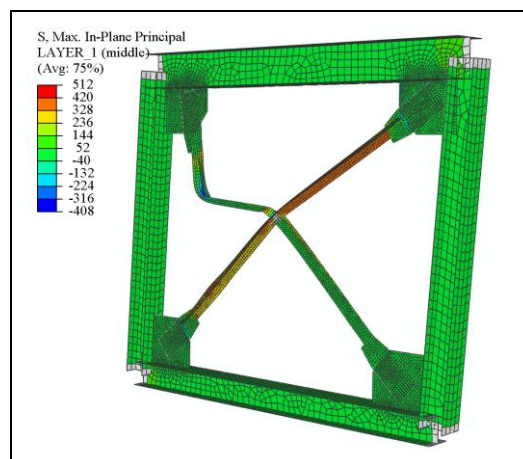
Slika 179: IIe, U = 4 cm



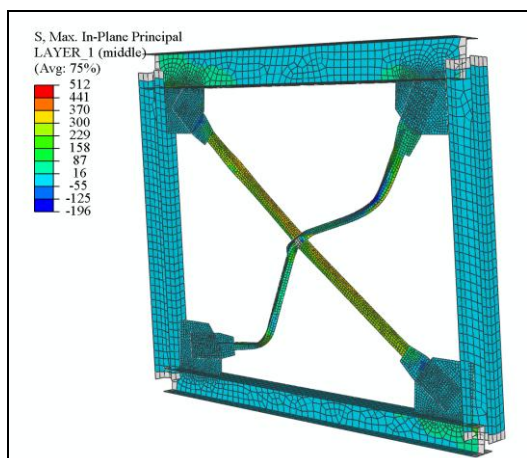
Slika 180: IIe, U = 12 cm



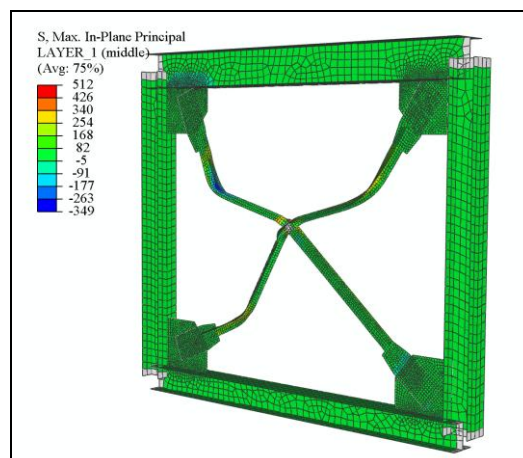
Slika 181: IIe, U = -12 cm



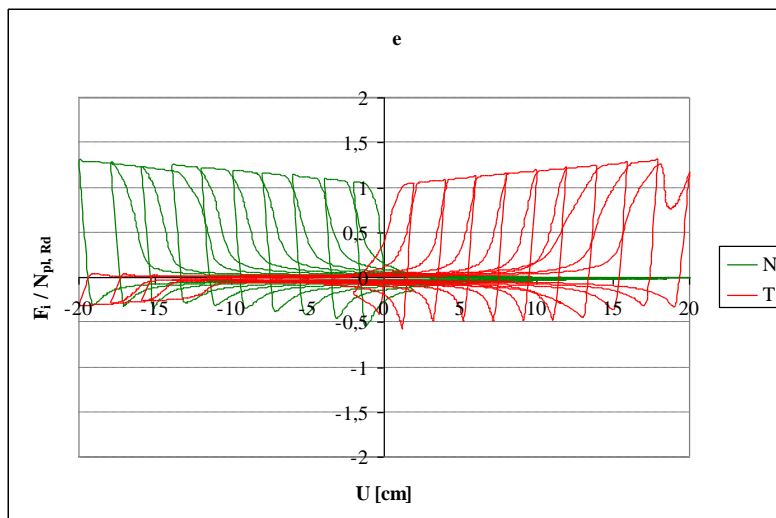
Slika 182: IIe, U = 20 cm



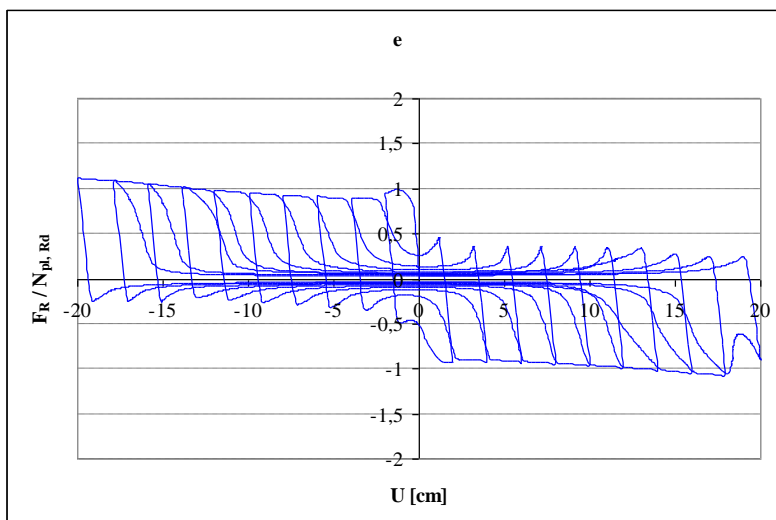
Slika 183: IIe, U = -20 cm



Slika 184: IIe, U = 0

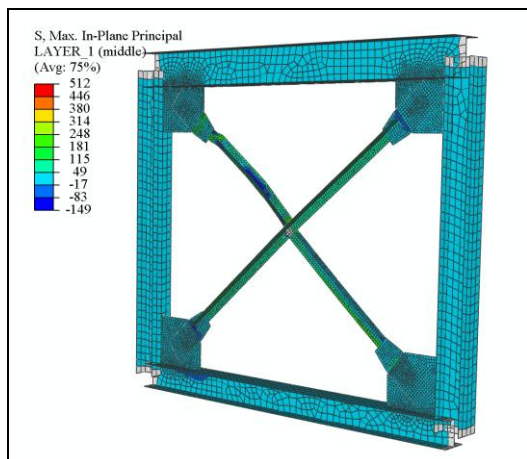


Slika 185: Potek sile v tlačni in natezni diagonali (Ile)

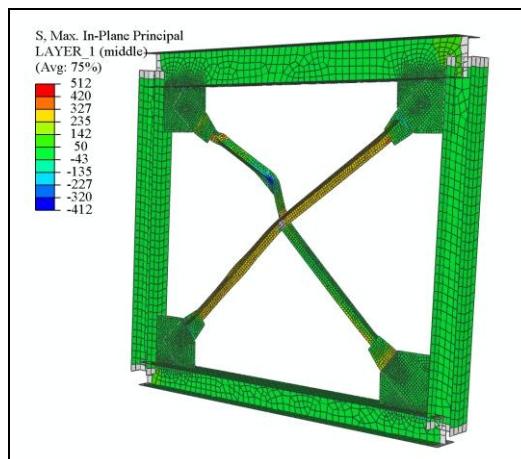


Slika 186: Potek horizontalne reakcije (IIf)

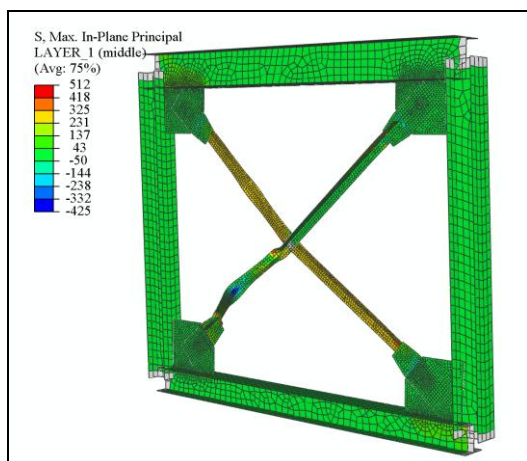
V primeru togo vpetih ter togo stikovanih diagonal (IIf) se lokalno izbočenje pojavi v 7 ciklu pri pomiku 15 cm.



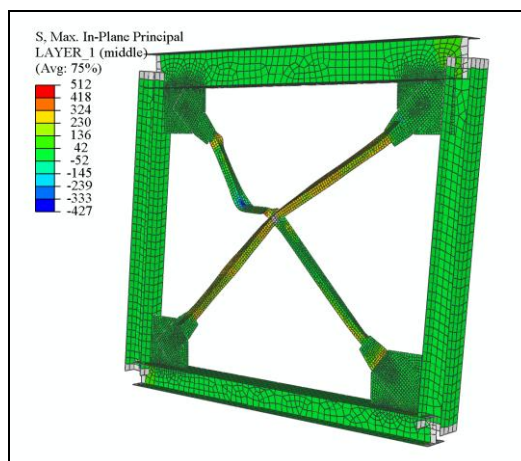
Slika 187: Iif, U = 4 cm



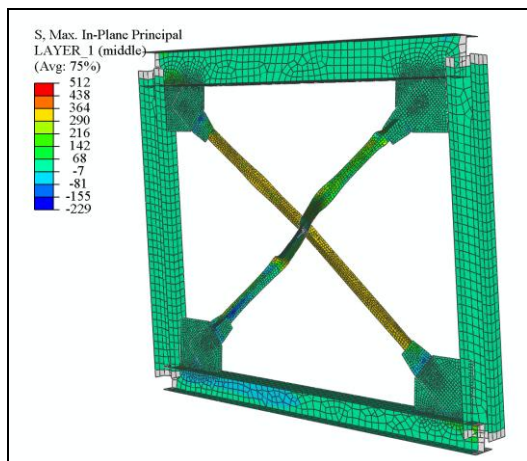
Slika 188: Iif, U = 12 cm



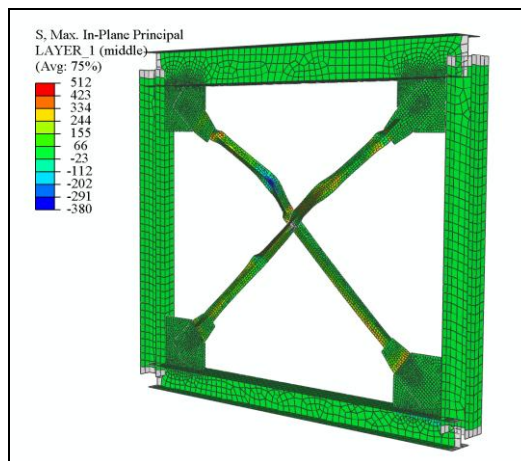
Slika 189: Iif, U = -12 cm



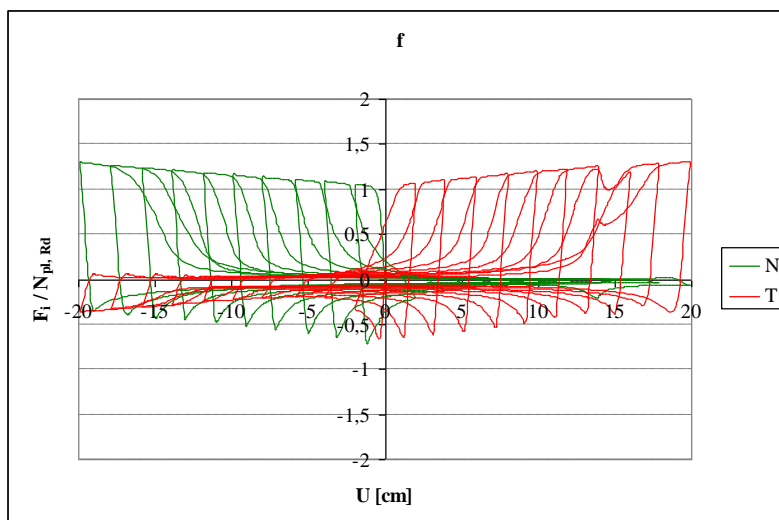
Slika 190: Iif, U = 20 cm



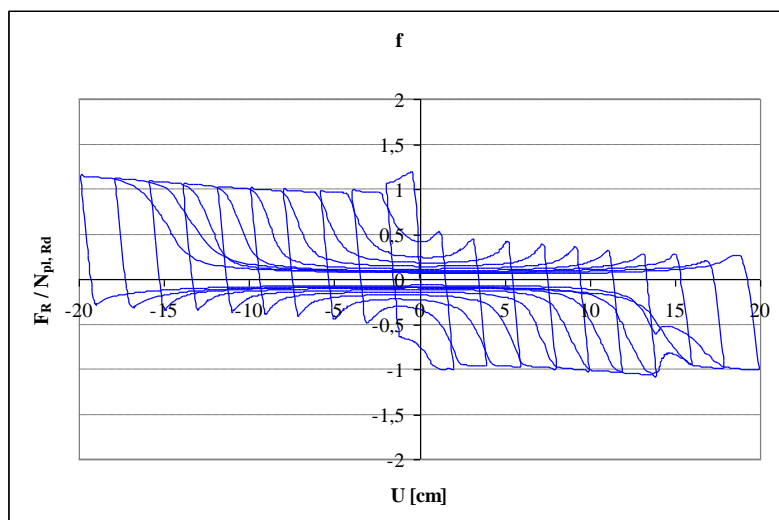
Slika 191: Iif, U = -20 cm



Slika 192: Iif, U = 0 cm



Slika 193: Potek sile v tlačni in natezni diagonali (IIf)



Slika 194: Potek horizontalne reakcije (IIf)

5 ZAKLJUČKI

Pogoji priključevanja in stikovanja so neposredno povezani z vitkostjo elementa, saj določajo uklonsko dolžino. V vseh simulacijah so imele togo priključene diagonale višjo uklonsko silo napram členkasto priključeni. Največja uklonska nosilnost je bila tako dosežena z togim priključevanjem in togim spajanjem diagonal (IIf), najmanjša pa seveda pri nestikovanih, členkasto priključenih diagonalah (Ia). Primer Ib (togo priključena diagonala, pri kateri je za uklon potrebna plastifikacija vezne pločevine) je v vseh simulacijah izrazil odstopal, saj so bile dobljene uklonske sile mnogo večje od vrednosti, določenih s standardom, zaradi česar lahko sklepamo, da bi bilo za ta primer namesto členkasto vpetega primernejše uporabiti uklonsko dolžino togo vpetega elementa.

Kotniki so zaradi kombiniranega uklona ter ekscentričnosti priključevanja izkazali slabo ujemanje z EC uklonsko krivuljo, posebno v območju majhnih vitkosti, kjer so bile numerično dobljene uklonske sile tudi do 30 % manjše. Tlačene diagonale so se uklonile upogibno-torzijsko, čeprav računsko upogibno-torzijska vitkost ni bila merodajna. Maksimalna uklonska sila je bila dosežena v primeru IIf in je znašala 70% natezne plastične nosilnosti. Sila v natezni diagonalni je pri pomiku, ki ustreza majhnim poškodbam, presegala računsko plastično nosilnost za 10%, pri poškodbah tik pred porušitvijo pa kar za 70%. Nosilnost tlačne diagonale je v post-kritičnem območju v odvisnosti od vitkosti elementa znašala od 10-40% natezne plastične nosilnosti. Največja redukcija uklonske nosilnosti je bila razvidna v območju vitkosti $\bar{\lambda} = 0,7 - 1,5$ ter posebej značilna za togo vpete diagonale. Ocenno poškodovanosti diagonal smo podali na podlagi največjega pomika v smeri uklona, normiranega z uklonsko dolžino ter največjih plastičnih deformacij v tlačni diagonalni. Plastične deformacije so bile večje v primeru stikovanih diagonal, saj je za uklon tako podprte diagonale pona dvojna ukrivljenost. Največji (normiran) pomik dosežejo diagonale tipa IIf, medtem ko so plastične deformacije največje v členkasto priključenih diagonalah, saj se pri stikovanih diagonalah v bližini členkastega vpetja tvori plastični členek. Plastične deformacije so v togih kotnikih za pomik, ki ustreza poškodbam tik pred porušitvijo, znašale 15% , v vitkih elementih pa le 5%. Pomiki togo priključenih diagonal so se z naraščanjem vitkosti

zmanjševali, medtem ko pomiki členkasto priključenih diagonal ne izkazujejo odvisnosti od vitkosti elementa.

Uklonske sile U profilov so se malenkost bolj približale vrednostim uklonske krivulje, poleg tega je bila večina rezultatov na varni strani. Največja uklonska sila je tako znašala 60% natezne plastične nosilnosti prereza. Območje največje redukcije uklonske nosilnosti je bilo ocenjeno na $\bar{\lambda} = 0,5 - 1,5$. Največja sila v nateznih diagonalah je bila dosežena pri pomiku, ki ustreza poškodbam tik pred poružitvijo, saj je bila kar za faktor 1,8 večja od računske plastične nosilnosti. Čeprav je velikost pomikov U profilov izven ravnine približno enaka pomikom kotnikov, so v U profilih prisotne bistveno nižje plastične napetosti, ki tudi v togih diagonalah niso presegle 10%.

SHS profili so se zelo dobro približali vrednostim EC uklonske krivulje. Uklon teh profilov je bil namreč samo upogibni, saj imajo simetričen prečni prerez, poleg tega so bili obteženi v težišču. Največja uklonska sila je znašala skoraj 90% plastične nosilnosti prereza. Natezna sila je pri maksimalnem pomiku za 80% preseгла plastično natezno nosilnost prereza. Največja redukcija tlačne nosilnosti je bila opazna v območju vitkosti $\bar{\lambda} = 0,5 - 1,5$. Pomiki v smeri uklona so bili pri SHS profilih izredno majhni, saj se je večina diagonal lokalno izbočila pred uklonom. Posledično so plastične deformacije pri srednji stopnji poškodovanosti presegle 15%, pri največji vrednosti pomika pa presegle deformacijo pri natezni trdnosti (22%).

Pri cikličnih testih je bila največja uklonska sila dosežena v drugem ciklu, ko se je diagonala v prejšnji natezni obremenitvi poravnala. Nato je bila od pogojev priključevanja in stikovanja oz. od vitkosti odvisna redukcija uklonske nosilnosti v naslednjih ciklih. Z manjšanjem vitkosti elementa se je povečevala uklonska nosilnost ter s tem količina disipirane energije. Tako je bila največja uklonska nosilnost dosežena v primeru IIf, vendar je bila ravno v temu primeru opažena tudi največja redukcija uklonske nosilnosti. V primeri z vitkostmi do $\bar{\lambda} = 1,33$ ni bilo znakov lokalnega izbočenja, medtem ko je v obeh diagonalah z vitkostjo $\bar{\lambda} = 0,9$ v zadnjih ciklih padec natezne sile v prvotno tlačno obremenjeni diagonali nakazoval tako porušitev. Natezna sila je pri povečevanju pomika naraščala, saj smo v simulacijah upoštevali kinematični model utrjevanja brez utrujanja.

VIRI

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

De Luca, A., Grande, E., Mele, E. 2006. Implications of code provisions in the seismic design of concentric braced frames. V: Mazzolani, Wada (ur.). STRESSA 2006. Yokohama: str. 855-861

Elghazouli, A. Y. 2003. Seismic design procedures for concentrically braced frames. Structures & Buildings. 156. 11: 381-394.

Goggins, J., Broderick, B., Elghazouli, A. 2005. Seismic behaviour and design of bracing members. V: EUROSTEEL 2005. Maastricht: str. 5.2-123 – 5.2-129.

Lee, K., Bruneau, M. 2005. Energy Dissipation of Compression Members In Concentrically Braced Frames: Review of Experimental Data. Journal of Structural Engineering. 131. 4: 552-559.

Longo, A., Montuori, R., Piluso, V. 2005. Plastic design of seismic resistant X-braced frames. V: EUROSTEEL 2005. 2005. Maastricht: str. 5.2-49 – 5.2-56.

Remennikov, A. M., Walpole, W. R. 1998. A note on compression strength reduction factor for a buckled strut in seismic-resisting braced system. Engineering Structures. 20. 8: 779-782.

Tremblay, R. 2000. Influence of brace slenderness on the seismic response of concentrically braced steel frames. V: Mazzolani, Tremblay (ur.). Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas. 2000. Balkema, Rotterdam: str. 527-534.

Tremblay, R. 2002. Inelastic seismic response of steel bracing members. Journal of Constructional Steel Research. 58. 2: 665-701.

Tremblay, R. 2003a. Achieving a Stable Inelastic Seismic Response for Multi-Story Concentrically Braced Steel Frames. Engineering Journal. 40. 2: 111-129.

Tremblay, R., Archambault, M.H., Filiatrault, A. 2003b. Seismic Response of Concentrically Braced Steel Frames Made with Rectangular Hollow Bracing Members. *Journal of Structural Engineering*. 129. 12: 1626-1636.

American Institute of Steel Constructions (AISC). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. 2002. Chicago.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings(FEMA-350)*. 2000. Washington DC.

SIST EN 1993-1-1: 2004. Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – Del 1.1: Splošna pravila in pravila za stavbe.

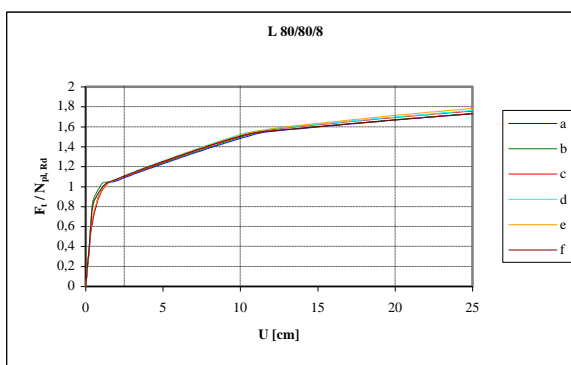
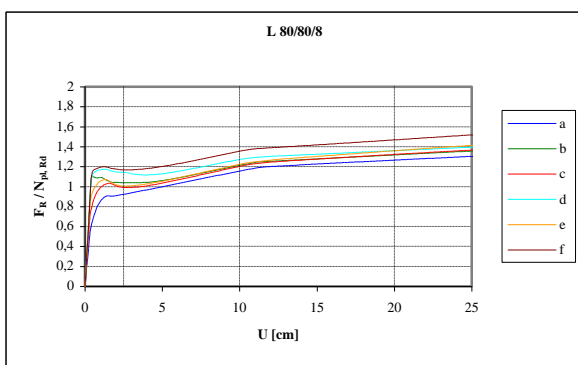
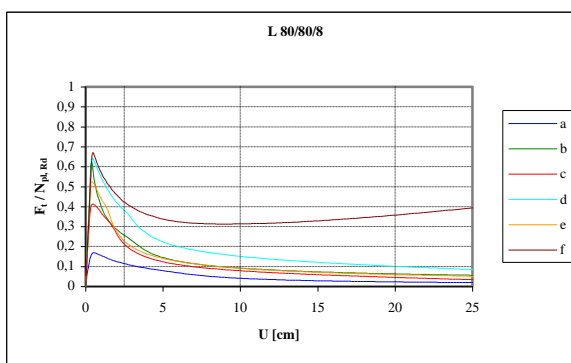
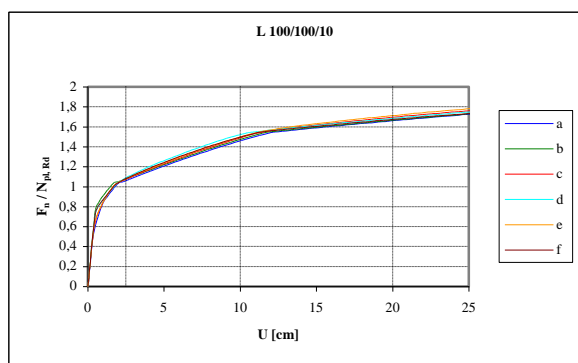
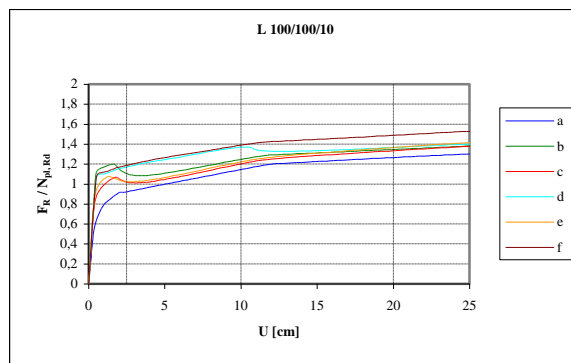
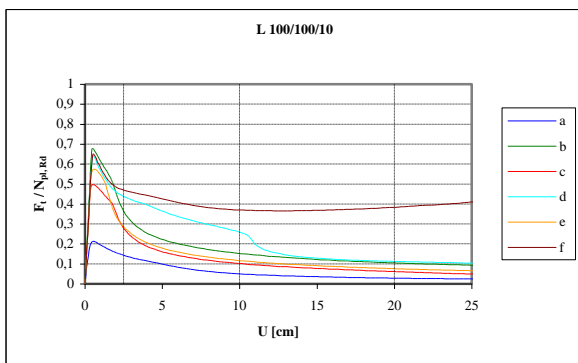
SIST EN 1998-1: 2005. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – Del 1: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe.

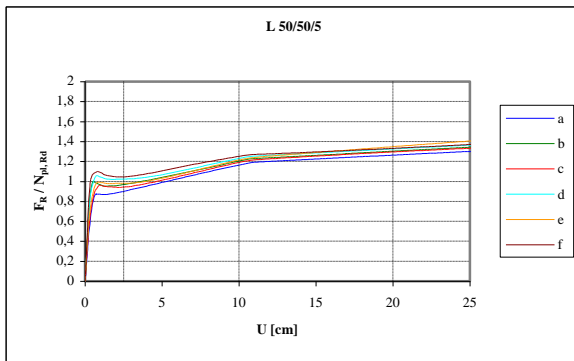
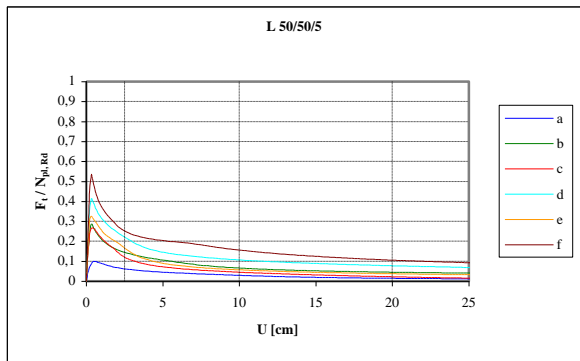
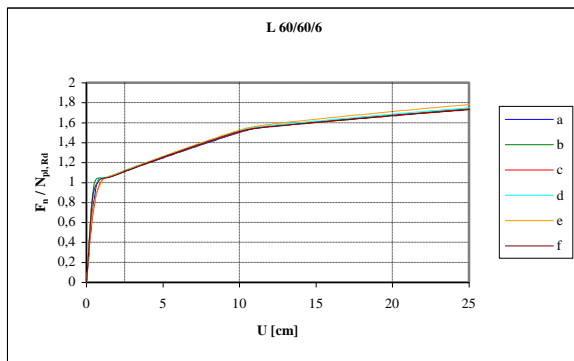
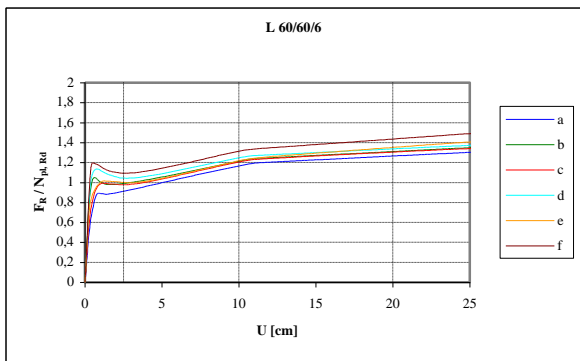
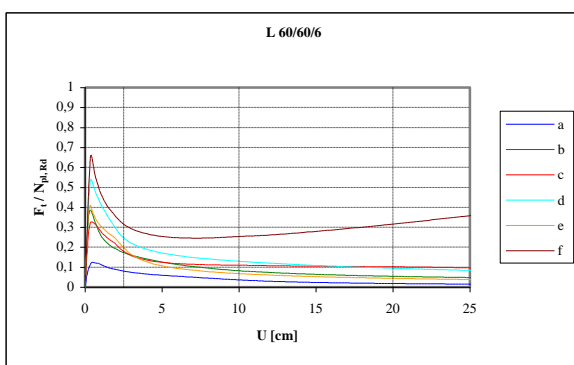
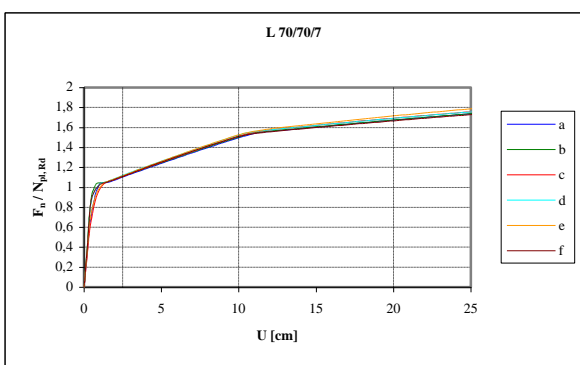
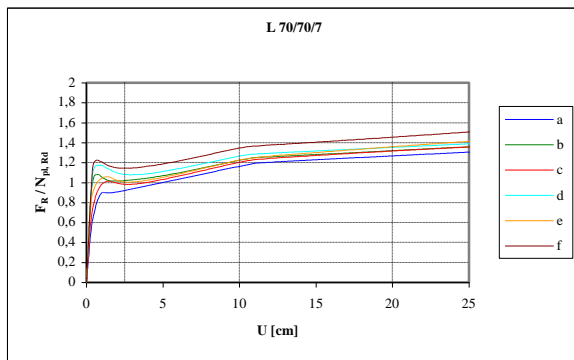
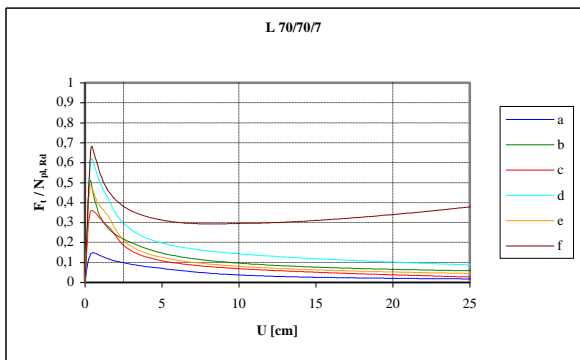
SIST EN 1998-3: 2005. Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – Del 3: Ocena in prenova stavb.

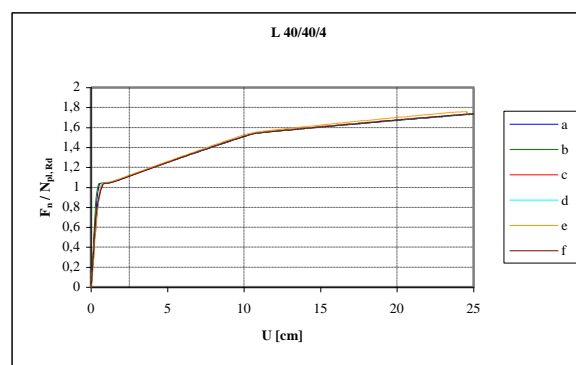
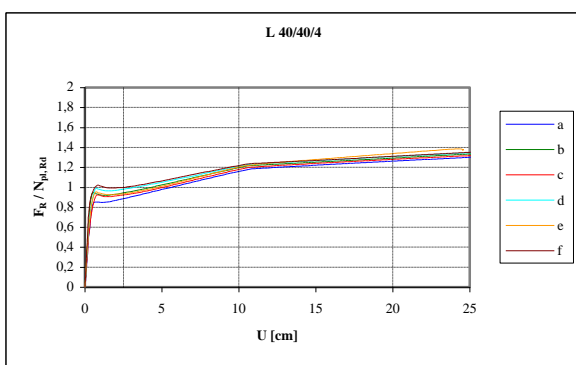
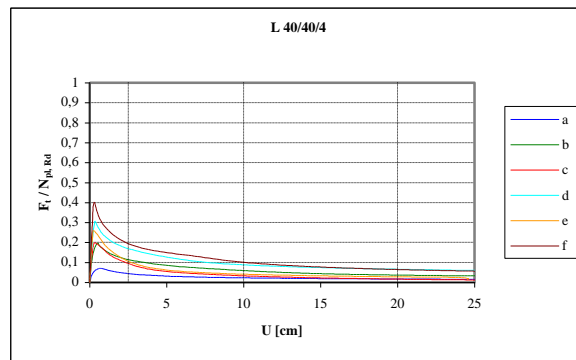
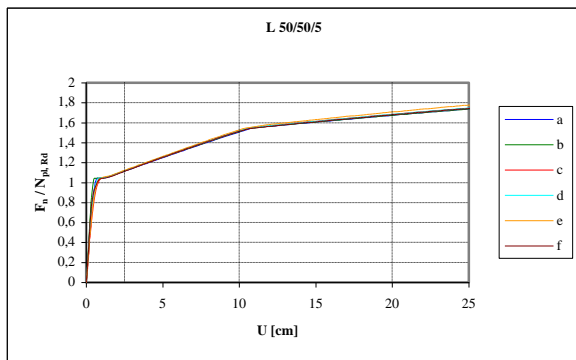
Abaqus Version 6.7 Documentation. 2007. United States of America. Abaqus, Inc.

PRILOGE

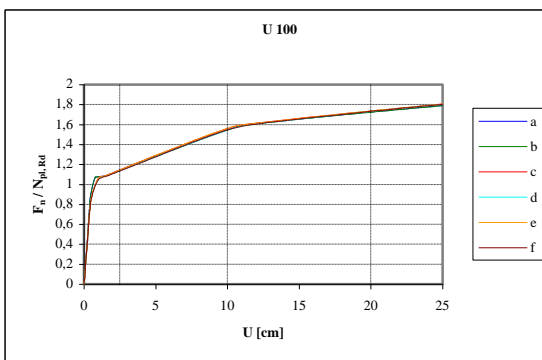
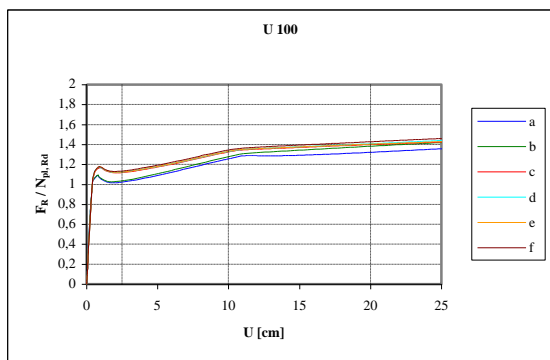
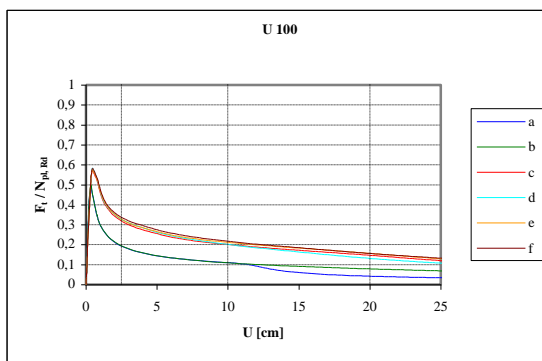
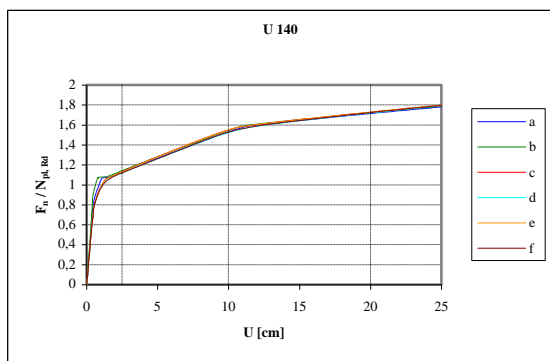
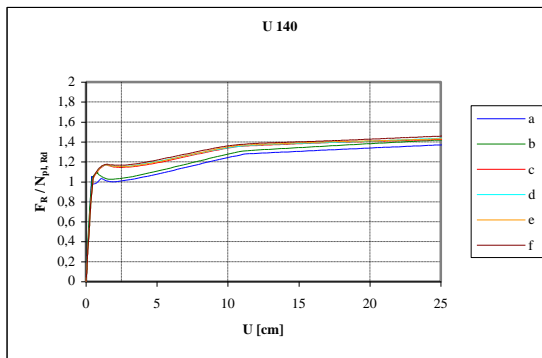
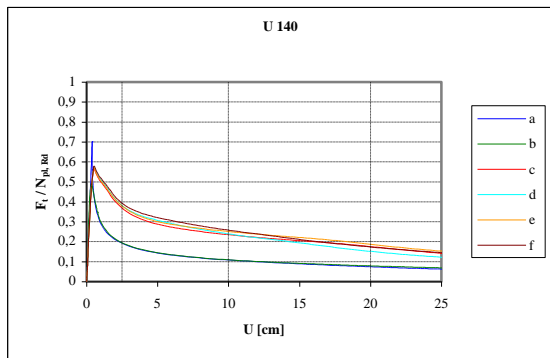
Sile v kotnikih

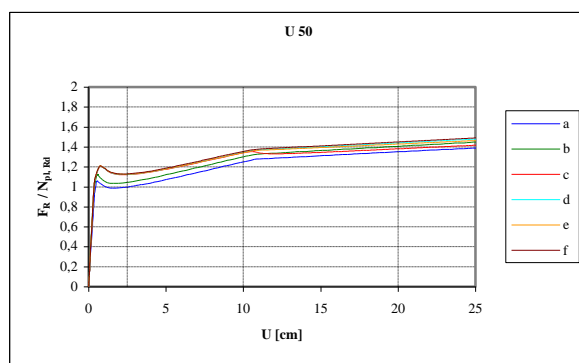
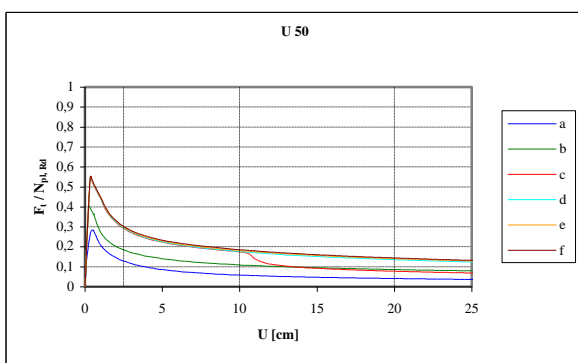
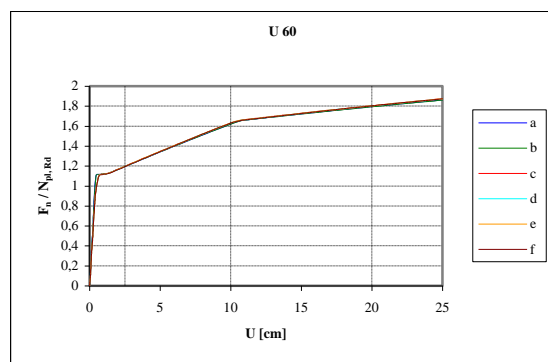
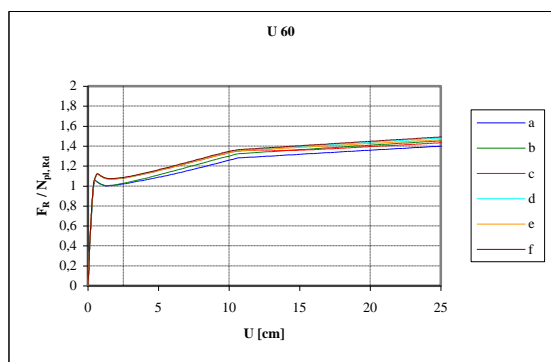
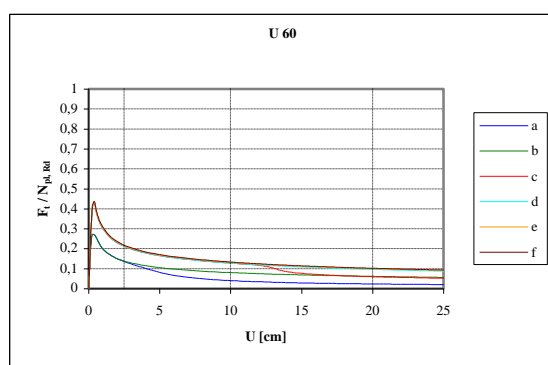
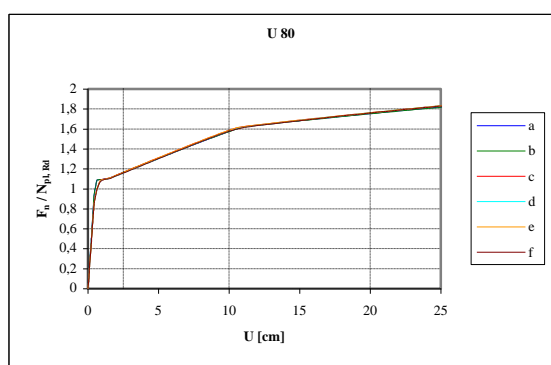
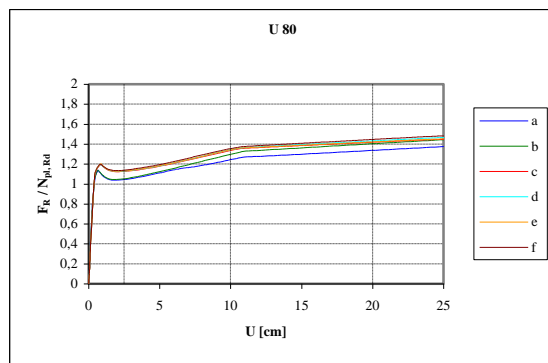
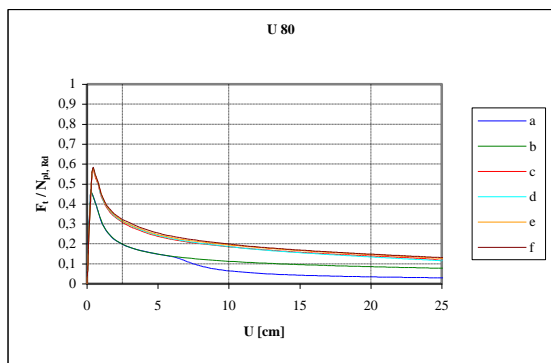


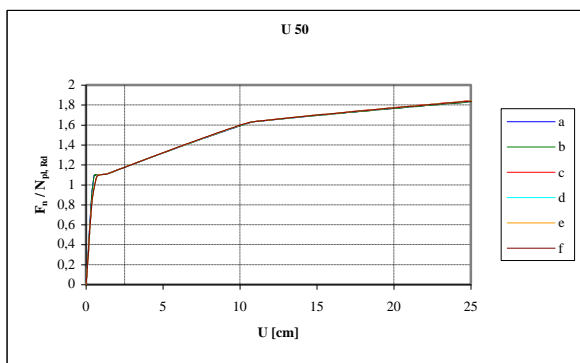




Sile v U profilih







Sile v SHS profilih

