

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Pavlič, T. 2012. Stabilnostna analiza jeklene strehe športne dvorane v Stožicah. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Beg, D.): 121 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



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

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

This is original version of final thesis.

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

Pavlič, T. 2012. Stabilnostna analiza jeklene strehe športne dvorane v Stožicah. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Beg, D.): 121 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidatka:

**TINA PAVLIČ**

**STABILNOSTNA ANALIZA JEKLENE STREHE  
ŠPORTNE DVORANE V STOŽICAH**

Diplomska naloga št.: 3243/KS

**STABILITY ANALYSIS OF SPORTS HALL STOŽICE  
STEEL ROOF**

Graduation thesis No.: 3243/KS

**Mentor:**

prof. dr. Darko Beg

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Član komisije:**

doc. dr. Alma Zavodnik Lamovšek

prof. dr. Goran Turk

prof. dr. Boštjan Brank

Ljubljana, 20. 09. 2012

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

---

**IZJAVE**

Podpisana Tina Pavlič izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom »Stabilnostna analiza jeklene strehe športne dvorane v Stožicah«.

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

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

Ljubljana, 14. 9. 2012

Tina Pavlič

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 624.014.2(043.2)  
**Avtor:** Tina Pavlič  
**Mentor:** prof. dr. Darko Beg  
**Naslov:** Stabilnostna analiza jeklene strehe športne dvorane v Stožicah  
**Tip dokumenta:** Diplomaska naloga – univerzitetni študij  
**Obseg in oprema:** 121 str., 42 pregl., 94 sl., 89 graf.  
**Ključne besede:** stabilnost, preskok sistema, lok, Stožice, Abaqus, Scia Engineer

### **Izvleček**

V diplomski nalogi sem naredila stabilnostno analizo jeklene strehe športne dvorane v Stožicah. V uvodnem delu sem se ukvarjala z lokom razpona 10 m. Opazovala sem vpliv različnih vrst podpor (togo podprto, vrtljivo podprto), oblik enakomerno porazdeljene obtežbe, oblikovnega faktorja  $h/L$  ( $h$  – višina loka,  $L$  – razpon loka) ter velikosti in obliko vnesene nepopolnosti. Namen uvodnih analiz je predvsem spoznavanje s programoma Abaqus in Scia Engineer.

Stabilnostna analiza jeklene strehe športne dvorane v Stožicah je narejena s programom Abaqus ter delno s programom Scia Engineer. Osredotočila sem se na globalno stabilnost – preskok celotnega sistema. Računala sem mejni obtežni faktor, s katerim še lahko pomnožimo različno obliko obtežbe s snegom, da bo konstrukcija še stabilna. Ker je najbolj neugodna porazdelitev obtežbe kopičenje snega, sem se osredotočila predvsem na ta primer ter na enakomerno porazdelitev snega. Opazovala sem deformiranje konstrukcije pred dosegom mejnega obtežnega faktorja ter po njem in za značilne točke strehe narisala diagrame obtežba – pomik ( $P-w$ ). Kontrolirala sem kritične elemente konstrukcije glede na osno silo. Opazovala sem še vpliv amplitude nepopolnosti na končno nosilnost ter vpliv višine nakopičenega snega na manj obremenjeni strani strehe.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 624.014.2(043.2)  
**Author:** Tina Pavlič  
**Supervisor:** prof. Darko Beg Ph.D.  
**Title:** Stability analysis of sports hall Stožice steel roof  
**Document type:** Graduation Thesis – University studies  
**Scope and tools:** 121 p., 42 tab., 94 fig., 89 graph.  
**Keyword:** Stability, snap-through, arch, Stožice, Abaqus, Scia Engineer

**Abstract**

In my thesis, stability analysis of sports hall Stožice steel roof was made. In the first part the arch with span 10 m was computed. Different support types (roller, pin), load forms, factor  $h/L$  ( $h$  – height,  $L$  – span), amplitude and form of imperfections were watched. The purpose of this analysis was to become familiar with programs Abaqus and Scia Engineer.

Stability analysis of sports hall Stožice steel roof was made with program Abaqus and some parts with program Scia Engineer. The focus was on the global stability of the roof – snap-through effect. I computed critical load proportional factor, with which we can multiply different types of snow load, to assure that the construction is still stable. Since the unsymmetric snow accumulation is the most negative, the most work was made with that case and with constant snow load. Deformations of roof before and after load proportional factor reached the critical value were monitoring and the graph Load – vertical displacement ( $P-w$ ) was made for chosen points. Axial force and moments were also checked in critical elements. The amplitudes of imperfections and height of accumulated snow load were watched.

## **ZAHVALA**

Hvala mentorju prof. dr. Darku Begu za vse usmeritve pri izdelavi diplomske naloge in pomoč pri vseh problemih, ki so se mi tekom pisanja in računanja pojavili.

Hvala asist. dr. Primožu Možetu in asist. dr. Francu Sinurju za pomoč pri spoznavanju programa Abaqus in reševanju problemov, ki so nastali.

Hvala staršem, starim staršem, Lei, Mateji, Nadi in Jožetu za pomoč pri varstvu hčerkice, za vse spodbudne besede in podporo v času celotnega študija in v teh zadnjih mesecih, ko je nastajala diplomska naloga.

Največja zahvala pa gre Luku in Piki, ki sta potrpežljivo prenašala mojo odsotnost, me spodbujala in podpirala ves čas pisanja.

Najlepša hvala vsem.

**KAZALO**

<b>STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA .....</b>	<b>I</b>
<b>IZJAVE .....</b>	<b>II</b>
<b>BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....</b>	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....</b>	<b>IV</b>
<b>ZAHVALA.....</b>	<b>V</b>
<b>KAZALO .....</b>	<b>VI</b>
<b>KAZALO SLIK.....</b>	<b>VIII</b>
<b>KAZALO GRAFIKONOV.....</b>	<b>XI</b>
<b>KAZALO PREGLEDNIC .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1 STABILNOST KONSTRUKCIJ .....	1
1.2 PRESKOK SISTEMA.....	3
<b>2 PREDSTAVITEV PROGRAMOV IN UPORABLJENIH RAČUNSKIH METOD .....</b>	<b>5</b>
2.1 ABAQUS, VERZIJA 6.10 .....	5
2.1.1 Riks-ova metoda za določitev kritične nosilnosti.....	5
2.2 SCIA ENGINEER, ŠTUDENSKA VERZIJA 2011.1 .....	5
2.2.1 Timoshenkova metoda .....	6
2.2.2 Modificirana Newton-Raphsonova metoda.....	6
<b>3 OSNOVNI PRIMERI .....</b>	<b>8</b>
3.1 12-DELNI ŠESTKOTNI PROSTORSKI OKVIR .....	8
3.2.1 Nepomično podprt 12-delni šestkotni prostorski okvir.....	9
3.2.2 Pomično podprt 12-delni šestkotni prostorski okvir .....	11
3.2.3 Delno pomično, delno nepomično podprt 12-delni šestkotni prostorski okvir.....	12
3.2 LOK V RAVNINI .....	14
3.2.1 Geometrijski podatki .....	14
3.2.2 Račun v programu Abaqus.....	16
3.2.3 Primerjava rezultatov glede na posamezen lok .....	19
3.2.4 Primerjava rezultatov glede na oblikovni faktor $f/L$ .....	25
3.2.5 Račun lokov v programu SCIA Engineer in primerjava rezultatov z rezultati iz programa Abaqus.....	31
3.2.6 Lastne vrednosti lokov .....	35
3.2.7 Kontrola preskoka sistema po EN 1993-2 .....	37
<b>4 JEKLENA STREHA ŠPORTNE DVORANE V STOŽICAH.....</b>	<b>39</b>
4.1 UVOD .....	39
4.2 GEOMETRIJSKI PODATKI, OBTEŽBA IN NEPOPOLNOSTI.....	40



4.2.1 Geometrijske karakteristike .....	40
4.2.2 Obtežba strehe .....	42
4.2.3 Nepopolnosti .....	50
4.3 KONTROLA PRESKOKA SISTEMA PO EN 1993-2 .....	51
4.3.1 Kontrola preskoka sistema v krajši smeri strehe .....	51
4.3.2 kontrola preskoka sistema v daljši smeri strehe.....	51
4.4 KRITIČNI FAKTORJI NOSILNOSTI PRI OBRAVNAVANIH OBTEŽBAH .....	52
4.4.1 Rezultati obtežne kombinacije »enakomeren sneg« .....	53
4.4.2 Rezultati obtežne kombinacije »kopičenje snega 1« .....	60
4.4.3 Primerjava obnašanja konstrukcije pri obtežnih kombinacijah »enakomeren sneg« in »kopičenje snega 1« .....	67
4.4.4 Rezultati ostalih obtežnih kombinacij.....	70
4.5 VPLIV VIŠINE KOPIČENJA SNEGA.....	71
4.6 VPLIV AMPLITUDE NEPOPOLNOSTI .....	77
4.6.1 Obtežna kombinacija z enakomernim snegom (ES).....	78
4.6.2 Obtežna kombinacija z nakopičenim snegom (KS1) .....	83
4.7 IZRAČUN V PROGRAMU SCIA ENGINEER IN PRIMERJAVA REZULTATOV.....	87
4.7.1 Streha z enakomerno obtežbo snega.....	87
4.7.2 Streha z nakopičenim snegom v smeri krajšega razpona .....	91
4.8 PRIMERJAVA IN KONTROLA OSNIH SIL .....	96
4.8.1 Kritični elementi strehe ter njihova nosilnost.....	96
4.8.2 Kontrola osnih sil pri strehi brez nepopolnosti z enakomerno obtežbo s snegom.....	98
4.8.3 Kontrola osnih sil pri strehi z nepopolnostjo in enakomerno obtežbo s snegom .....	101
4.8.4 Kontrola osnih sil pri strehi brez nepopolnosti z obtežbo nakopičenega snega .....	104
4.8.5 Kontrola osnih sil pri strehi z nepopolnostjo in obtežbo nakopičenega snegom .....	107
4.9 POKROV – TEMENSKI DEL STREHE .....	110
4.9.1 Geometrijski podatki, obtežba in nepopolnosti.....	110
4.9.2 Rezultati obtežnih kombinacij .....	112
<b>5 ZAKLJUČEK.....</b>	<b>119</b>
<b>VIRI.....</b>	<b>121</b>

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Ravnotežne lege - stabilna, indiferentna, labilna .....	1
Slika 2: Karakteristična ravnotežna pot .....	1
Slika 3: Klasičen uklon (stabilna bifurkacija) .....	2
Slika 4: Nestabilna simetrična bifurkacija .....	2
Slika 5: Nesimetrična bifurkacija.....	2
Slika 6: Preskok sistema.....	2
Slika 7: Ravnotežna pot značilna za preskok sistema .....	3
Slika 8: Deformiranje paličja .....	3
Slika 9: Deformiranje loka.....	3
Slika 10: Deformiranje palične kupole .....	3
Slika 11: Satelit s solarnim napajanjem .....	4
Slika 12: Streha športne dvorane Tehnične univerze v Pekingu.....	4
Slika 13: Streha športne dvorane v Stožicah.....	4
Slika 14: Tridimenzonalni pogled na 12-delni prostorski okvir.....	8
Slika 15: Tloris 12-delnega prostorskega okvira .....	8
Slika 16: Grafični rezultati preteklih analiz 12-delnega šestkotnega prostorskega okvira. ....	9
Slika 17: Razporeditev nepomičnih (rdeča) in pomičnih (modra) podpor.....	12
Slika 18: Geometrija ravninskega loka.....	14
Slika 19: Lok 1 - vrtljivo podprto, enakomerna obtežba, pravokotna na os nosilca (lokalna Z smer) .....	15
Slika 20: Lok 2 - nepomično podprto, enakomerna obtežba, pravokotna na os nosilca (lokalna Z smer) ....	15
Slika 21: Lok 3 - vrtljivo podprto, enakomerna obtežba v globalni Z smeri.....	15
Slika 22: Lok 4 - nepomično podprto, enakomerna obtežba v globalni Z smeri.....	15
Slika 23: Lok 5 - vrtljivo podprto, nesimetrična obtežba v globalni Z smeri .....	16
Slika 24: Lok 6 - nepomično podprto, nesimetrična obtežba v globalni Z smeri .....	16
Slika 25: Aproksimacija loka v programu Abaqus: modra – lok razdeljen na dva končna elementa, rdeča – lok razdeljen na 16 končnih elementov, črna – osnovna geometrija loka .....	17
Slika 26: Oblika prve lastne vrednosti: na sliki levo je vrtljivo podprt lok, na sliki desno pa togo podprt lok .....	37
Slika 27: Športni park Stožice.....	39
Slika 28: Nadzemni del športne dvorane .....	40
Slika 29: Gradnja strehe športne dvorane, v notranjosti se vidijo začasne podpore jeklene strehe.....	40
Slika 30: Položaj uporabljenih profilov - rdeča RHS 500/300/16, zelena RHS 500/300/12,5, modra RHS 500/300/8, črna CHS323,9/6,3 (diagonale) .....	41
Slika 31: 3D pogled na streho skupaj s fasadnim obročem .....	41
Slika 32: Shema opreme (podatek arhitekta) .....	43
Slika 33: Teža opreme - glavni semafor, tabla z rezultati .....	44

Slika 34: Teža opreme - luči nad odrom.....	44
Slika 35: Teža opreme - dimne kupole.....	44
Slika 36: Teža opreme - dimne zavese.....	44
Slika 37: Teža opreme - vzdrževalni hodnik in luči.....	45
Slika 38: Priporočena vrednost oblikovnega koeficienta obtežbe snega za cilindrične glede na faktor h/b	45
Slika 39: Oblikovni koeficienti obtežbe snega za cilindrične strehe.....	45
Slika 40: Enakomerna obtežba s snegom.....	45
Slika 41: Obtežba z nakopičenim snegom.....	46
Slika 42: Nakopičen sneg 1.....	47
Slika 43: Nakopičen sneg 2.....	47
Slika 44: Nakopičen sneg 3.....	48
Slika 45: Nakopičen sneg 4.....	48
Slika 46: Nakopičen sneg 5.....	48
Slika 47: Nakopičen sneg 6.....	48
Slika 48: Nakopičen sneg 7.....	49
Slika 49: Nakopičen sneg 8.....	49
Slika 50: Nepopolnost 1 - nesimetrična nepopolnost v krajši smeri, $e_0 = 0,162\text{m}$ .....	50
Slika 51: Nepopolnost 2 - nesimetrična nepopolnost v daljši smeri, $e_0 = 0,196\text{m}$ .....	50
Slika 52: Položaj opazovanih točk.....	52
Slika 53: Oblika prve lastne vrednosti popolne konstrukcije (ES).....	53
Slika 54: Deformirana oblika popolne konstrukcije pri $LPF_{\text{mejni}}$ (ES).....	53
Slika 55: Poves strehe brez nepopolnosti pri $LPF=1$ (ES).....	54
Slika 56: Poves strehe brez nepopolnosti pri $LPF_{\text{mejni}}$ (ES).....	54
Slika 57: Deformacijska oblika strehe z nepopolnostjo 1 pri $LPF_{\text{mejni}}$ (ES).....	55
Slika 58: Poves strehe z nepopolnostjo 1 pri $LPF=1$ (ES).....	55
Slika 59: Poves strehe z nepopolnostjo 1 pri $LPF_{\text{mejni}}$ (ES).....	56
Slika 60: Deformacijska oblika strehe z nepopolnostjo 2 pri $LPF_{\text{mejni}}$ (ES).....	56
Slika 61: Poves strehe z nepopolnostjo 2 pri $LPF=1$ (ES).....	57
Slika 62: Poves strehe z nepopolnostjo 2 pri $LPF_{\text{mejni}}$ (ES).....	57
Slika 63: Deformacijska oblika strehe brez nepopolnosti pri $LPF_{\text{mejni}}$ (KS1).....	61
Slika 64: Poves strehe brez nepopolnosti pri $LPF=1$ (KS1).....	62
Slika 65: Poves strehe brez nepopolnosti pri $LPF_{\text{mejni}}$ (KS1).....	62
Slika 66: Deformacijska oblika strehe z nepopolnostjo 1 pri $LPF_{\text{mejni}}$ (KS1).....	63
Slika 67: Poves strehe z nepopolnostjo 1 pri $LPF_{\text{mejni}}$ (KS1).....	63
Slika 68: Deformacijska oblika strehe z nepopolnostjo 2 pri $LPF_{\text{mejni}}$ (KS1).....	64
Slika 69: Poves strehe z nepopolnostjo 2 pri $LPF_{\text{mejni}}$ (KS1).....	64
Slika 70: Različne višine obravnavanega nakopičenega snega.....	71

Slika 71: Poves strehe brez nepopolnosti pri $LPF_{mejni}$ za primer kopičenja 1/0 .....	72
Slika 72: Poves strehe brez nepopolnosti pri $LPF_{mejni}$ za primer kopičenja 1/0,25 .....	73
Slika 73: Poves strehe brez nepopolnosti pri $LPF_{mejni}$ za primer kopičenja 1/0,5 .....	73
Slika 74: Poves strehe brez nepopolnosti pri $LPF_{mejni}$ za primer kopičenja 1/0,75 .....	74
Slika 75: Poves strehe brez nepopolnosti pri $LPF_{mejni}$ za primer kopičenje 1/1 .....	74
Slika 76: Poves strehe brez nepopolnosti pri enakomerni obtežbi s snegom .....	79
Slika 77: Poves strehe z nivojem nepopolnosti 150 % in enakomerno obtežbo s snegom .....	80
Slika 78: Poves strehe brez nepopolnosti pri obtežbi z nakopičenim snegom .....	84
Slika 79: Poves strehe z nivojem nepopolnosti 150% pri obtežbi z nakopičenim snegom .....	84
Slika 80: Deformirana oblika strehe brez nepopolnosti z enakomerno obtežbo snega, Timoshenkova metoda .....	88
Slika 81: Deformirana oblika strehe z nepopolnostjo in enakomerno obtežbo snega, Timoshenkova metoda .....	88
Slika 82: Deformirana oblika strehe brez nepopolnosti in obtežbo nakopičenega snega, modificirana Newton-Raphsonova metoda .....	92
Slika 83: Deformirana oblika strehe z vneseno nepopolnostjo in obtežbo nakopičenega snega, modificirana Newton-Raphsonova metoda .....	93
Slika 84: Kritični elementi za kontrolo osnih sil .....	97
Slika 85: Pokrov (temenski del strehe) s prikazanimi pozicijami podpor .....	110
Slika 86: Pokrov, nepopolnost 1 .....	112
Slika 87: Pokrov, nepopolnost 2 .....	112
Slika 88: Pokrov, nepopolnost 3 .....	112
Slika 89: Položaj opazovanih točk pokrova .....	112
Slika 90: Poves pokrova brez nepopolnosti pri enakomerni obtežbi s snegom in podporami-vzmetmi .....	113
Slika 91: Deformiranje pokrova brez nepopolnosti pri nakopičeni obtežbi II in podporami – vzmetmi .....	115
Slika 92: Deformiranje pokrova z nepopolnostjo 1 pri nakopičeni obtežbi II in podporami - vzmetmi .....	116
Slika 93: Deformiranje pokrova z nepopolnostjo 2 pri nakopičeni obtežbi II in podporami - vzmetmi .....	116
Slika 94: Deformiranje pokrova z nepopolnostjo 3 pri nakopičeni obtežbi II in podporami – vzmetmi .....	117

## KAZALO GRAFIKONOV

Graf 1: P-w diagrami nepomično podprtega 12-delnega okvira pri različnem številu končnih elementov .	10
Graf 2: Spreminjanje mejne obtežbe in pomika pri večanju števila končnih elementov .....	10
Graf 3: Primerjava ravnotežnih poti pomično in nepomično podprtega okvira s predhodnimi rezultati ....	11
Graf 4: Primerjava ravnotežnih poti 12-delnega okvira z različnimi podporami .....	13
Graf 5: Spreminjanje mejne obtežbe in pomika glede na razporeditev podpor 12-delnega okvira.....	13
Graf 6: P-w diagram loka 1, $f/L = 0,15$ , glede na različno število uporabljenih končnih elementov.....	17
Graf 7: P-w diagram točke na sredini loka 1, popolna konstrukcija .....	20
Graf 8: P-w diagram točke na sredini loka 1, simetrična nepopolnost z amplitudo $l/1000$ .....	20
Graf 9: P-w diagram točke na sredini loka 1, simetrična nepopolnost z amplitudo $s/300$ .....	20
Graf 10: P-w diagram točke na sredini loka 1, nesimetrična nepopolnost z amplitudo $l/600$ .....	21
Graf 11: Padec mejne obtežbe zaradi nepopolnosti v odstotkih, lok 1 .....	21
Graf 12: P-w diagrami točke na sredini popolnega in nepopolnega loka 1 s faktorjem $f/L = 0,04$ .....	22
Graf 13: P-w diagram točke na sredini loka 2, popolna konstrukcija .....	23
Graf 14: P-w diagram točke na sredini loka 2, simetrična nepopolnost z amplitudo $l/1000$ .....	24
Graf 15: P-w diagram točke na sredini loka 2, simetrična nepopolnost z amplitudo $s/300$ .....	24
Graf 16: P-w diagram točke na sredini loka 2, nesimetrična nepopolnost z amplitudo $L/600$ .....	24
Graf 17: Padec mejne obtežbe zaradi nepopolnosti v odstotkih, lok 2 .....	25
Graf 18: P-w diagram točke na sredini lokov $f/L = 0,04$ , popolna konstrukcija .....	26
Graf 19: P-w diagram točke na sredini lokov $f/L = 0,04$ , simetrična nepopolnost z amplitudo $L/1000$ .....	26
Graf 20: P-w diagram točke na sredini lokov $f/L = 0,04$ , simetrična nepopolnost z amplitudo $s/300$ .....	27
Graf 21: P-w diagram točke na sredini lokov $f/L = 0,04$ , nesimetrična nepopolnost z amplitudo $L/600$ .....	27
Graf 22: Padec mejne nosilnosti zaradi nepopolnosti v odstotkih, lok s faktorjem $f/L=0,04$ .....	27
Graf 23: P-w diagram točke na sredini lokov $f/L = 0,30$ , popolna konstrukcija .....	29
Graf 24: P-w diagram točke na sredini lokov $f/L = 0,30$ , simetrična nepopolnost z amplitudo $l/1000$ .....	29
Graf 25: P-w diagram točke na sredini lokov $f/L = 0,30$ , simetrična nepopolnost z amplitudo $s/300$ .....	30
Graf 26: P-w diagram točke na sredini lokov $f/L = 0,30$ , nesimetrična nepopolnost z amplitudo $l/600$ .....	30
Graf 27: Padec mejne nosilnosti zaradi nepopolnosti v odstotkih, lok s faktorjem $f/L = 0,30$ .....	30
Graf 28: P-w diagram točke na sredini loka 6, $f/L = 0,04$ , primerjava med Abaqus-om in Scio.....	32
Graf 29: P-w diagram točke na sredini loka 6, $f/L=0,30$ , primerjava med ABAQUS-om in SCIO.....	33
Graf 30: P-w diagram točke na sredini loka 6, $f/L=0,04$ , preskok sistema v programu SCIA Engineer .....	34
Graf 31: P-w diagram točke T1 (ES) .....	58
Graf 32: P-w diagram točke T9 (ES) .....	58
Graf 33: P-w diagram točke T10 (ES) .....	59
Graf 34: P-w diagram točke T13 (ES) .....	59
Graf 35: P-w diagram točke T6 (ES) .....	60
Graf 36: P-w diagram točke T1 (KS1) .....	65

Graf 37: P-w diagram točke T10 (KS1) .....	65
Graf 38: P-w diagram točke T12 (KS1) .....	66
Graf 39: P-w diagram točke T13 (KS1) .....	66
Graf 40: P-w diagram točke T7 (KS1) .....	67
Graf 41: P-w diagram točke T1 popolne strehe pri enakomerni obtežbi in nakopičeni obtežbi 1 .....	68
Graf 42: P-w diagram točke T9 popolne strehe pri enakomerni obtežbi in nakopičeni obtežbi 1 .....	68
Graf 43: P-w diagram točke T10 popolne strehe pri enakomerni obtežbi in nakopičeni obtežbi 1 .....	68
Graf 44: P-w diagram točke T12 popolne strehe pri enakomerni obtežbi in nakopičeni obtežbi 1 .....	69
Graf 45: P-w diagram točke T13 popolne strehe pri enakomerni obtežbi in nakopičeni obtežbi 1 .....	69
Graf 46: P-w diagram v točki T1 strehe brez nepopolnosti z različnimi nivoji kopičenja snega .....	75
Graf 47: P-w diagram v točki T9 strehe brez nepopolnosti z različnimi nivoji kopičenja snega .....	75
Graf 48: P-w diagram v točki T10 strehe brez nepopolnosti z različnimi nivoji kopičenja snega .....	76
Graf 49: P-w diagram v točki T12 strehe brez nepopolnosti z različnimi nivoji kopičenja snega .....	76
Graf 50: P-w diagram v točki T13 strehe brez nepopolnosti z različnimi nivoji kopičenja snega .....	77
Graf 51: Odvisnost med nosilnostjo in nivojem nepopolnosti pri enakomernem snegu .....	79
Graf 52: P-w diagram točke T1 pri različnem nivoju nepopolnosti in enakomerni obtežbi s snegom .....	80
Graf 53: P-w diagram točke T1 pri različnem nivoju nepopolnosti in enakomerni obtežbi s snegom .....	81
Graf 54: P-w diagram točke T1 pri različnem nivoju nepopolnosti in enakomerni obtežbi s snegom .....	81
Graf 55: P-w diagram točke T1 pri različnem nivoju nepopolnosti in enakomerni obtežbi s snegom .....	82
Graf 56: P-w diagram točke T13 pri različnem nivoju nepopolnosti in enakomerni obtežbi s snegom .....	82
Graf 57: Odvisnost med nosilnostjo in nivojem nepopolnosti pri nakopičenem snegu .....	83
Graf 58: P-w diagram točke T1 na strehi z različnimi nivoji nepopolnosti in nakopičeno obtežbo snega ....	85
Graf 59: P-w diagram točke T9 na strehi z različnimi nivoji nepopolnosti in nakopičeno obtežbo snega ....	85
Graf 60: P-w diagram točke T10 na strehi z različnimi nivoji nepopolnosti in nakopičenim snegom .....	86
Graf 61: P-w diagram točke T11 na strehi z različnimi nivoji nepopolnosti in nakopičenim snegom .....	86
Graf 62: P-w diagram točke T13 na strehi z različnimi nivoji nepopolnosti in nakopičenim snegom .....	86
Graf 63: P-w diagram točke T1 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (ES) .....	89
Graf 64: P-w diagram točke T6 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (ES) .....	89
Graf 65: P-w diagram točke T7 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (ES) .....	89
Graf 66: P-w diagram točke T9 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (ES) .....	90
Graf 67: P-w diagram točke T10 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (ES) .....	90
Graf 68: P-w diagram točke T12 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (ES) .....	90
Graf 69: P-w diagram točke T13 – primerjava izračuna v SCII Engineer in Abaqusu (ES) .....	91
Graf 70: P-w diagram točke T1 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (KS1) .....	93
Graf 71: P-w diagram točke T6 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (KS1) .....	94
Graf 72: P-w diagram točke T7 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (KS1) .....	94
Graf 73: P-w diagram točke T9 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (KS1) .....	94

Graf 74: P-w diagram točke T10 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (KS1).....	95
Graf 75: P-w diagram točke T12 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (KS1).....	95
Graf 76: P-w diagram točke T13 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (KS1).....	95
Graf 77: Primerjava osnih sil elementa E6 pri obtežbi z enakomernim snegom in popolni konstrukciji .....	99
Graf 78: Primerjava osnih sil elementa E9 pri obtežbi z enakomernim snegom in popolni konstrukciji ...	100
Graf 79: Primerjava osnih sil elementa E13 pri obtežbi z enakomernim snegom in popolni konstrukciji .	100
Graf 80: Primerjava osnih sil elementa E6 pri obtežbi z enakomernim snegom in konstrukciji z nepopolnostjo.....	102
Graf 81: Primerjava osnih sil elementa E9 pri obtežbi z enakomernim snegom in konstrukciji z nepopolnostjo.....	103
Graf 82: Primerjava osnih sil elementa E15 pri obtežbi z enakomernim snegom in konstrukciji z nepopolnostjo.....	103
Graf 83: Primerjava osnih sil elementa E7 pri obtežbi z nakopičenim snegom in popolni konstrukciji .....	106
Graf 84: Primerjava osnih sil elementa E9 pri obtežbi z nakopičenim snegom in popolni konstrukciji .....	106
Graf 85: Primerjava osnih sil elementa E7 pri obtežbi z nakopičenim snegom in konstrukciji z nepopolnostjo.....	108
Graf 86: Primerjava osnih sil elementa E9 pri obtežbi z nakopičenim snegom in konstrukciji z nepopolnostjo.....	109
Graf 87: P-w diagram v točki T1 pri enakomerni obtežbi s snegom in popolni konstrukciji.....	114
Graf 88: P-w diagram točke T4 pri nakopičeni obtežbi s snegom II ter podporami – vzmetmi pri različnih oblikah nepopolnosti .....	117
Graf 89: P-w diagram točke T4 pri različnih podporah popolnega pokrova in z nakopičeno obtežbo II....	118

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Mejne vrednosti nepomično podprtega 12-delnega okvira pri različnem številu končnih elementov.....	9
Preglednica 2: Mejne vrednosti obtežbe 12-delnega okvira z različnimi podporami .....	13
Preglednica 3: Mejna obtežba loka 1, $f/L=0,15$ , glede na število končnih elementov .....	17
Preglednica 4: Oblika in amplituda nepopolnosti za lok.....	18
Preglednica 5: Amplitude nepopolnosti za simetrično in nesimetrično nepopolnost .....	19
Preglednica 6: Lok 1, mejne vrednosti za popolno in nepopolno konstrukcijo.....	19
Preglednica 7: Lok 2, mejne vrednosti za popolno in nepopolno konstrukcijo.....	23
Preglednica 8: Mejne vrednosti popolnih in nepopolnih lokov z oblikovnim faktorjem $f/L = 0,04$ .....	26
Preglednica 9: Mejne vrednosti popolnih in nepopolnih lokov z oblikovnim faktorjem $f/L = 0,30$ .....	29
Preglednica 10: Lok 6, mejne vrednosti izračunane v Abaqusu in Scii Engineer .....	32
Preglednica 11: Primerjava osnih sil pri loku 6, $f/L=0,04$ .....	33
Preglednica 12: Primerjava osnih sil pri loku 6, $f/L=0,3$ .....	33
Preglednica 13: Lastne vrednosti in mejne obtežbe lokov izračunane s programom Abaqus in Scia .....	35
Preglednica 14: Potrebna vrednost faktorja K.....	37
Preglednica 15: Teža kritine.....	42
Preglednica 16: Obtežne kombinacije .....	49
Preglednica 17: Mejni faktorji nosilnosti pri obtežni kombinaciji "enakomeren sneg" .....	53
Preglednica 18: Mejni faktorji nosilnosti pri obtežni kombinaciji "kopičenje snega 1" .....	61
Preglednica 19: Mejne vrednosti popolne in nepopolne strehe vseh obtežnih kombinacij .....	70
Preglednica 20: Mejne vrednosti strehe brez/z nepopolnostjo pri različnem nivoju kopičenja obtežbe .....	71
Preglednica 21: Amplitude nepopolnosti pri različnem nivoju nepopolnosti .....	78
Preglednica 22: Faktorji mejne nosilnosti pri različnem nivoju nepopolnosti in enakomerni obtežbi s snegom .....	78
Preglednica 23: Mejni faktorji pri strehi z različnimi nivoji nepopolnostmi in nakopičenim snegom.....	83
Preglednica 24: Kritični faktorji povečanja enakomerne obtežbe s snegom izračunane v programu Abaqus in Scia Engineer.....	87
Preglednica 25: Mejni faktorji povečanja obtežbe z nakopičenim snegom (obtežba pri upoštevanju višini strehe $h=15$ m in $h=18$ m) izračunane v Abaqusu in Scii Engineer .....	92
Preglednica 26: Projektna uklonska nosilnost kritičnih elementov.....	97
Preglednica 27: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za popolno streho z enakomerno obtežbo pri nivojih 0,25, 0,5 in 0,75 projektne obtežbe.....	98
Preglednica 28: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za popolno streho z enakomerno obtežbo pri nivoju projektne obtežbe in mejnem nivoju obtežbe .....	98
Preglednica 29: Izkoriščenost prereza kritičnih elementov pri nivoju projektne obtežbe – enakomeren sneg brez nepopolnosti.....	100
Preglednica 30: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za streho z nepopolnostjo in enakomerno obtežbo pri nivojih 0,25, 0,5 in 0,75 projektne obtežbe.....	101



Preglednica 31: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za streho z nepopolnostjo in enakomerno obtežbo pri nivoju projektne obtežbe in mejnem nivoju obtežbe .....	102
Preglednica 32: Izkoriščenost prereza kritičnih elementov pri nivoju projektne obtežbe – enakomeren sneg z nepopolnostmi .....	104
Preglednica 33: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za streho brez nepopolnostjo z obtežbo nakopičenega snega pri nivojih 0,25, 0,5 in 0,75 projektne obtežbe .....	104
Preglednica 34: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za streho brez nepopolnostjo z obtežbo nakopičenega snega pri nivoju projektne obtežbe in kritičnem nivoju obtežbe .....	105
Preglednica 35: Izkoriščenost prereza kritičnih elementov pri nivoju projektne obtežbe – nakopičen sneg brez nepopolnosti .....	106
Preglednica 36: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za streho z nepopolnostjo in obtežbo nakopičenega snega pri nivojih 0,25, 0,5 in 0,75 projektne obtežbe .....	107
Preglednica 37: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za streho z nepopolnostjo in obtežbo nakopičenega snega pri nivoju projektne obtežbe in mejnem nivoju obtežbe .....	108
Preglednica 38: Izkoriščenost prerezov kritičnih elementov pri nivoju kritične obtežbe – nakopičen sneg z nepopolnostmi .....	109
Preglednica 39: Mejne vrednosti pri enakomernem snegu .....	113
Preglednica 40: Mejne vrednosti pri nakopičenju snega I .....	114
Preglednica 41: Mejne vrednosti pri nakopičenju snega II .....	114
Preglednica 42: Mejne vrednosti pri nakopičenju snega III .....	118



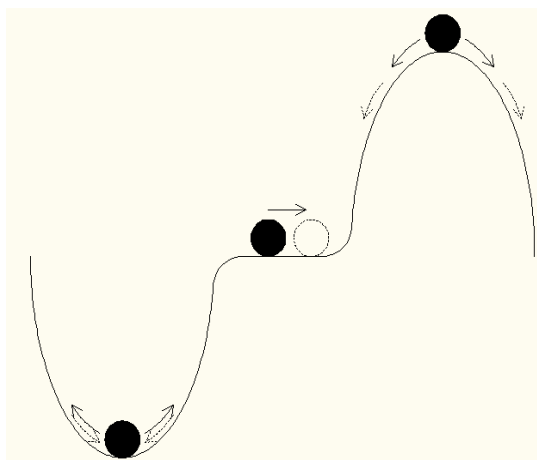
## 1 UVOD

### 1.1 Stabilnost konstrukcij

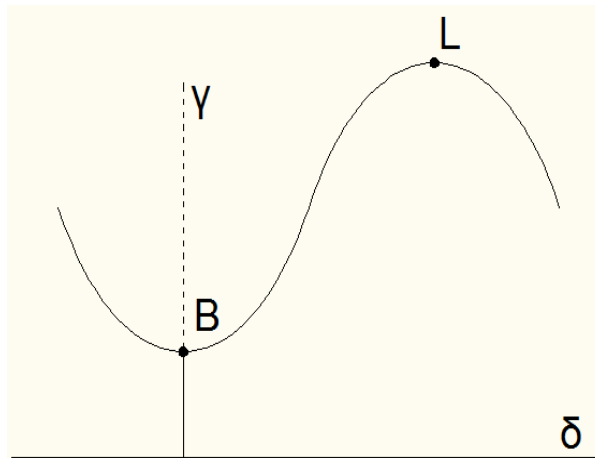
Analizo posamezne konstrukcije začnemo s statično in dinamično analizo. V tem koraku izračunamo notranje sile, napetosti, pomike, ter vse količine preverimo glede na nosilnost prerezov. Pri dinamični analizi upoštevamo še potresne vplive in ponovno izračunamo vse notranje količine ter odziv konstrukcije na nihanje tal – nihajne oblike konstrukcije ter lastne nihajne vrednosti. Del statične analize je tudi stabilnostna analiza konstrukcije oziroma njenih delov – kontrola lokalne oziroma globalne stabilne lege.

Pri stabilnostni analizi ugotavljamo naravo ravnotežne lege na podlagi odziva konstrukcije po poljubno majhni spremembi ravnotežne lege. Ločimo tri vrste ravnotežne lege glede na odziv konstrukcije po spremembi lege:

- stabilna lega – če konstrukcijo malo premaknemo, se le-ta vrne v začetno ravnotežno lego (na sliki 1 prikazano levo),
- labilna (nestabilna) lega – če konstrukcijo malo odmaknemo, se le-ta prestavi v novo ravnotežno lego daleč stran (na sliki 1 prikazano desno),
- indiferentna (nevtralna) lega – če konstrukcijo malo odmaknemo, le-ta ostane v novi poziciji (na sliki 1 prikazano na sredini).



Slika 1: Ravnotežne lege - stabilna, indiferentna, labilna



Slika 2: Karakteristična ravnotežna pot

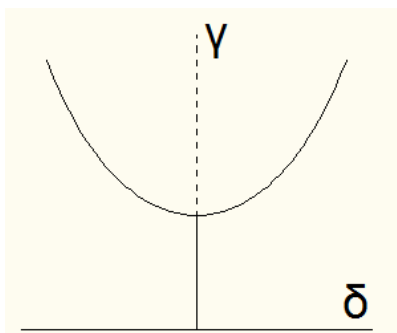
Poleg narave ravnotežne lege je rezultat stabilnostne analize lahko tudi celotna ravnotežna pot obnašanja konstrukcije (slika 2). Določimo jo tako, da na abscisno os rišemo odziv konstrukcije  $\delta$  (npr. navpični pomik), na ordinatno os pa obtežni faktor  $\gamma$  (lahko tudi silo  $P$ ;  $P=\gamma \cdot P_{ref}$ ). Karakteristične točke ravnotežne poti so:

- navadne ravnotežne točke
  - stabilne – sestavljajo stabilno vejo ravnotežne poti (na sliki 2 narisane s polno črto),
  - nestabilne – sestavljajo nestabilno vejo ravnotežne poti (na sliki 2 narisane s črtkano črto),

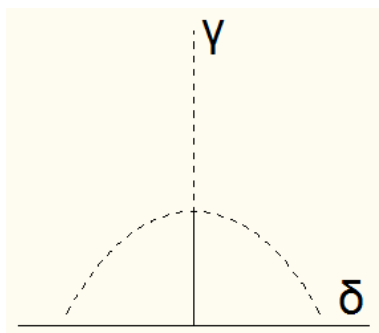
- bifurkacijska točka – ravnotežna točka, v kateri se križata vsaj dve ravnotežni poti (na sliki 2 označena s črko B),
- limitna točka – točka, v kateri je tangenta na ravnotežno pot horizontalna (na sliki 2 označena s črko L).

Ravnotežna pot obnašanja konstrukcije nam pokaže način izgube stabilnosti. Poznamo štiri karakteristične tipe izgube stabilnosti:

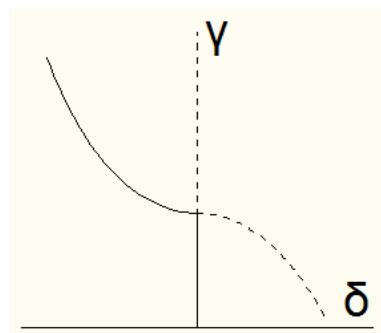
- klasičen uklon (stabilna bifurkacija) – pojavi se pri tlačeni palici ter pri tlačeni pločevini (ravnotežna pot je prikazana na sliki 3),
- nestabilna nesimetrična bifurkacija – pojavi se pri obtežbi s hidrostatskim pritiskom, ko lahko pritisk večamo, naenkrat pa pride do eksplozije, podobno je tudi s tlačanjem pločevinke (ravnotežna pot je prikazana na sliki 4),
- nesimetrična bifurkacija – pojavi se pri lomljenih nosilcih, odziv pri kritični obtežbi je odvisen od smeri vsiljenih pomikov (ravnotežna pot je prikazana na sliki 5),
- preskok sistema – pojavi se pri plitkih lokih, kupolah (ravnotežna pot je prikazana na sliki 6).



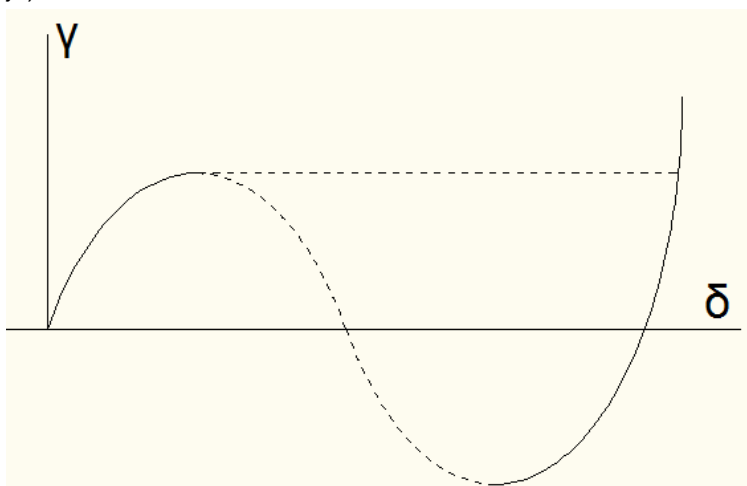
Slika 3: Klasičen uklon (stabilna bifurkacija)



Slika 4: Nestabilna simetrična bifurkacija



Slika 5: Nesimetrična bifurkacija

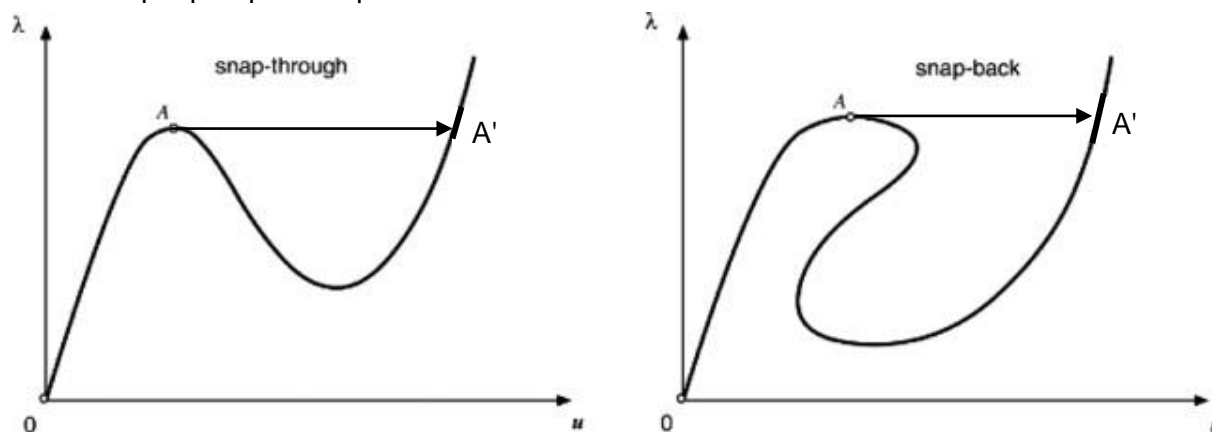


Slika 6: Preskok sistema

## 1.2 Preskok sistema

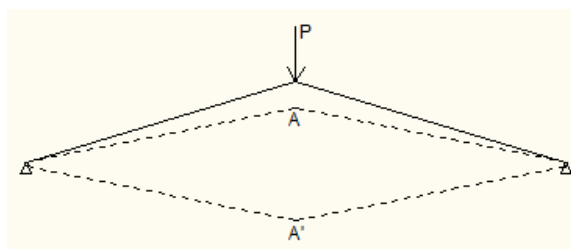
Preskok sistema je vrsta uklona, pri katerem tlačne sile v elementu povzročijo nestabilnost konstrukcije, obtežba pa nato povzroči nenaden velik pomik v njeni smeri. Razlika med uklonom in preskokom sistema je v tem, da se pri uklonu konstrukcija deformira v smeri, ki je pravokotna na smer obtežbe, pri preskoku sistema pa se konstrukcija deformira v smeri delovanja obtežbe. Preskok sistema se lahko pojavi pri paličnih konstrukcijah, nosilcih in kupolah, glavni pogoj zanj je, da je višina paličja oziroma loka precej manjša kot razpon oziroma premer.

Poznamo dve obliki ravnotežnih poti, ki sta značilni za preskok sistema (slika 7). Na levi strani («snap-through») je narisana ravnotežna pot, ki jo običajno povežemo s preskokom sistema in je značilna za vse vrste konstrukcij, ki so občutljive na preskok sistema, medtem ko je ravnotežna pot, narisana na desni strani («snap-back»), značilna predvsem za členkasto podprte plitke kupole s centrično obtežbo.

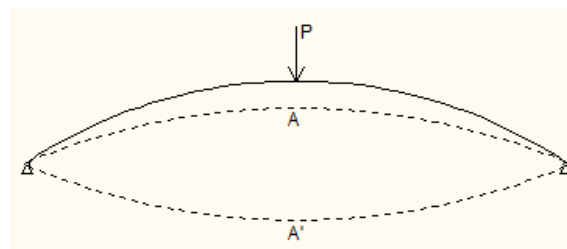


Slika 7: Ravnotežna pot značilna za preskok sistema

Na spodnjih slikah je prikazano obnašanje paličja (slika 8), vrtljivo podprtega loka (slika 9) in palične kupole (slika 10) pod točkovno obremenitvijo. Paličje in lok se počasi deformirata do točke A, ko pa dosežeta to obliko, se zgodi hipen prehod na točko A'. Ti dve točki sta tudi označeni na sliki 7, kjer je prikazana ravnotežna pot preskoka sistema.



Slika 8: Deformiranje paličja

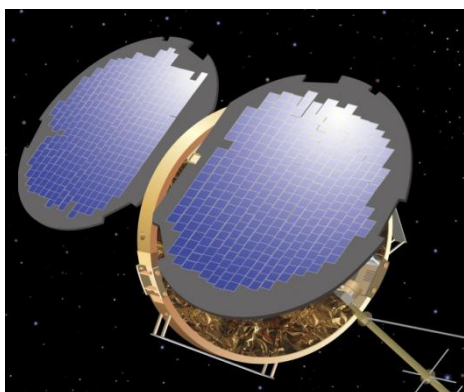


Slika 9: Deformiranje loka

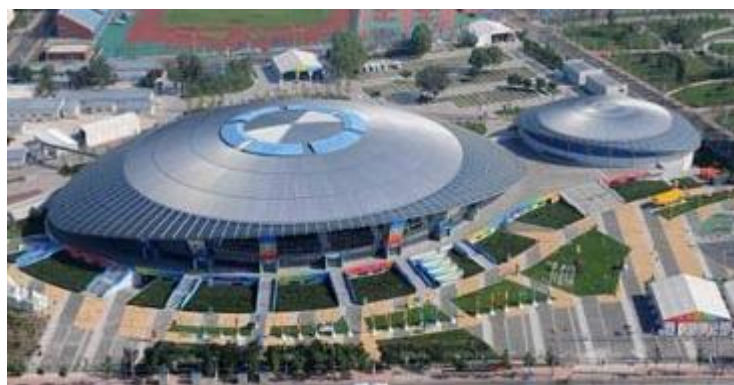


Slika 10: Deformiranje palične kupole

S problemom preskoka sistema se ne ukvarjamo samo v gradbeništvu, temveč je prisoten tudi v vesoljski tehnologiji, pri mikroelektromehaničnih sistemih ter v vsakdanjem življenju. V vesoljski tehnologiji so taki elementi predvsem sateliti s solarnim napajanjem, velike palične strukture za podporo mikrovalovnih anten ter zrcal. Vse te strukture uporabljajo paličja kot glavne sestavne elemente zaradi lahke mase ter relativno hitre gradnje. Veliki pomiki elementov pa lahko povzročijo preskok sistema. Mikroelektromehanični sistemi so sestavljeni iz paličja ali plošče, ki preskoči zaradi električne sile, ki nanje deluje. Ti sistemi formirajo mikrostrukture, ki so vgrajene v silicijeve čipe, ti pa so sestavni deli mnogih elektronskih aparatov. V vsakdanjem življenju je preskok sistema slišen kot pok pri odpiranju kozarcev (npr. marmelada ...) – preskok pločevine pokrovčka. V tem primeru so deformacije majhne, tako da pokrovček ni vidno poškodovan.



Slika 11: Satelit s solarnim napajanjem



Slika 12: Streha športne dvorane Tehnične univerze v Pekingu



Slika 13: Streha športne dvorane v Stožicah

## **2 PREDSTAVITEV PROGRAMOV IN UPORABLJENIH RAČUNSKIH METOD**

Primere, ki so narejeni v diplomski nalogi, sem računala v dveh programih. Osnovni program, ki sem ga uporabila za račun stabilnostne analize, je Abaqus, verzija 6.10. Nekatere primere sem izračunala še v programu Scia Engineer, študentska verzija 2011.1, ter rezultate primerjala s tistimi iz Abaqusa. Programa in metode, ki so bile s posameznim programom uporabljene, se med seboj razlikujejo, zato bom v nadaljevanju najprej predstavila oba programa.

### **2.1 Abaqus, verzija 6.10**

Program Abaqus je kompleksen program za račun po metodi končnih elementov. Uporablja se povsod, kjer je pomembno natančno analizirati obnašanje detajlov. V gradbeništvu se uporablja predvsem na raziskovalnem področju, kjer nadomešča poskuse v laboratoriju, oziroma si z njim pomagamo definirati pogoje, ki jih bomo uporabili pri laboratorijskem poskusu. Z njim preučujemo tridimenzionalno obnašanje spojev, nosilcev ali njihovih delov (npr. ojačitve). Za samo dimenzioniranje konstrukcij pa se program Abaqus v praksi manj uporablja.

S pomočjo programa sem po Riks-ovi metodi izračunala mejno nosilnost različnih konstrukcij ter narisala ravnotežno pot.

#### **2.1.1 Riks-ova metoda za določitev kritične nosilnosti**

Rikso-ova metoda je ena od metod, ki sledijo obnašanju konstrukcije in nam dajo za rezultat celotno ravnotežno pot konstrukcije. Celotna ravnotežna pot nelinearnih sistemov, oziroma vsaj del poti po doseženi kritični nosilnosti, je pomembna predvsem pri obnašanju kupol oziroma njihovem uklonu. Metode, ki omogočajo sledenje celotni ravnotežni poti, se v splošnem imenujejo metode dolžine loka oziroma metoda nadaljevanja. Te metode predstavljajo najbolj splošno orodje za reševanje nelinearnih sistemov enačb tudi v primerih oziroma na ravnotežnih poteh, kjer stabilne rešitve ne obstajajo.

Riks-ova metoda se v programu Abaqus v splošnem uporablja za določitev nestabilnosti ter nelinearne porušitve konstrukcije. Običajno sledi analizi lastnih vrednosti, s čimer lahko dobimo popolno informacijo o porušitvi konstrukcije. Omogoča nam, da uporabimo nelinearen material ter nelinearne pogoje podpiranja.

### **2.2 Scia Engineer, študentska verzija 2011.1**

Scia Engineer je program za računanje in dimenzioniranje gradbenih konstrukcij. Omogoča veliko različnih izračunov: od preprostih nosilcev in okvirjev do naprednega dimenzioniranja kompleksnih tridimenzionalnih konstrukcij iz jekla, betona, lesa ali katerega drugega materiala.

S pomočjo programa Scia Engineer sem izračunala lastne vrednosti posamezne konstrukcije ter nosilnost konstrukcije po teoriji drugega reda s statičnim nelinearnim izračunom. Rešitve nelinearnega sistema enačb lahko dobimo na več načinov:

- po Timoshenkovi metodi,
- po Newton-Raphsonovi metodi,
- po modificirani Newton-Raphsonovi metodi,
- po metodi Picarda,
- po metodi Picarda v kombinaciji z Newton-Raphsonovo metodo.

Izračune sem naredila po metodi Timoshenka ter po modificirani Newton-Raphsonovi metodi, zato bom v nadaljevanju na kratko predstavila obe metodi za reševanje nelinearnih problemov.

### 2.2.1 Timoshenkova metoda

Algoritem v programu temelji na točni Timoshenkovi rešitvi za linearne elemente, kjer predpostavimo, da je osna sila med deformiranjem konstantna. Metoda je zato uporabna pri konstrukcijah, kjer je razlika v osni sili pri računu po teoriji prvega reda in teoriji drugega reda malenkostna. Take konstrukcije so večinoma okvirji, zato je pri njih uporaba Timoshenkove metode najbolj učinkovita.

Metoda predpostavlja majhne pomike, zasuke in napetosti. Primerna je za konstrukcije, pri katerih rotacija ne preseže  $8^\circ$ .

Prednost metode:

- če linijski elementi ne tvorijo rebraste ali lupinaste konstrukcije, ne potrebujemo fine razdelitve na končne elemente;
- sestavljena je iz dveh iteracij, zato je zelo učinkovita. V prvi iteraciji se izračuna osna sila v elementu, v naslednjem koraku se nato ta osna sila uporabi za točen izračun po Timoshenkovi metodi.

Slabost metode je, da ne moremo naenkrat izračunati celotnega časovnega odziva konstrukcije, kot je to možno pri računu v programu Abaqus. Za risanje ravnotežne poti je tako potrebno več izračunov, saj dobimo pri enem računu odziv konstrukcije le za en nivo obtežbe. Poleg tega ne moremo enostavno ugotoviti, katera obtežba je mejna, ampak je potrebno z višanjem nivoja obtežbe ugotoviti, kdaj postane konstrukcija nestabilna, kar pomeni, da je mejna obtežba presežena.

### 2.2.2 Modificirana Newton-Raphsonova metoda

Algoritem v programu temelji na Newton-Raphsonovi metodi za reševanje nelinearnih problemov. Metoda je učinkovita za večino konstrukcij in problemov, ki se pojavijo. Uporabna je tudi pri velikih pomikih.



Obtežba je na konstrukcijo postavljena v več korakih. V programu je privzeta vrednost korakov 8. Za Newton-Raphsonovo metodo je značilno, da se togostna matrika konstrukcije pred vsakim korakom obtežbe izračuna na novo. Modificirana Newton-Raphsonova metoda je poenostavljena tako, da se togostna matrika konstrukcije izračuna v prvem koraku dodajanja obtežbe, v kasnejših korakih pa se ponovno ne izračuna. S tem pridobimo predvsem na času računanja celotnega problema.

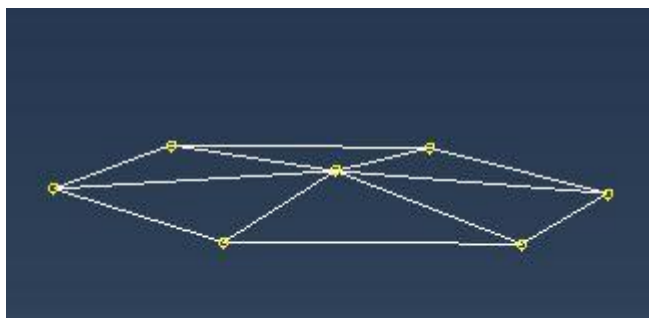
Natančnost metode je odvisna od števila končnih elementov, ki smo jih predpisali posameznemu elementu v konstrukciji – višje kot je število končnih elementov, bolj natančen bo izračun, ki pa bo tudi trajal dalj časa. V programu je zahteva, da je element razdeljen na najmanj štiri končne elemente, kar običajno daje pri linijskih elementih že zadovoljive rezultate.

Podobno kot pri Timoshenkovi metodi, tudi pri Newton-Raphsonovi metodi ne moremo naenkrat izračunati celotnega odziva konstrukcije za risanje ravnotežne poti. Do ravnotežne poti lahko pridemo samo z večkratnim računanjem odziva konstrukcije pri različnih nivojih obtežbe.

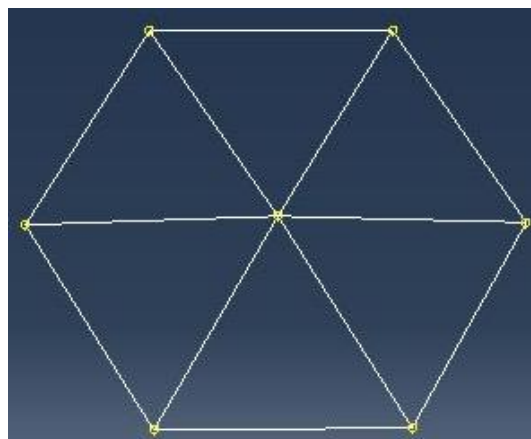
### 3 OSNOVNI PRIMERI

#### 3.1 12-delni šestkotni prostorski okvir

12-delni šestkotni okvir ima tlorisno obliko pravilnega šestkotnika, njegova stranica meri 0,6096 m, višina sredinske točke je 0,0445 m.



Slika 14: Tridimenzionalni pogled na 12-delni prostorski okvir

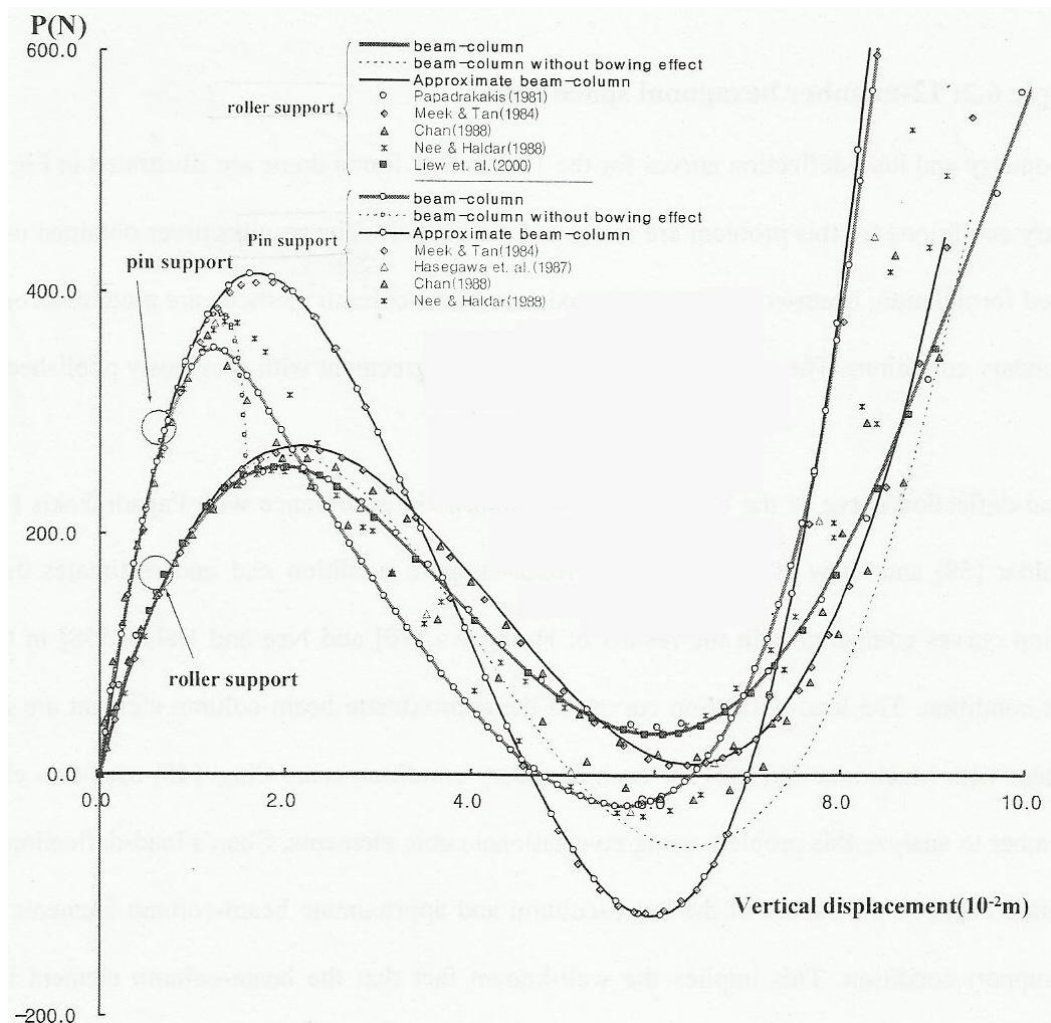


Slika 15: Tloris 12-delnega prostorskega okvira

Okvir je sestavljen iz kvadratnega betonskega prereza s stranico 17,8 mm, upoštevani elastični modul znaša  $E = 3034,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ . Podpore so različne – v prvem primeru so nepomično podprte (pin support), v drugem primeru pa imamo pomično podprt okvir (roller support). Okvir je obremenjen s točkovno silo  $P$  na sredini okvira – v najvišji točki.

12-delni šest-kotni prostorski okvir je bil že večkrat v preteklosti analiziran s strani različnih avtorjev. Za primerjavo z mojimi izračuni sem vzela rezultate, ki so zbrani v osnutku članka avtorjev Lee, K.S. in Han, S.E. in so grafično predstavljeni na sliki 16.

Vsi izračuni so bili narejeni s pomočjo programa Abaqus.



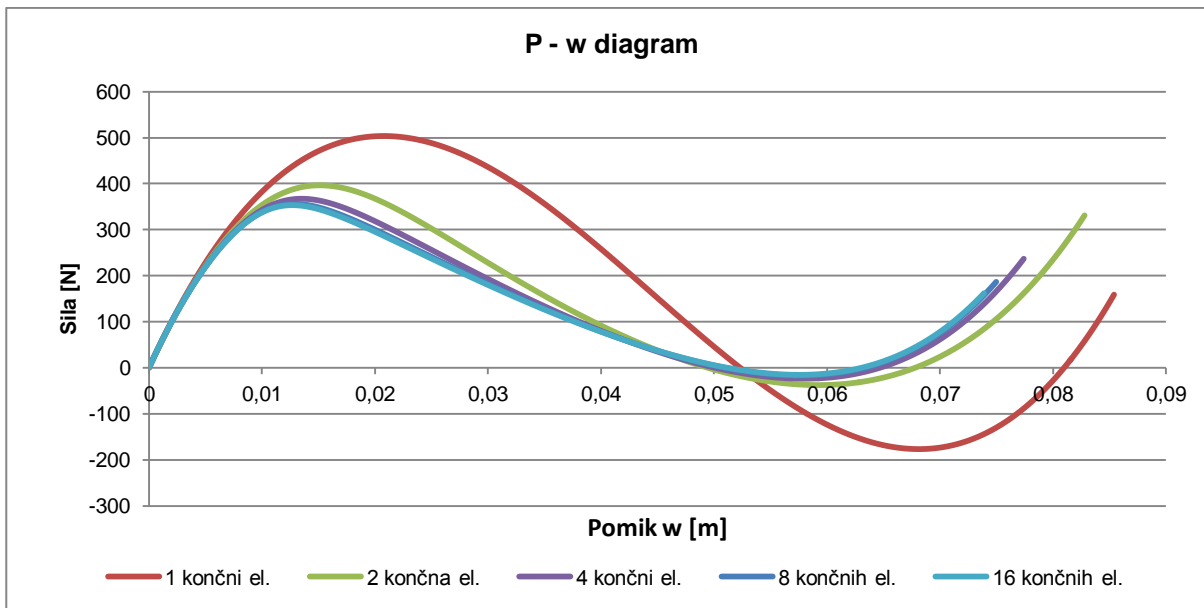
Slika 16: Grafični rezultati preteklih analiz 12-delnega šestkotnega prostorskega okvira.

### 3.2.1 Nepomično podprt 12-delni šestkotni prostorski okvir

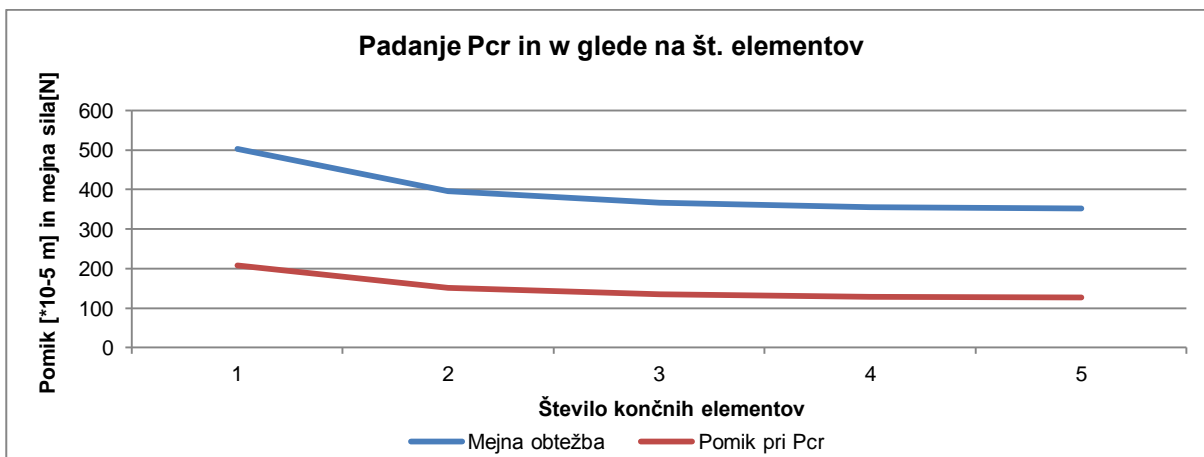
Vse točke okvirja (razen vrh okvirja) so nepomično podprte, dovoljen je zasuk v vse tri smeri. Najprej sem določila, na koliko končnih elementov je potrebno razdeliti posamezen element okvira, da so rezultati najbolj zanesljivi. Elemente sem razdelila na en, dva, štiri, osem in šestnajst končnih elementov ter izračunala mejno obtežbo ter pripadajoče pomike. Rezultate sem zbrala v preglednici 1 ter na grafu 1 in 2. Določila sem še, za koliko odstotkov se spremeni (zmanjša) mejna obtežba, če izberem več končnih elementov.

Preglednica 1: Mejne vrednosti nepomično podprtega 12-delnega okvira pri različnem številu končnih elementov

Število končnih elementov	Mejna sila P [N]	Pomik w [m]	Padec mejne nosilnosti v %
1 element	503,58	-0,0208	
2 elementa	396,33	-0,0151	27,1
4 elementi	366,67	-0,0135	7,5
8 elementov	355,83	-0,0128	3
16 elementov	352,90	-0,0127	0,8



Graf 1: P-w diagrami nepomično podprtega 12-delnega okvira pri različnem številu končnih elementov



Graf 2: Spreminjanje mejne obtežbe in pomika pri večanju števila končnih elementov

Pri večanju števila končnih elementov se mejna obtežba manjša. Najbolj viden padec je med razdelitvijo z enega na dva končna elementa, ko obtežba pade za 27 %. Nato se padanje obtežbe upočasni in počasi konvergira k pravi mejni obtežbi. Več kot imamo končnih elementov, bolj bomo imeli točen rezultat. Seveda je nesmiselno, da element razdelimo na zelo veliko končnih elementov – čas računanja se nam bo močno podaljšal, vrednost pa se ne bo zelo spremenila, kar lahko vidimo tudi že v tem primeru. Če gledamo graf 2, na katerem je prikazan padec mejne obtežbe in pomika, lahko vidimo, da je znaten padec pri spremembi z enega na dva končna elementa ter malo manj viden padec pri razdelitvi z dveh na štiri končne elemente. Od tam naprej padec na grafu ni več viden, v preglednici 1 pa lahko opazimo, da je razlika pri razdelitvi na osem ali šestnajst končnih elementov med mejno obtežbo manj kot 1 %. Na podlagi tega sem se odločila, da dobim dovolj natančno vrednost mejne obtežbe pri razdelitvi na osem elementov in sem pri nadaljnji obravnavi primera upoštevala to vrednost.

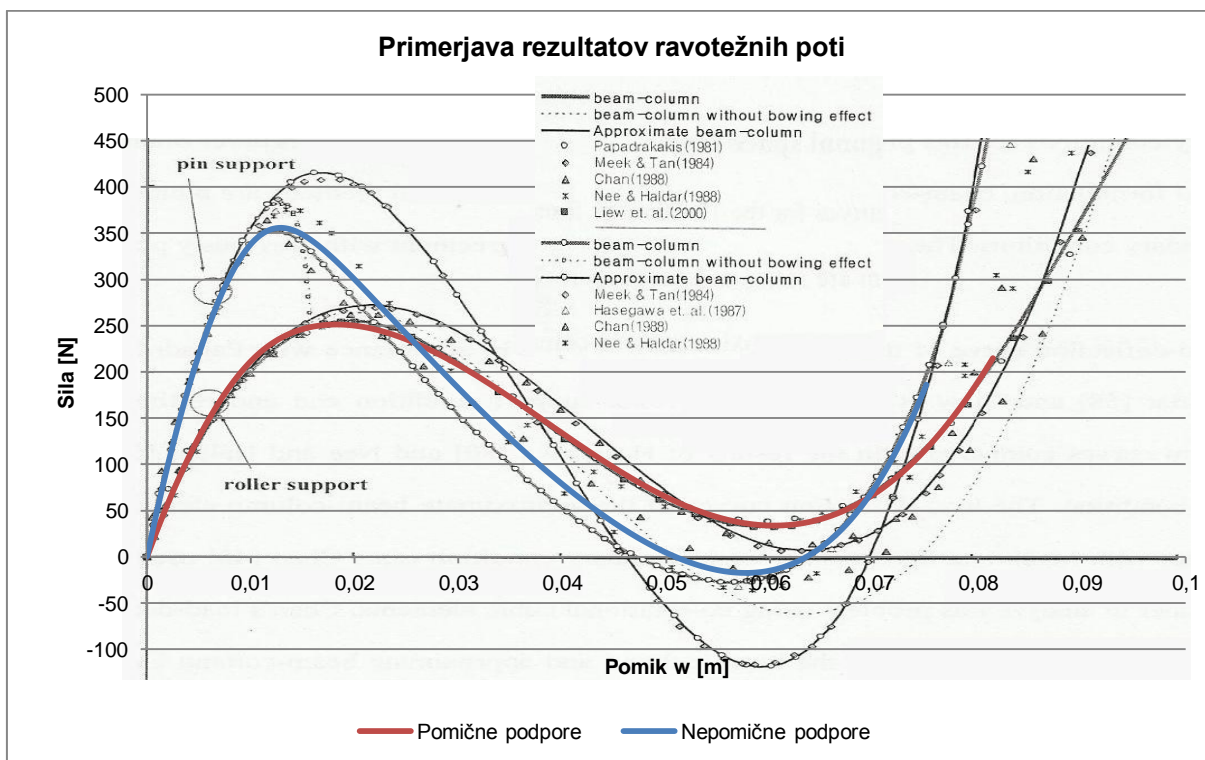
Kritična obtežba nepomično podprtega 12-delnega šestkotnega prostorskega okvira, obremenjenega s točkovno silo na sredini, znaša 355 N, kar je nekoliko manj, kot so pokazali predhodni rezultati.

### 3.2.2 Pomično podprt 12-delni šestkotni prostorski okvir

Okvir s samimi pomičnimi podporami bi bil nestabilen, zato sem okvir v eni točki nepomično podprla, vrhno točko sem podprla v njeni ravnini, pomik v navpični smeri sem pustila prost. Tako sem dosegla, da konstrukcija ni že v samem začetku nestabilna.

Elemente v okviru sem razdelila na osem končnih elementov in določila mejno obtežbo. Ta znaša 251,15 N, pomik pri tej obtežbi je velik 18,2 mm.

Rezultat pomično podprtega okvira in nepomično podprtega okvira sem primerjala s predhodnimi rezultati, kar je vidno na grafu 3.

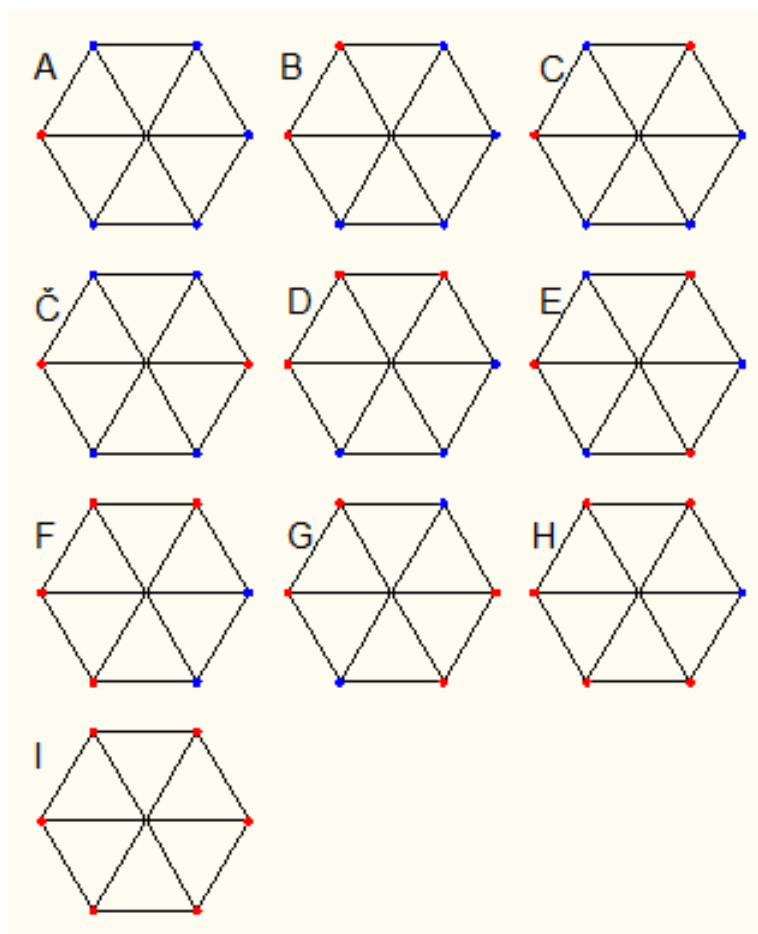


Graf 3: Primerjava ravnotežnih poti pomično in nepomično podprtega okvira s predhodnimi rezultati

Opazim lahko, da ima nepomično podprt okvir višjo vrednost mejne obtežbe ter manjše pomike. Razlog je v večji togosti kot pri pomično podprtem okviru. Rezultati, ki sem jih dobila z metodo dolžin loka, so zelo podobni nekaterim predhodnim rezultatom. Obe krivulji, pomično in nepomično podprtega okvira, sta skoraj povsem enaki krivulji, kjer so elementi v okviru obravnavani kot kombinacija nosilca in stebra (elementi so definirani v osnutku članka avtorjev Lee, K.S. in Han, S.E.).

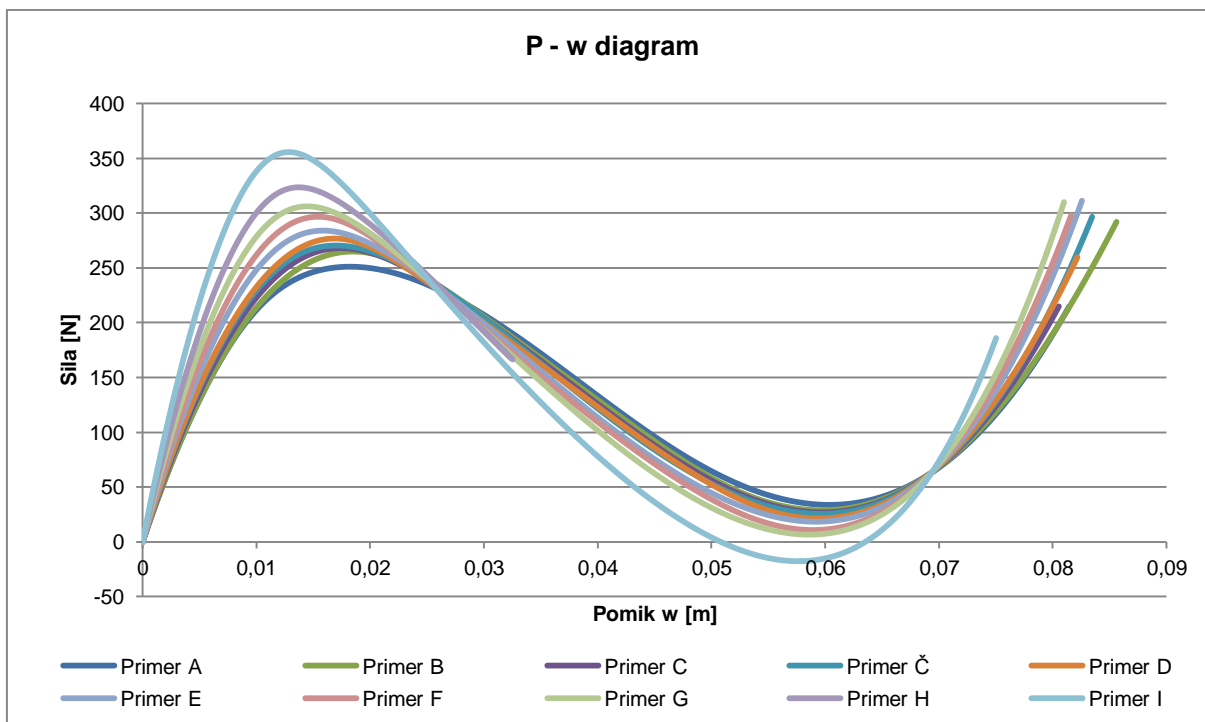
### 3.2.3 Delno pomično, delno nepomično podprt 12-delni šestkotni prostorski okvir

Zanimalo me je, kako na velikost mejne obtežbe vpliva število in razporeditev nepomičnih podpor. Naredila sem nekaj primerov, v katerih sem povečevala število nepomičnih podpor (na sliki označene z rdečo barvo) in jih razporedila po obodu, kot je prikazano na spodnji sliki (slika 17). Nato sem vse mejne vrednosti obtežbe zbrala v preglednici (preglednica 2), ravnotežne poti pa narisala na grafu (graf 4). V vseh primerih je okvir enako obremenjen, tj. točkovna sila na sredini okvira, elementi so razporejeni na 8 končnih elementov.



- A – pomično podprt okvir
- B – dve sosedni podpori sta nepomični
- C – dve nesosedni podpori sta nepomični
- Č – dve nasprotni podpori sta nepomični
- D – tri sosedne podpore so nepomične
- E – tri nesosedne podpore so nepomične
- F – štiri sosedne podpore so nepomične
- G – štiri (dvakrat po dve) nasprotni podpore so nepomične
- H – pet podpor je nepomičnih
- I – nepomično podprt okvir

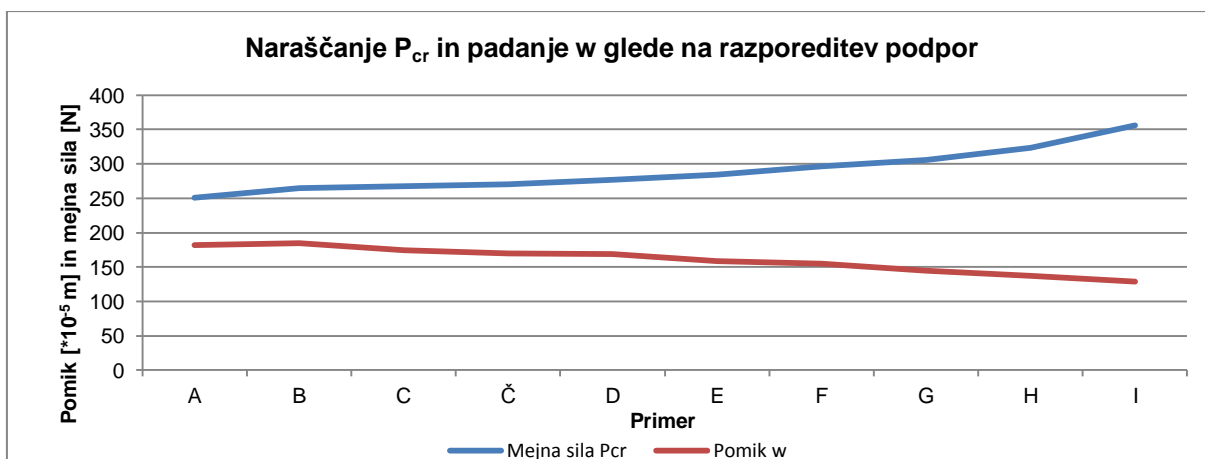
Slika 17: Razporeditev nepomičnih (rdeča) in pomičnih (modra) podpor



Graf 4: Primerjava ravnotežnih poti 12-delnega okvira z različnimi podporami

Preglednica 2: Mejne vrednosti obtežbe 12-delnega okvira z različnimi podporami

Primer	Mejna obtežba $P_{cr}$ [N]	Poves $w$ [m]
A	251,15	0,0182
B	265,13	0,0185
C	267,97	0,0175
Č	270,34	0,0170
D	276,75	0,0169
E	283,99	0,0159
F	296,65	0,0154
G	305,99	0,0144
H	323,73	0,0137
I	355,83	0,0129



Graf 5: Spreminjanje mejne obtežbe in pomika glede na razporeditev podpor 12-delnega okvira

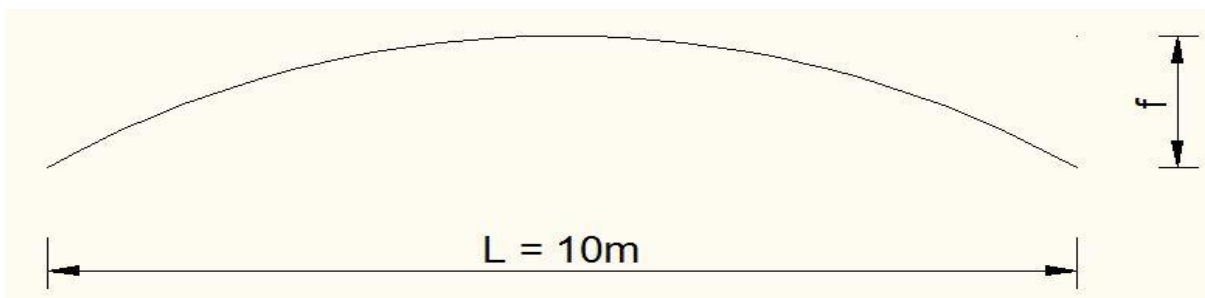
Najnižjo mejno nosilnost ima, kot je tudi pričakovati, pomično podprt okvir, nato pa se mejne nosilnosti večajo po takem zaporedju, kot so tudi razporejeni primeri. Najvišjo mejno nosilnost ima tako nepomično podprti okvir. Razlika med mejnima nosilnostma pri pomično podprtem in nepomično podprtem okviru je nekaj več kot 100 N. Mejna obtežba pri začetnih primerih počasi narašča – do primera F, tj. 4 nesosedne nepomične podpore, zraste za 50 N, nato pa v zadnjih primerih še za dodatnih 50 N. To nam pove, da pri samo dveh ali treh dodanih nepomičnih podporah ne pridobimo veliko na togosti konstrukcije in s tem na njeni mejni nosilnosti. Če pa imamo več kot polovico podpor nepomičnih, se togost bolj poveča, s tem pa tudi mejna nosilnost.

Zanimivo je opazovati, kako razporeditev enakega števila podpor vpliva na mejno nosilnost. V vseh primerih so nepomične podpore, ki so razporejene v sosednih vozliščih, manj ugodne kot tiste, ki so v nasprotnih vozliščih. Razlika je manjša pri nižjem številu nepomičnih podpor kot pri višjem. Pri dveh nepomičnih podporah je razlika v mejni nosilnosti med sosednima podporama in nasprotnima podporama 5 N, pri treh nepomičnih podporah je razlika že 7,5 N, pri štirih nepomičnih podporah pa 9,5 N. Če imamo torej omejeno število nepomičnih podpor jih je bolj pametno razporediti na nasprotni strani, kot pa vse na eno stran oziroma v sosedna vozlišča.

## 3.2 Lok v ravnini

### 3.2.1 Geometrijski podatki

Obravnavala sem lok z obliko kvadratne funkcije z razponom 10m in višino  $f$ , ki se je spreminjala.



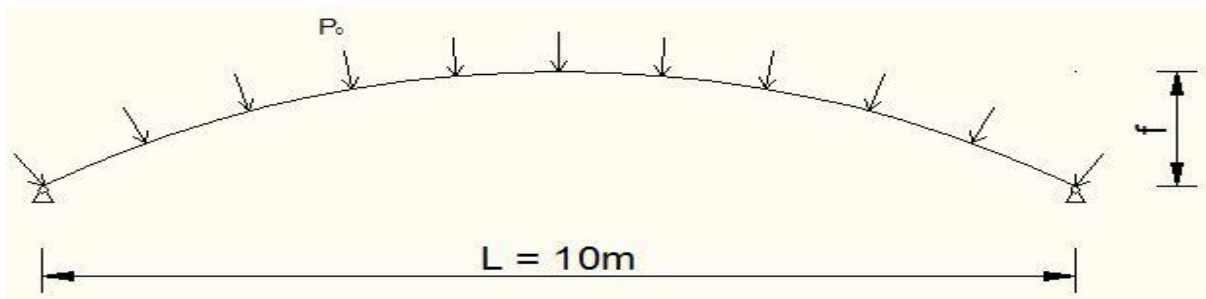
Slika 18: Geometrija ravninskega loka

Material, ki sem ga upoštevala pri izračunu, je jeklo, z lastnostmi  $E=210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$  in  $\nu=0,29$ . Prerez, ki sem ga uporabila pri loku in je enak pri vseh izračunih, je IPE 160. Profil sem določila glede na zahtevo, da je višina profila vsaj 1/100 razpona konstrukcije. To znese 100mm, ker pa se mi je profil zdel še nekoliko majhen, sem ga povečala na 160mm in tako dobila omenjeni IPE profil.

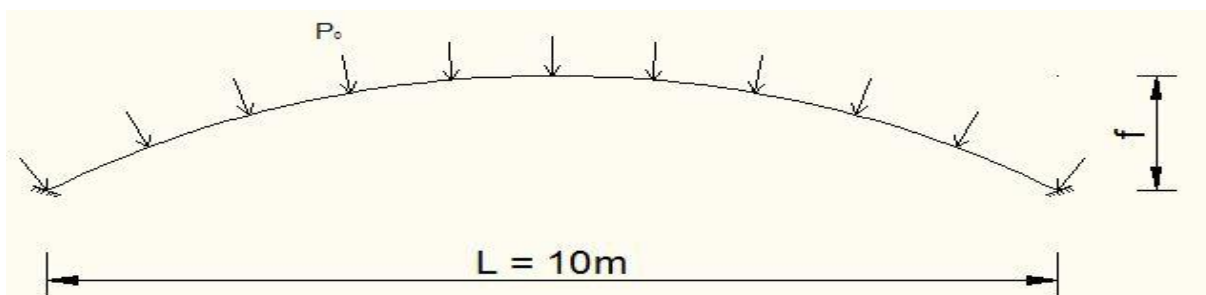
Lok je podprt na dva načina – vrtljivo podprto ter nepomično podprto, obravnavala sem tri načine obtežbe – enakomerna obtežba pravokotno na os nosilca (lokalna Z smer), enakomerna obtežba v globalni Z smeri ter nesimetrična obtežba v globalni Z smeri. Pri



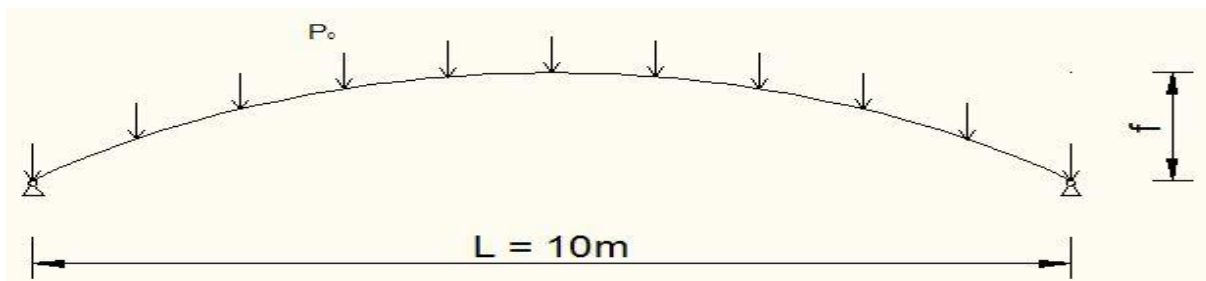
nesimetrični obtežbi v globalni Z smeri je leva polovica nosilca obremenjena s silo  $P_0$ , desna polovica pa s polovico manjšo obtežbo. Tako sem dobila 6 različnih lokov, ki so prikazani na spodnjih slikah.



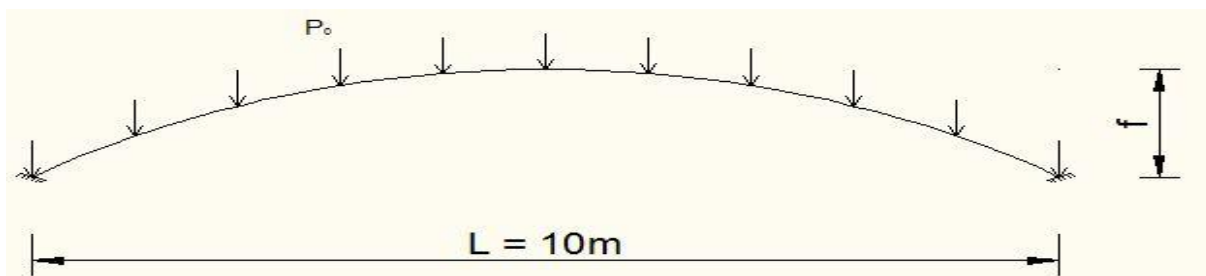
Slika 19: Lok 1 - vrtljivo podprto, enakomerna obtežba, pravokotna na os nosilca (lokalna Z smer)



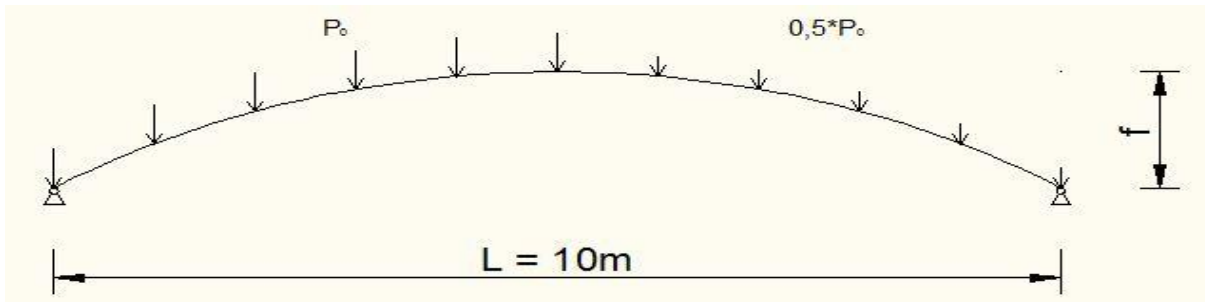
Slika 20: Lok 2 - nepomično podprto, enakomerna obtežba, pravokotna na os nosilca (lokalna Z smer)



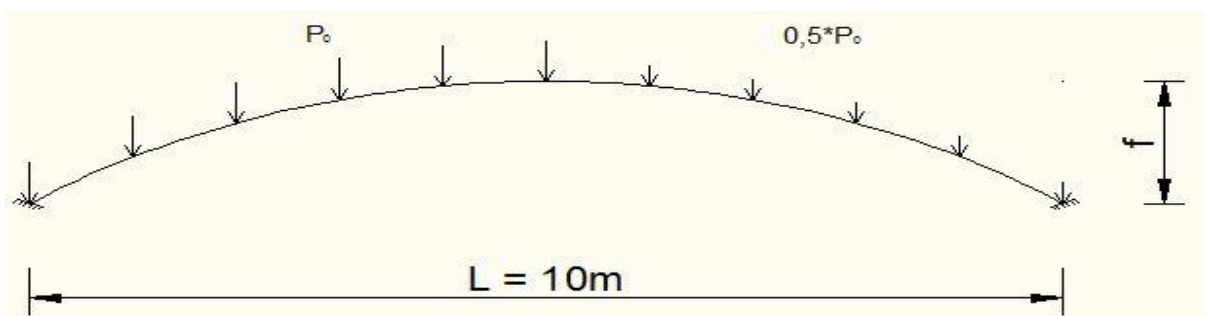
Slika 21: Lok 3 - vrtljivo podprto, enakomerna obtežba v globalni Z smeri



Slika 22: Lok 4 - nepomično podprto, enakomerna obtežba v globalni Z smeri



Slika 23: Lok 5 - vrtljivo podprto, nesimetrična obtežba v globalni Z smeri



Slika 24: Lok 6 - nepomično podprto, nesimetrična obtežba v globalni Z smeri

Pri vsakem loku sem spreminjala višino  $f$  med vrednostma 0,4 m in 3 m in dobila 7 različnih konstrukcij z naslednjimi oblikovnimi faktorji  $f/L$ : 0,15; 0,1; 0,08; 0,06; 0,04; 0,2 in 0,3, tj. z višinami 0,4 m, 0,6 m, 0,8 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m in 3,0 m.

### 3.2.2 Račun v programu Abaqus

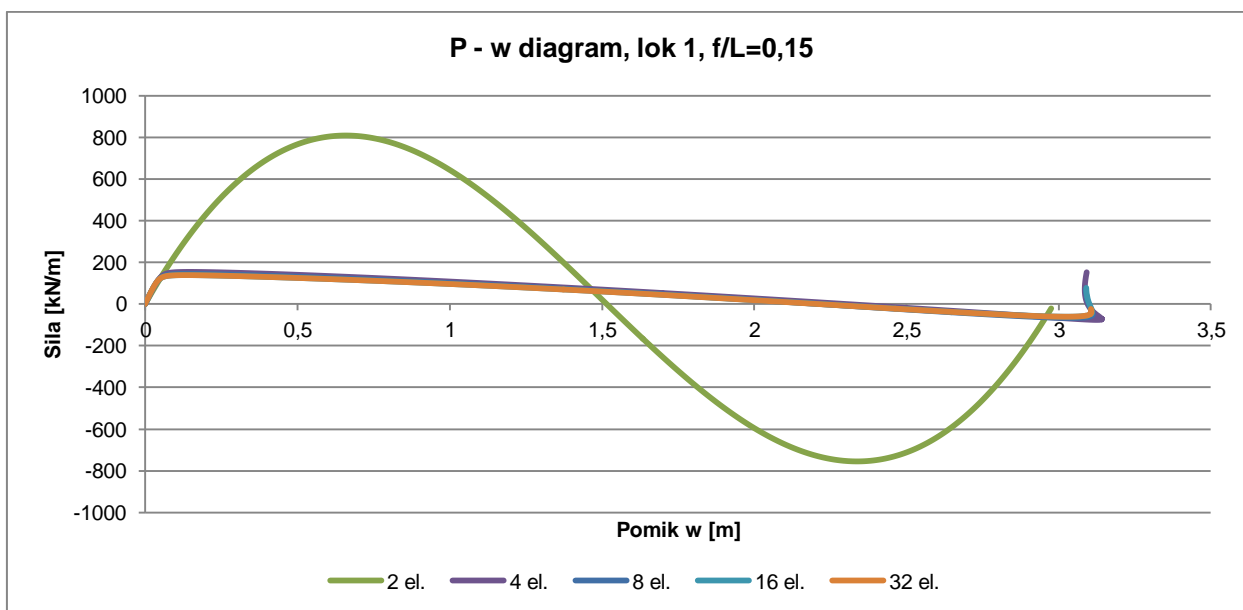
Lok v ravnini sem najprej izračunala s pomočjo programa Abaqus. Določila sem mejno obtežbo, pripadajoči pomik najvišje točke loka ter narisala ravnotežno pot (v nadaljevanju P-w diagram) za točko na sredini loka. Nato sem v lok vnesla nepopolnost ter ponovno izračunala mejne vrednosti in narisala P-w diagrame za točko na sredini loka. Dobljene mejne vrednosti in diagrame sem med seboj primerjala glede na posamezen lok (vpliv oblikovnega faktorja pri posameznem loku) ter glede na oblikovni faktor  $f/L$  (vpliv oblike načina podpiranja in oblike obtežbe pri enakem oblikovnem faktorju). Določila sem še lastne vrednosti vsakega loka in jih primerjala z vrednostmi, ki sem jih dobila pri izračunu s programom Scia Engineer.

#### 3.2.2.1 Razdelitev na končne elemente

Na podlagi izračuna pri loku 1 z oblikovnim faktorjem 0,15 sem določila, na koliko končnih elementov moram razdeliti lok, da bodo rezultati zanesljivi. Lok 1 sem razdelila na dva, štiri, osem, šestnajst in dvaintrideset elementov in izračunala mejno obtežbo, pripadajoč pomik in narisala P-w diagrame za vsako razdelitev na končne elemente.

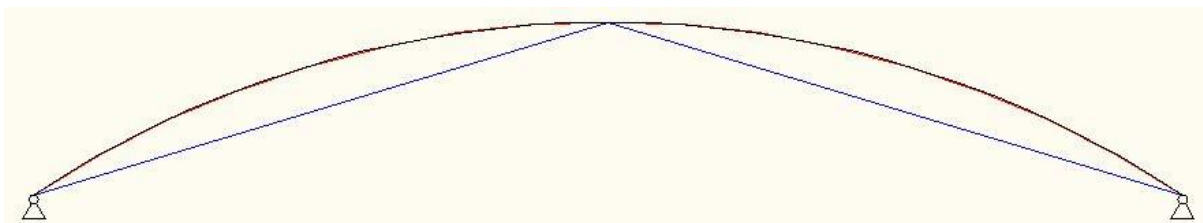
Preglednica 3: Mejna obtežba loka 1,  $f/L=0,15$ , glede na število končnih elementov

Število končnih elementov	Mejna obtežba P [kN/m]	Pomik w [m]	Odstotek zmanjšanja sile
2 končna el.	808,3	-0,660	
4 končna el.	154,5	-0,146	80,9
8 končna el.	145,4	-0,138	5,90
16 končna el.	139,5	-0,133	4,11
32 končna el.	137,8	-0,133	1,15



Graf 6: P-w diagram loka 1,  $f/L = 0,15$ , glede na različno število uporabljenih končnih elementov

Prva stvar, ki jo vidimo, je zelo velika razlika med primerom, kjer lok razdelim na dva elementa ter ostalimi primeri, kjer je lok razdeljen na več manjših delov. To se zgodi, ker program pri razdelitvi na dva elementa ne upošteva učinka loka. Program namreč določi potrebno število točk, da razdeli element na zahtevano število podelementov, nato pa te točke med seboj poveže z ravno črto. Tako pri razdelitvi loka samo na dva elementa ne dobimo dobrega približka oblike loka, kot se to zgodi pri razdelitvi na več končnih elementov, ampak dobimo paličje. Aproximacija loka, ki jo upošteva program pri svojem izračunu, je prikazana na sliki 25.



Slika 25: Aproximacija loka v programu Abaqus: **modra** – lok razdeljen na dva končna elementa, **rdeča** – lok razdeljen na 16 končnih elementov, črna – osnovna geometrija loka

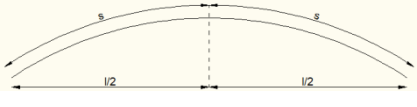
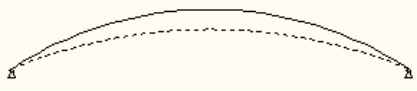
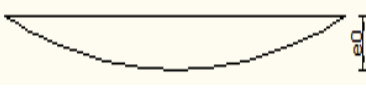
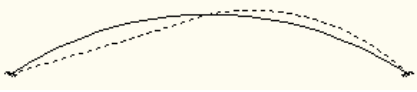
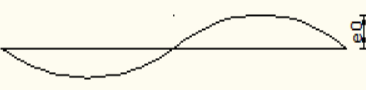
Tako sem prišla do ugotovitve, da potrebujem za zanesljive rezultate več kot dva končna elementa za posamezen lok. Pri ostalih razdelitvah razlike niso več tako velike. Če namesto

štirih elementov uporabim osem elementov, se mejna obtežba zmanjša za manj kot 6 %, pri bolj grobih razdelitvah pa je ta odstotek še manjši. Na podlagi tega sem se odločila, da bom upoštevala rezultate, pri katerih je lok razdeljen na šestnajst elementov, saj povečanje elementov na dvaintrideset spremeni vrednost kritične sile za približno 1%, čas računanja pa se veliko bolj poveča. Vse ostale loke z vsemi oblikovnimi faktorji sem računala z razdelitvijo na šestnajst končnih elementov.

### 3.2.2.2 Vnesene nepopolnosti

Obliko in velikost nepopolnosti sem določila glede na Evrokod standard EN 1993-2:2006, kjer je v dodatku D tabela z obliko in amplitudo nepopolnosti za lok. Del tabele, ki je pomemben za moje izračune je prikazan v preglednici 4.

Preglednica 4: Oblika in amplituda nepopolnosti za lok

	<b>Oblika nepopolnosti (sinusna parabola)</b>	<b>Amplituda <math>e_0</math>, glede na uklonsko krivuljo prečnega prereza</b>			
		a	b	c	d
		s/300	s/250	s/200	s/150
		/600	l/500	l/400	l/300

Lok ima prečni prerez I oblike, razmerje  $h/b=160/82=1,95 > 2$ ,  $t_f=7,4\text{mm} < 40\text{mm}$ , zato za uklonsko krivuljo okoli y osi lahko vzamem krivuljo a.

Vsakemu loku sem vnesla tri različne nepopolnosti:

- simetrična nepopolnost z amplitudo  $e_0=L/1000$ ,
- simetrična nepopolnost z amplitudo  $e_0=s/300$ ,
- nesimetrična nepopolnost z amplitudo  $e_0=L/600$ .

Dve simetrični nepopolnosti z različnima amplitudama sem vnesla, da se bo videlo, kako različna velikost amplitude vpliva na spremembo velikosti mejne obtežbe.

Pri nesimetrični nepopolnosti je velikost amplitude odvisna od razpona konstrukcije. Ta je pri vseh lokih enak, zato je tudi velikost amplitude v vseh primerih enaka. Pri simetrični nepopolnosti je amplituda odvisna od dolžine stranice loka, ta pa je pri različnih oblikovnih faktorjih različna. V preglednici 5 sem zato zbrala vrednosti amplitud nepopolnosti za različne oblikovne faktorje.

Preglednica 5: Amplitude nepopolnosti za simetrično in nesimetrično nepopolnost

Oblikovni faktor f/L	Amplituda simetrične nepopolnosti s/300	Amplituda nesimetrične nepopolnosti l/600
0,15	0,01765m	0,0167m
0,1	0,017108m	0,0167m
0,08	0,01695m	0,0167m
0,06	0,01683m	0,0167m
0,04	0,01674m	0,0167m
0,2	0,01839m	0,0167m
0,3	0,020416	0,0167m

### 3.2.3 Primerjava rezultatov glede na posamezen lok

Vseh lokov, ki sem jih izračunala je 42, ko dodam še vse nepopolnosti številka naraste na 168. Tako število rezultatov je preveč, da bi vsakega posebej predstavila v diplomski nalogi, saj bi se s tem izgubil osnovni namen diplomske naloge. Zaradi tega razloga sem izbrala dva loka in predstavila njune rezultate. Razlika z ostalimi štirimi loki je v višini mejne obtežbe, vpliv nepopolnosti pa je zelo podoben kot je prikazan v nadaljevanju.

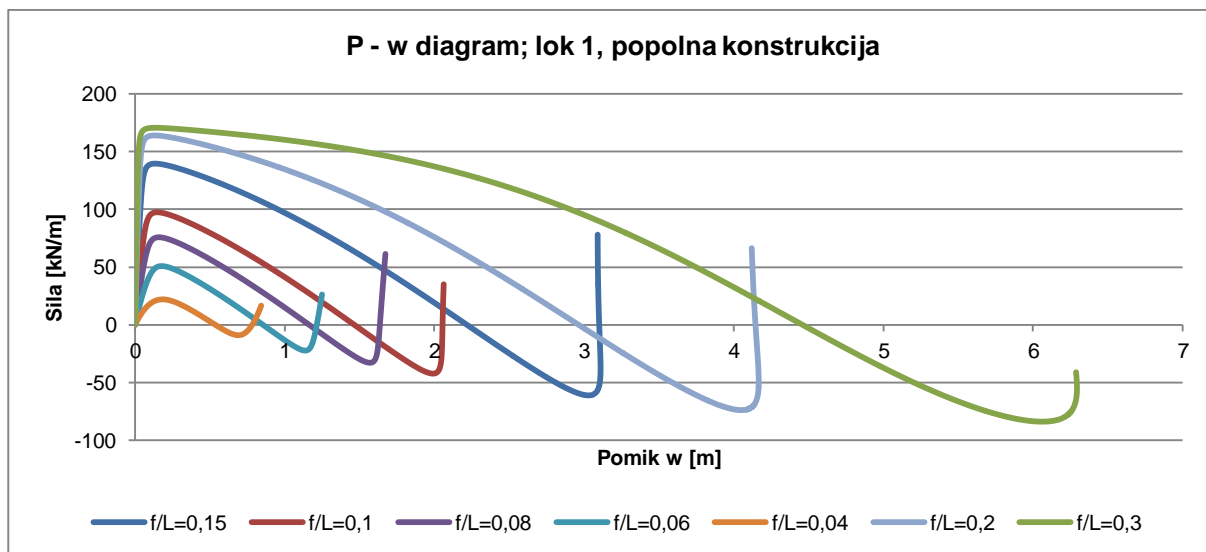
#### 3.2.3.1 Lok 1

Lok 1 je vrtljivo podprt, obtežba je enakomerna in pravokotna na os nosilca (lokalna Z smer).

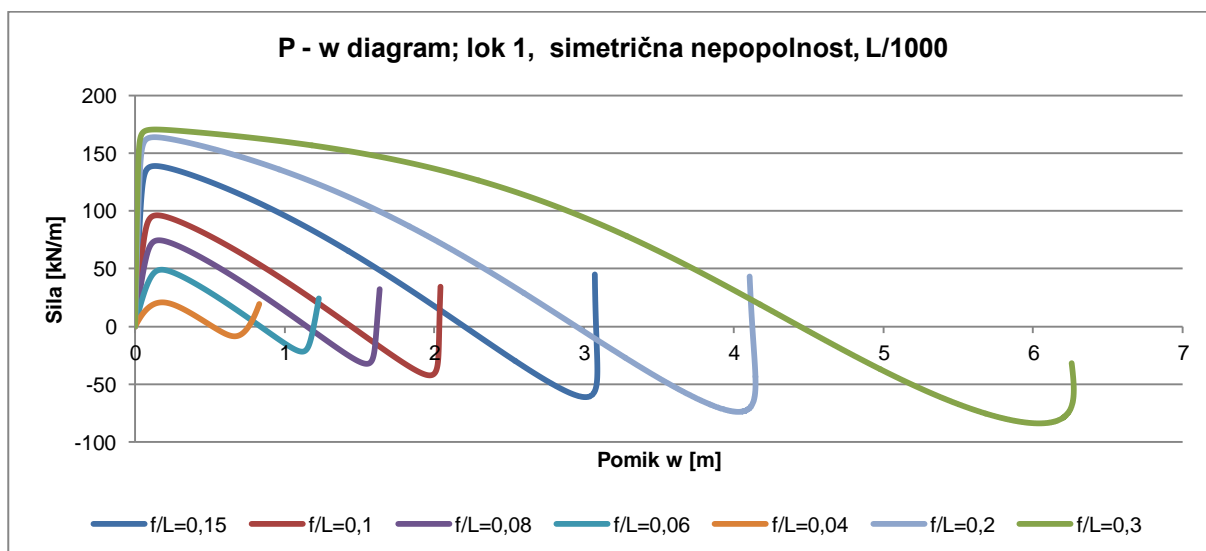
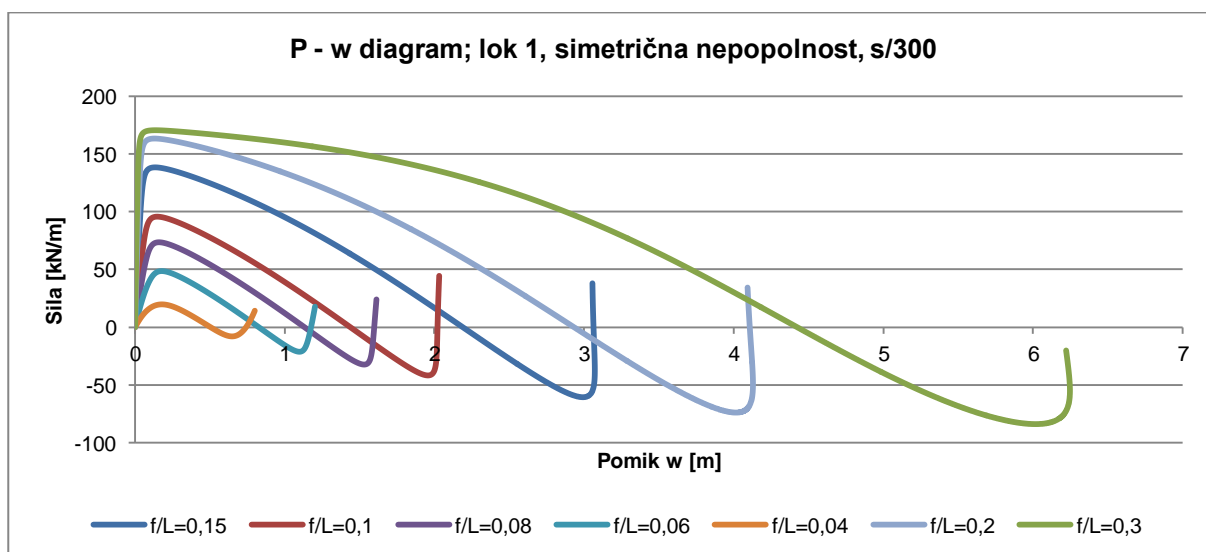
V preglednici 9 so zbrani rezultati mejne obtežbe in pripadajočega pomika za popolno konstrukcijo ter vse tri oblike nepopolnosti. Pri vsaki nepopolnosti je izračunano, za koliko odstotkov se zmanjša mejna obtežba glede na popolno konstrukcijo. V nadaljevanju so narisani P-w diagrami za popolno in nepopolne konstrukcije za točko na sredini loka, ter komentar rezultatov.

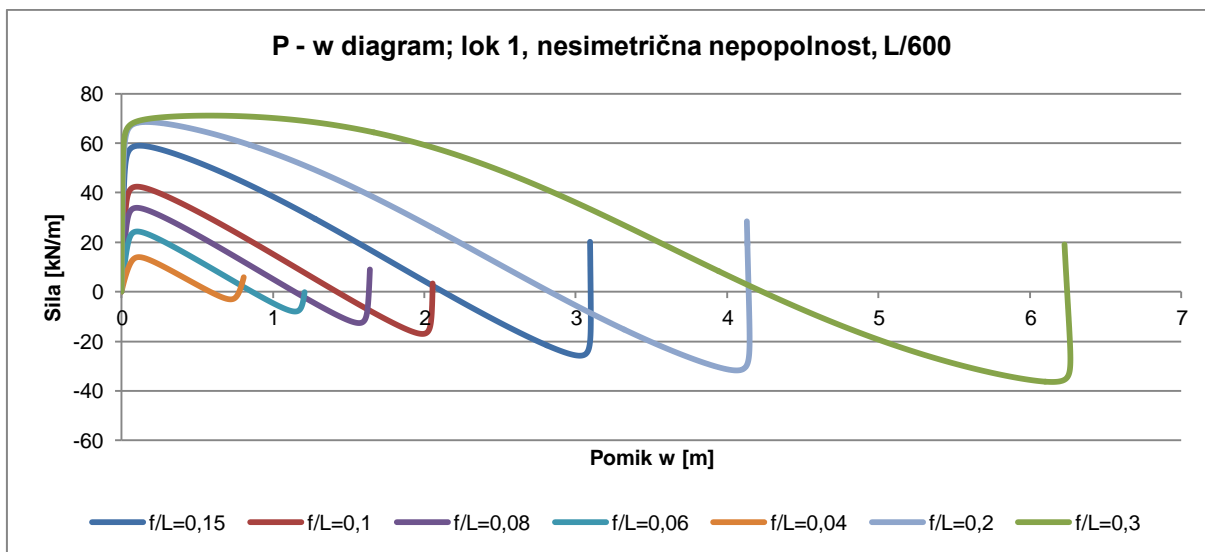
Preglednica 6: Lok 1, mejne vrednosti za popolno in nepopolno konstrukcijo

f/L	POPOLNA K.		SIM. NEP. L/1000		RAZLIKA V % (P)	SIM. NEP. s/300		RAZLIKA V % (P)	NESIM. NEP. L/600		RAZLIKA V % (P)
	P [kN/m]	w [m]	P [kN/m]	w [m]		P [kN/m]	w [m]		P [kN/m]	w [m]	
<b>0,15</b>	139,45	-0,133	138,81	-0,135	0,46	138,31	-0,134	0,82	59,03	-0,120	57,67
<b>0,1</b>	97,50	-0,149	96,53	-0,147	1,00	95,83	-0,149	1,71	42,37	-0,102	56,54
<b>0,08</b>	75,63	-0,159	74,52	-0,163	1,48	73,74	-0,158	2,50	33,83	-0,101	55,27
<b>0,06</b>	50,58	-0,178	49,31	-0,179	2,51	48,44	-0,178	4,23	24,38	-0,104	51,80
<b>0,04</b>	22,28	-0,184	20,87	-0,181	6,34	19,93	-0,180	10,55	14,09	0,114	36,76
<b>0,2</b>	163,90	-0,130	163,58	-0,130	0,19	163,31	-0,129	0,36	68,58	-0,163	58,16
<b>0,3</b>	170,32	-0,137	170,46	-0,134	-0,08	170,61	-0,134	-0,17	71,13	-0,583	58,23

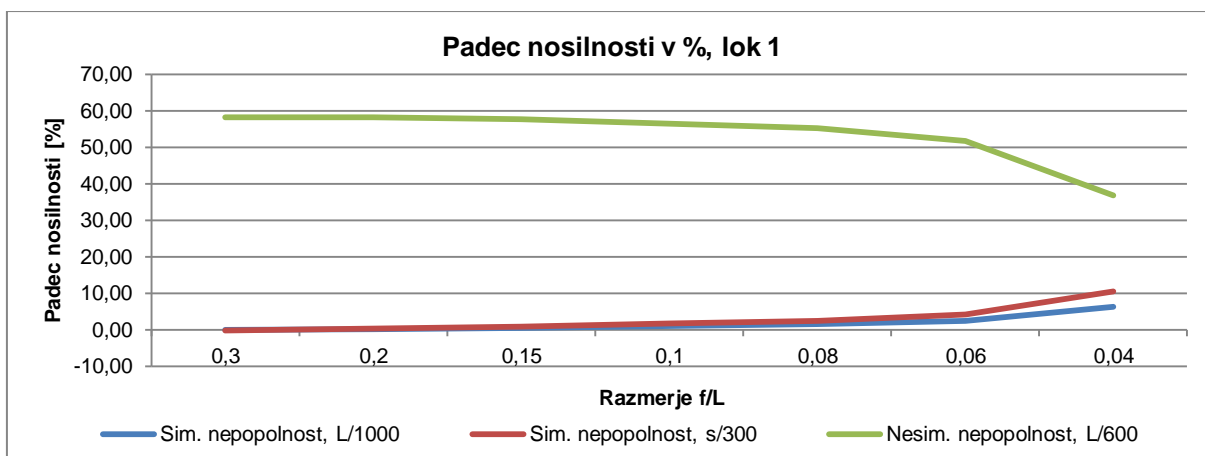


Graf 7: P-w diagram točke na sredini loka 1, popolna konstrukcija

Graf 8: P-w diagram točke na sredini loka 1, simetrična nepopolnost z amplitudo  $L/1000$ Graf 9: P-w diagram točke na sredini loka 1, simetrična nepopolnost z amplitudo  $s/300$



Graf 10: P-w diagram točke na sredini loka 1, nesimetrična nepopolnost z amplitudo l/600



Graf 11: Padec mejne obtežbe zaradi nepopolnosti v odstotkih, lok 1

Opazimo, da se z nižanjem oblikovnega faktorja  $f/L$  manjša mejna obtežba ter večja vpliv nepopolnosti. Razlog za to je manjša togost plitvejših konstrukcij in s tem večja občutljivost na vsako nepopolnost. Vidimo lahko, da je nosilnost loka z oblikovnim faktorjem 0,04 kar 7,6-krat nižja kot nosilnost loka z oblikovnim faktorjem 0,3. Poleg tega opazimo, da se pri nižjih oblikovnih faktorjih mejna nosilnost hitreje manjša – med faktorjema 0,04 in 0,06 se mejna nosilnost zmanjša za kar 56 %, medtem ko se mejna nosilnost pri višjih oblikovnih faktorjih ne zmanjša tako drastično – med faktorjema 0,3 in 0,2 za le 3,7 %.

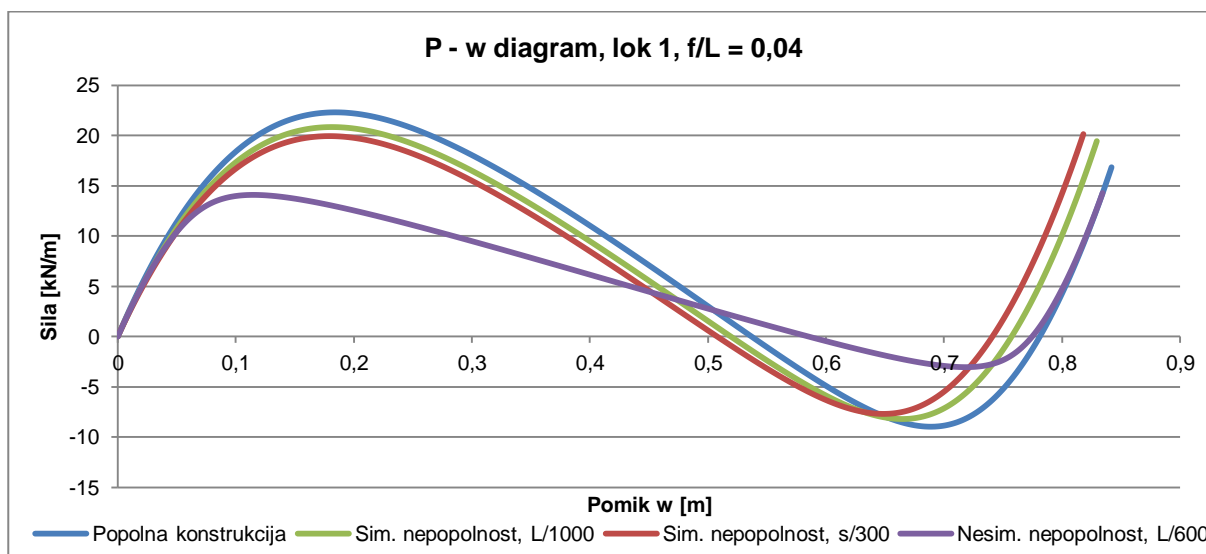
Podobno lahko opazimo tudi pri vplivu simetrične nepopolnosti na velikost mejne nosilnosti. Pri plitvem loku z oblikovnim faktorjem 0,04 se mejna nosilnost zmanjša za 10,5 %, medtem ko se pri loku s faktorjem 0,3 mejna nosilnost celo nekoliko poveča. Povečanje mejne nosilnosti je minimalno (0,3 kN/m), zato ne moremo reči, da simetrična nepopolnost ugodno vpliva na velikost mejne nosilnosti loka. Ko primerjamo različni amplitudi pri simetrični nepopolnosti lahko opazimo, da sta amplituda vnesene nepopolnosti in padec mejne nosilnosti v odstotkih linearno povezana. Pri faktorju 0,15 se nam amplituda pri s/300 poveča

za faktor 1,76, za enak faktor pa se nam tudi poveča padec mejne nosilnosti v odstotkih (z 0,46 % na 0,82 %). Enaka povezava je pri vseh sedmih oblikovnih faktorjih.

Medtem ko je na simetrično nepopolnost bolj občutljiv plitek lok, pa je pri nesimetrični nepopolnosti ravno obratno. Najbolj občutljiv je lok s faktorjem 0,3, pri katerem mejna nosilnost pade kar za 58 %, pri plitvem loku s faktorjem 0,04 pa mejna nosilnost pade za 36,8 %.

Nesimetrična nepopolnost je torej veliko bolj neugodna za sam lok. Razlog je v tem, da je pri vseh primerih prva lastna oblika enaka nesimetrični nepopolnosti, zato je tudi občutljivost v tej smeri največja. Oblika simetrične nepopolnosti je pri lastnih vrednostih na nižjem mestu. Še najvišje je pri plitvih konstrukcijah (četrti lastna vrednost), zato je tam tudi padec mejne nosilnosti višji.

Zanimivo je tudi videti, kako se vidijo P-w diagrami popolne in nepopolne konstrukcije na enem grafu. Odločila sem se, da prikazem lok z oblikovnim faktorjem 0,04, saj se tam najbolje vidi padec mejne nosilnosti pri vseh štirih primerih. Pri ostalih oblikovnih faktorjih so grafi za popolno konstrukcijo in simetrično nepopolnost zelo skupaj, graf za nesimetrično nepopolnost pa precej nižje.



Graf 12: P-w diagrami točke na sredini popolnega in nepopolnega loka 1 s faktorjem  $f/L = 0,04$

Na grafu 12 se vidi, da je obnašanje popolne konstrukcije in konstrukcije s simetrično nepopolnostjo enako, le mejna obtežba je nižja, zato sta grafa s simetrično nepopolnostjo postavljena nekoliko nižje. Večja razlika je pri konstrukciji z nesimetrično nepopolnostjo. Tam je začetni del diagrama enak, nato pa je limitna točka precej nižje kot pri ostalih treh primerih. Pomik nato začne naraščati, sila padati, padec sile je manjši kot pri popolni konstrukciji oziroma pri simetrični nepopolnosti, velikost pomika pri ponovni stabilni legi (točka A' na sliki 7) pa je enaka kot pri popolni konstrukciji.



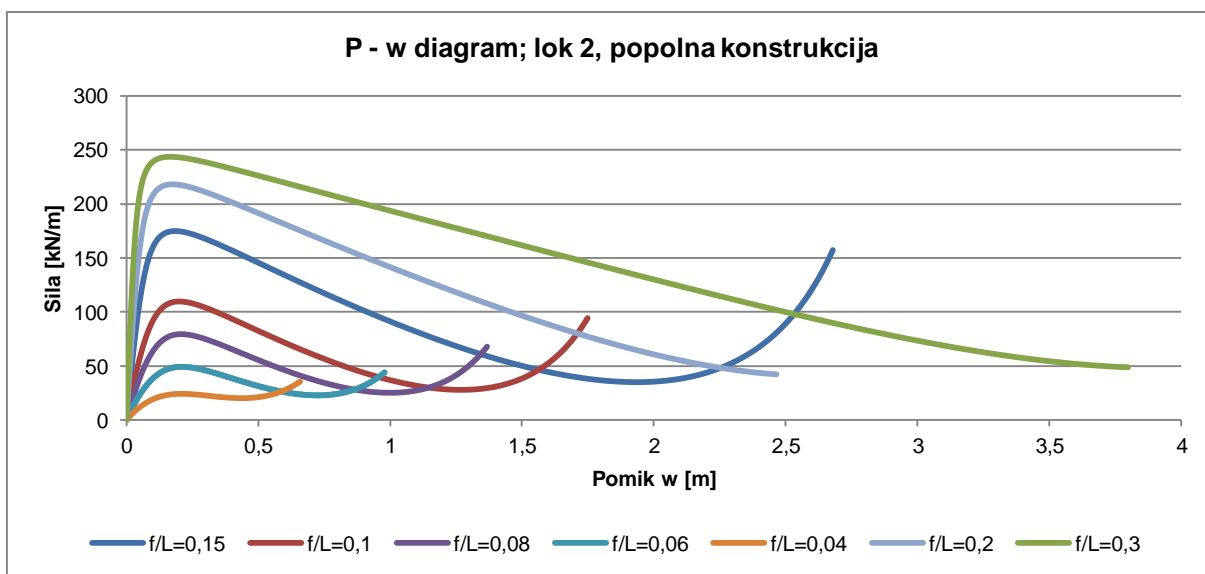
### 3.4.3.2 Lok 2

Lok 2 je nepomično podprt, obtežba je enaka kot pri loku 1 – enakomerno porazdeljena obtežba v lokalni Z smeri, tj. pravokotna na os nosilca.

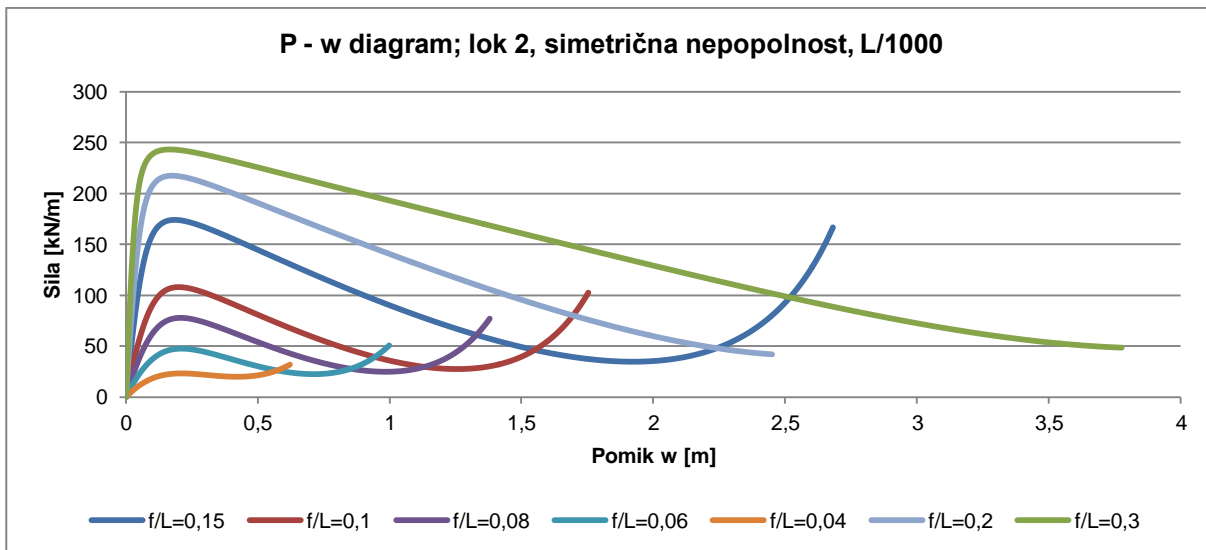
V preglednici 7 so zbrani rezultati mejne obtežbe in pripadajočega pomika za popolno konstrukcijo ter vse tri oblike nepopolnosti. Pri vsaki nepopolnosti je izračunano, za koliko odstotkov se zmanjša mejna obtežba glede na popolno konstrukcijo. V nadaljevanju so narisani P-w diagrami za popolno in nepopolne konstrukcije za točko na sredini loka in komentar rezultatov.

Preglednica 7: Lok 2, mejne vrednosti za popolno in nepopolno konstrukcijo

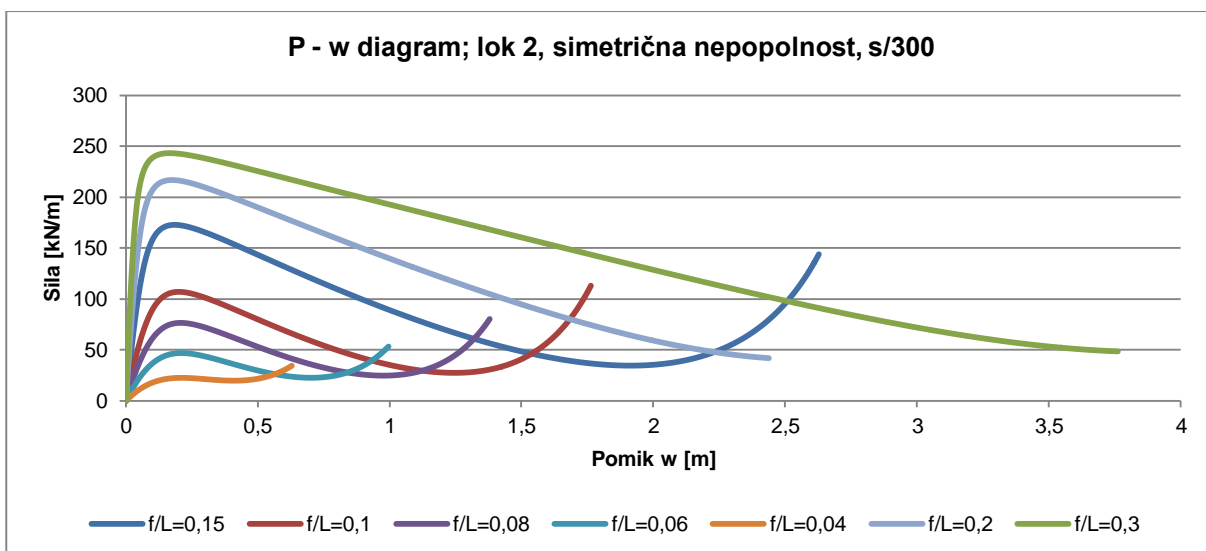
F/L	POPOLNA K.		SIM. NEP. L/1000		RAZLIKA V % (P)	SIM. NEP. s/300		RAZLIKA V % (P)	NESIM. NEP. L/600		RAZLIKA V % (P)
	P [kN/m]	w [m]	P [kN/m]	w [m]		P [kN/m]	w [m]		P [kN/m]	w [m]	
0,15	174,64	-0,183	173,75	-0,185	0,51	173,03	-0,184	0,92	120,20	-0,168	31,17
0,1	110,00	-0,200	108,15	-0,201	1,68	107,12	-0,201	2,62	83,38	-0,168	24,20
0,08	79,24	-0,207	77,73	-0,207	1,90	76,69	-0,207	3,23	64,74	-0,179	18,30
0,06	49,03	-0,211	47,63	-0,209	2,87	46,67	-0,211	4,81	44,18	-0,198	9,90
0,04	24,08	-0,210	23,08	-0,211	4,13	22,43	-0,211	6,84	23,55	-0,215	2,20
0,2	218,07	-0,174	217,51	-0,175	0,26	217,04	-0,174	0,47	144,12	-0,176	33,91
0,3	243,32	-0,164	243,41	-0,165	-0,04	243,50	-0,165	-0,07	155,32	-0,259	36,17



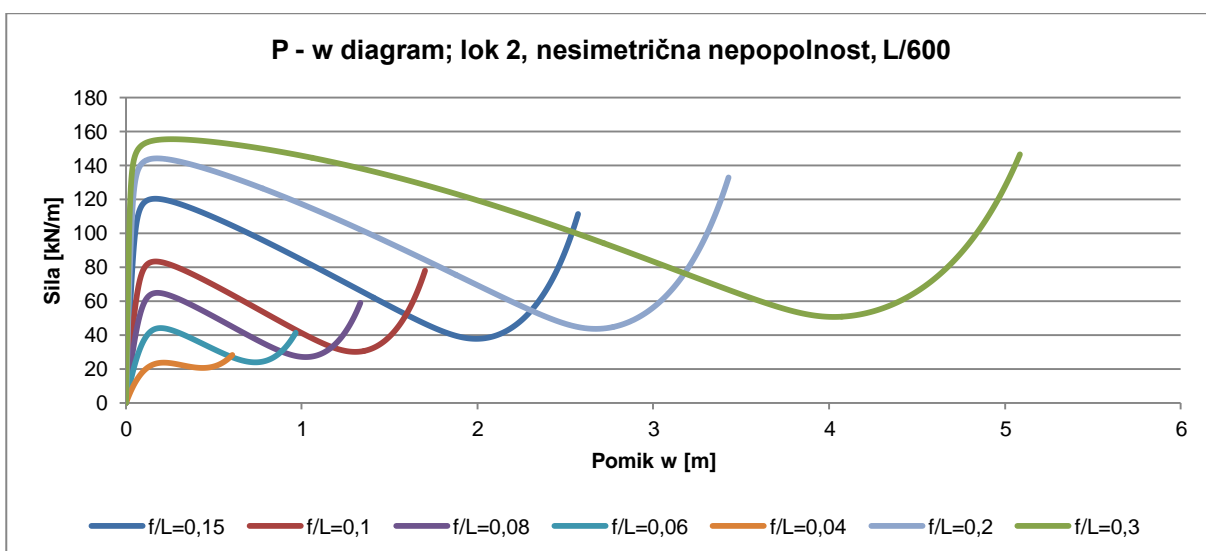
Graf 13: P-w diagram točke na sredini loka 2, popolna konstrukcija



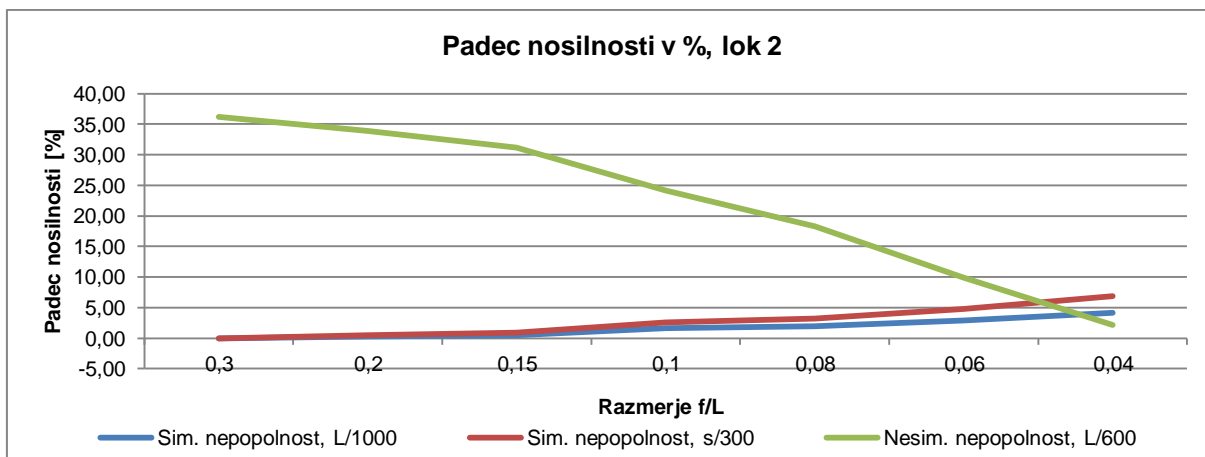
Graf 14: P-w diagram točke na sredini loka 2, simetrična nepopolnost z amplitudo l/1000



Graf 15: P-w diagram točke na sredini loka 2, simetrična nepopolnost z amplitudo s/300



Graf 16: P-w diagram točke na sredini loka 2, nesimetrična nepopolnost z amplitudo L/600



Graf 17: Padec mejne obtežbe zaradi nepopolnosti v odstotkih, lok 2

Razlike v mejni nosilnosti popolnega loka so v primeru togih podpor večje kot v primeru vrtljivih podpor. Maksimalna mejna nosilnost (oblikovni faktor 0,3) je kar 10-krat višja od minimalne mejne nosilnosti (oblikovni faktor 0,04).

Vpliv nepopolnosti je manjši kot pri vrtljivo podprtem loku (lok 1). Simetrična nepopolnost je najbolj neugodna pri plitvem loku ( $f/L=0,04$ ), nesimetrična nepopolnost pa večji padec mejne nosilnosti povzroči pri višjem loku ( $f/L=0,3$ ). Na grafu 17 se vidi, kako je mejna nosilnost odvisna od vnesene nepopolnosti. Simetrična nepopolnost ne vpliva veliko do faktorja  $f/L=0,1$ , od tam naprej pa vpliv narašča. Ravno obratno je pri nesimetrični nepopolnosti. Vidimo, da se največji padec mejne nosilnosti zgodi pri najvišjem oblikovnem faktorju (36 %), nato pa ta odstotek pada in pri najnižjem oblikovnem faktorju znaša le še 2,2 %. Zanimivo je, da ima pri plitvem loku s faktorjem 0,04 največji vpliv simetrična nepopolnost z amplitudo  $s/300$  (zmanjšanje velikosti mejne nosilnosti za nekaj manj kot 7 %), sledi pa ji simetrična nepopolnost z amplitudo  $L/1000$  (padec velikosti mejne nosilnosti za 4%), čeprav je sama velikost nepopolnosti manjša kot pri nesimetrični nepopolnosti.

### 3.2.4 Primerjava rezultatov glede na oblikovni faktor $f/L$

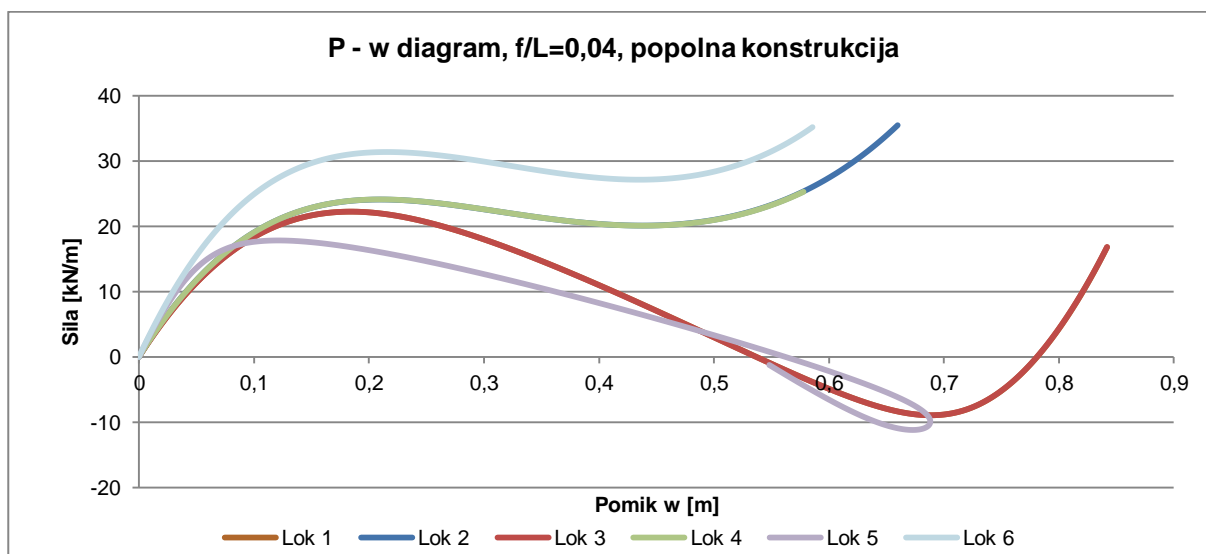
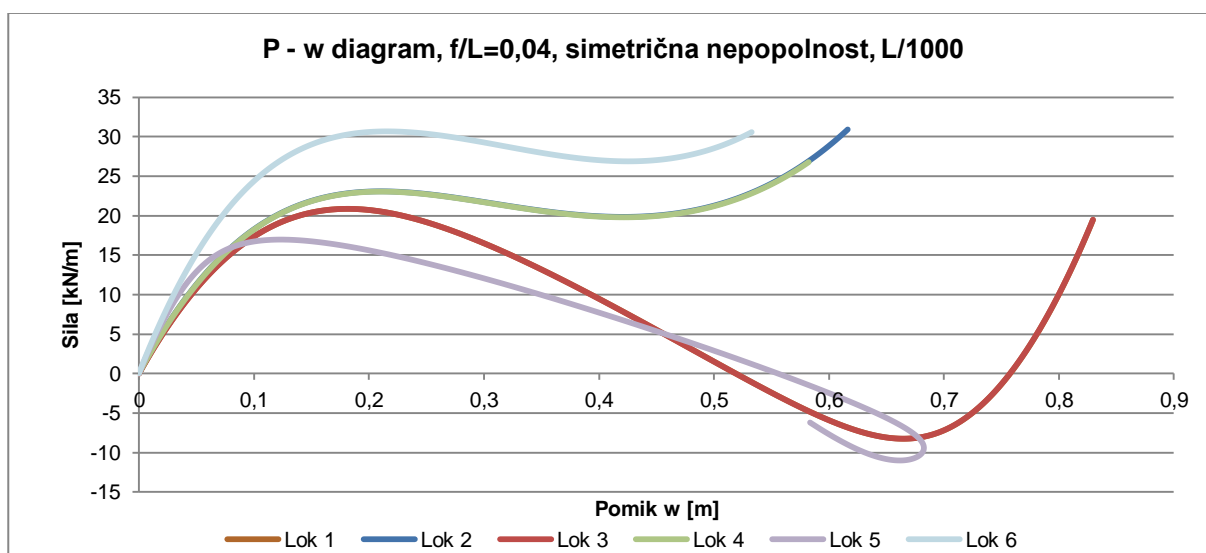
Iz enakega razloga kot pri primerjavi rezultatov glede na posamezen lok sem se tudi pri primerjavi rezultatov glede na oblikovni faktor  $f/L$  omejila na dva primera. Odločila sem se za oba ekstremna primera, tj. lok z najnižjim oblikovnim faktorjem  $f/L=0,04$  in lok z najvišjim oblikovnim faktorjem  $f/L=0,3$ .

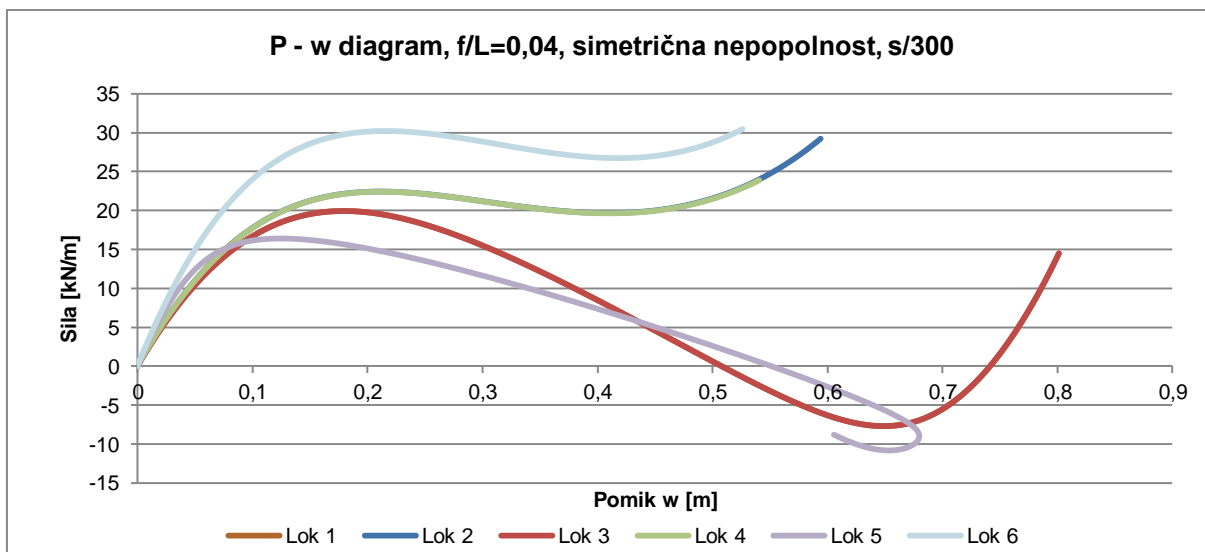
#### 3.2.4.1 Oblikovni faktor $f/L = 0,04$

V preglednici 8 so zbrani rezultati mejne obtežbe in pripadajočega pomika za popolno konstrukcijo ter vse tri oblike nepopolnosti za vseh 6 lokov z oblikovnim faktorjem  $f/L = 0,04$ . Pri vsaki nepopolnosti je izračunano, za koliko odstotkov se zmanjša velikost mejne obtežbe glede na popolno konstrukcijo. V nadaljevanju so narisani P-w diagrami za popolno in nepopolne konstrukcije za točko na sredini loka in komentar rezultatov.

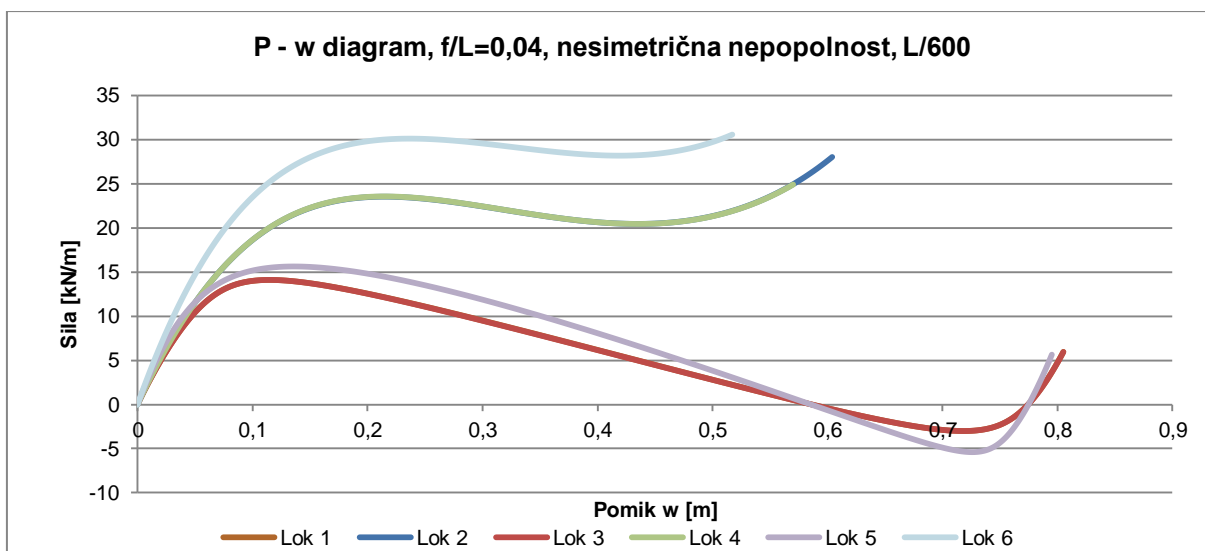
Preglednica 8: Mejne vrednosti popolnih in nepopolnih lokov z oblikovnim faktorjem  $f/L = 0,04$ 

PRIMER	POPOLNA K.		SIM. NEP. L/1000		RAZLIKA V % (P)	SIM. NEP. S/300		RAZLIKA V % (P)	NESIM. NEP. L/600		RAZLIKA V % (P)
	P [kN/m]	w [m]	P [kN/m]	w [m]		P [kN/m]	w [m]		P [kN/m]	w [m]	
Lok 1	22,28	-0,184	20,87	-0,181	6,34	19,93	-0,180	10,55	14,09	-0,114	36,76
Lok 2	24,08	-0,210	23,08	-0,211	4,13	22,43	-0,211	6,84	23,55	-0,215	2,20
Lok 3	22,28	-0,184	20,87	-0,181	6,33	19,93	-0,180	10,55	14,10	-0,114	36,73
Lok 4	24,07	-0,210	23,08	-0,210	4,13	22,43	-0,305	6,83	23,54	-0,215	2,21
Lok 5	17,88	-0,122	16,98	-0,122	5,02	16,39	-0,125	8,33	15,65	-0,135	12,50
Lok 6	31,38	-0,215	30,71	-0,215	2,16	30,24	-0,215	3,65	30,12	-0,237	4,02

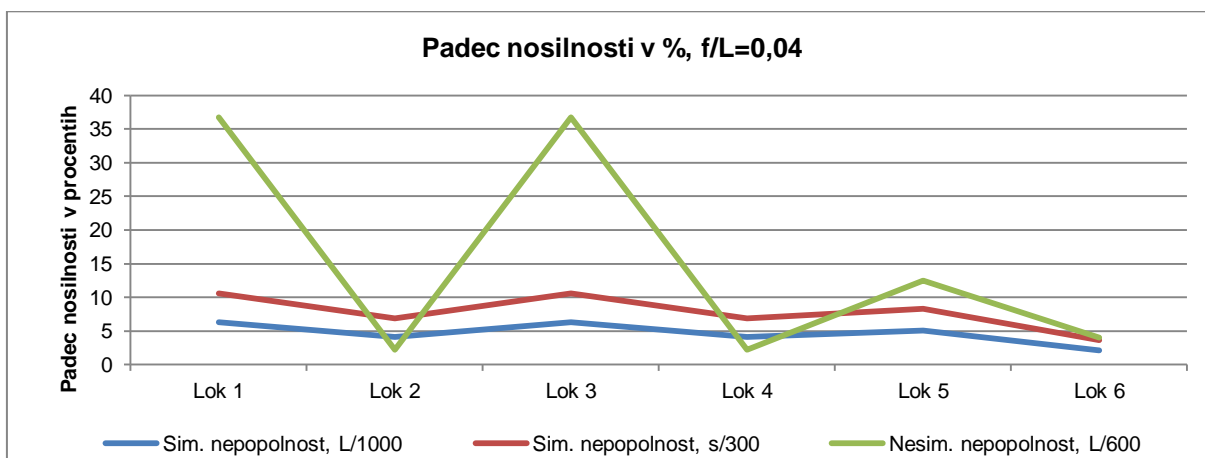
Graf 18: P-w diagram točke na sredini lokov  $f/L = 0,04$ , popolna konstrukcijaGraf 19: P-w diagram točke na sredini lokov  $f/L = 0,04$ , simetrična nepopolnost z amplitudo L/1000



Graf 20: P-w diagram točke na sredini lokov  $f/L = 0,04$ , simetrična nepopolnost z amplitudo  $s/300$



Graf 21: P-w diagram točke na sredini lokov  $f/L = 0,04$ , nesimetrična nepopolnost z amplitudo  $L/600$



Graf 22: Padec mejne nosilnosti zaradi nepopolnosti v odstotkih, lok s faktorjem  $f/L=0,04$

V vseh primerih, pri popolni konstrukciji in konstrukciji z nepopolnostmi, je mejna nosilnost tega podprtega loka višja kot vrtljivo podprtega loka. Največja razlika je pri nesimetrični obtežbi in popolni konstrukciji, kjer mejna nosilnost vrtljivo podprtega loka predstavlja le 57 % mejne nosilnosti tega podprtega loka. Na višino mejne nosilnosti oblika simetrične obtežbe ne vpliva – mejna obtežba je enaka pri togih podporah (razlika na tretji decimalki) ter vrtljivih podporah (razlika na četrti decimalki) ne glede na obliko obtežbe. Vpliva pa kar precej nesimetrična obtežba – pri togo podprtem loku se nam mejna nosilnost poveča (za nekaj manj kot 7 kN/m, kar predstavlja več kot 28 % mejne nosilnosti pri simetrični obtežbi), pri vrtljivo podprtem loku pa pade (za 4,4 kN/m, kar predstavlja kar 20 % mejne nosilnosti pri simetrični obtežbi).

Na nosilnost ima veliko vpliva tudi simetrična nepopolnost. Vpliv na velikost mejne nosilnosti je največji med vsemi oblikovnimi faktorji in znaša pri amplitudi  $s/300$  med 6,8 % in 10,5 %. Izjema je le togo podprta konstrukcija z nesimetrično obtežbo (lok 6), kjer je vpliv nepopolnosti najmanjši in znaša 3,7 %. Nepopolnost bolj vpliva na mejno nosilnost konstrukcije z vrtljivimi podporami kot na konstrukcijo s togimi podporami.

Nesimetrična nepopolnost manj vpliva na zmanjšanje mejne nosilnosti kot pri ostalih oblikovnih faktorjih. Mejna nosilnost se najbolj zmanjša pri loku 1 in 3 (vrtljivo podprta loka s simetrično obtežbo) in sicer za 36,7 %. Zanimivo je, da se najmanj zmanjša mejna nosilnost pri togo podprtem loku s simetrično obtežbo (lok 2 in 4), tj. za 2,2 %, čeprav bi, glede na rezultate pri ostalih oblikovnih faktorjih, pričakovala, da bo najmanjši padec nosilnosti pri nesimetrični obtežbi. Pri nesimetrični obtežbi mejna nosilnost zopet bolj pade pri vrtljivo podprtem loku (za 12,5 %) kot pri togo podprtem loku (za 4 %).

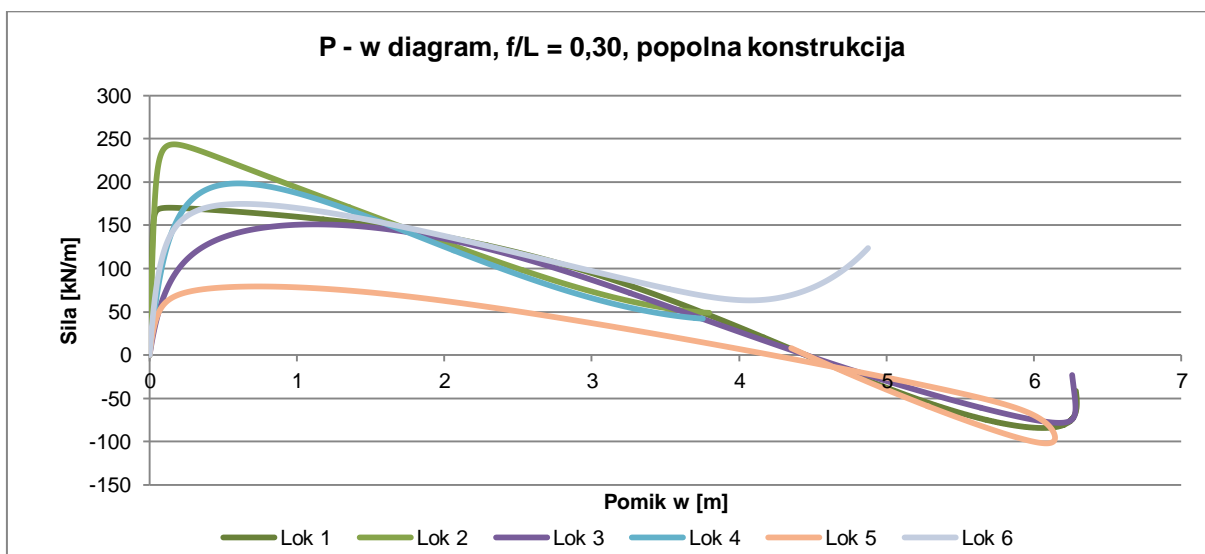
Na grafih se vidi, da imata lok 1 in lok 3 enak odziv. Enako velja tudi lok 2 in 4. V vseh primerih ima najvišjo mejno nosilnost lok 6, tj. togo podprt, nesimetrično obremenjen lok, najnižjo mejno nosilnost pa pri popolni konstrukciji in pri simetrični nepopolnosti lok 5. Pri nesimetrični nepopolnosti imata najnižjo mejno nosilnost lok 1 in lok 3, lok 5 pa ima malenkost višjo mejno nosilnost.

#### **3.2.4.2 Oblikovni faktor $f/L = 0,30$**

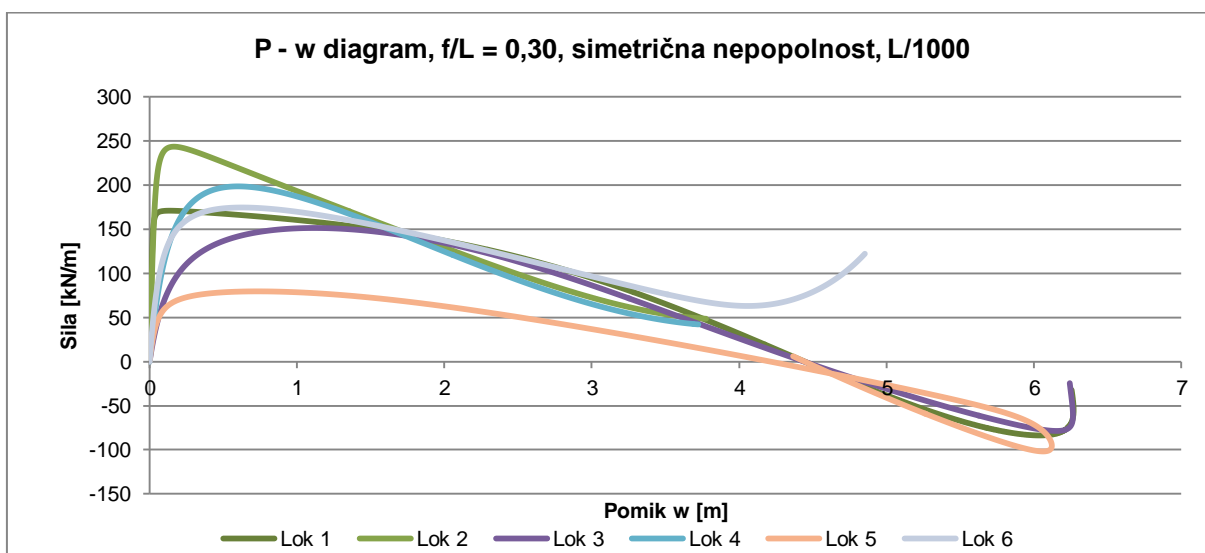
V preglednici 9 so zbrani rezultati mejne obtežbe in pripadajočega pomika za popolno konstrukcijo ter vse tri oblike nepopolnosti za vseh 6 lokov z oblikovnim faktorjem  $f/L=0,30$ . Pri vsaki nepopolnosti je izračunano, za koliko odstotkov se zmanjša kritična obtežba glede na popolno konstrukcijo. V nadaljevanju so narisani P-w diagrami za popolno in nepopolne konstrukcije za točko na sredini loka in komentar rezultatov.

Preglednica 9: Mejne vrednosti popolnih in nepopolnih lokov z oblikovnim faktorjem  $f/L = 0,30$

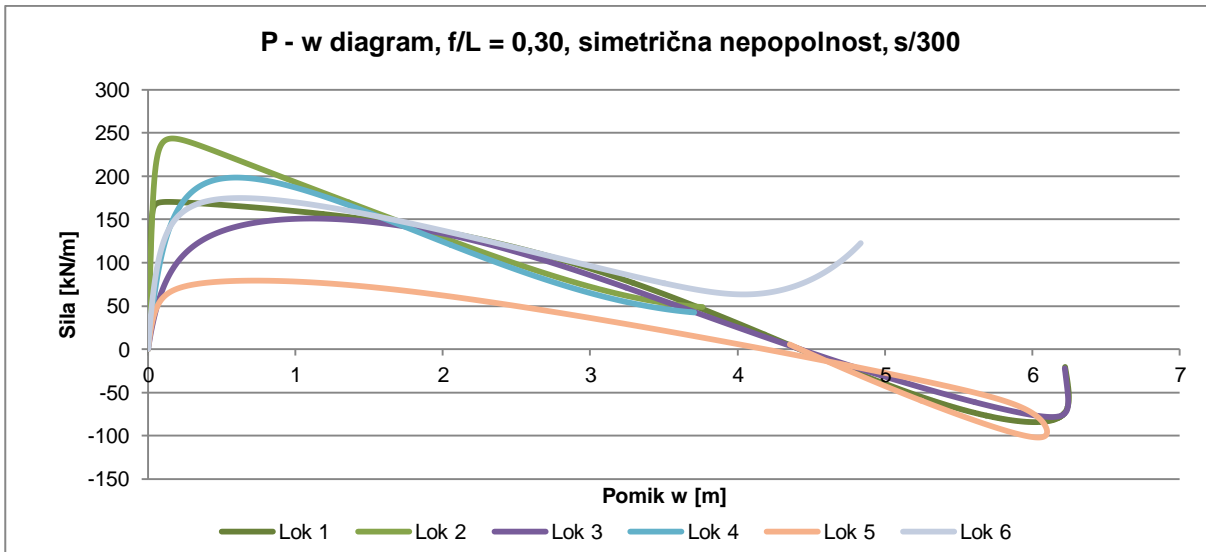
PRIMER	POPOLNA K.		SIM. NEP. L/1000		RAZLIKA V % (P)	SIM. NEP. S/300		RAZLIKA V % (P)	NESIM. NEP. L/600		RAZLIKA V % (P)
	P [kN/m]	w [m]	P [kN/m]	w [m]		P [kN/m]	w [m]		P [kN/m]	w [m]	
Lok 1	170,32	-0,137	170,75	-0,185	-0,25	170,61	-0,134	-0,17	71,13	-0,583	58,23
Lok 2	243,32	-0,164	243,41	-0,165	-0,04	243,50	-0,165	-0,07	155,32	-0,259	36,17
Lok 3	151,20	-1,118	151,12	-1,115	0,05	151,04	-1,113	0,11	71,56	-0,429	52,67
Lok 4	198,54	-0,603	198,39	-0,599	0,08	198,21	-0,598	0,17	162,32	-0,349	18,24
Lok 5	79,03	-0,737	79,08	-0,734	-0,05	79,12	-0,731	-0,10	77,73	-0,764	1,65
Lok 6	174,54	-0,628	174,51	-0,627	0,02	174,46	-0,625	0,05	170,83	-0,664	2,13



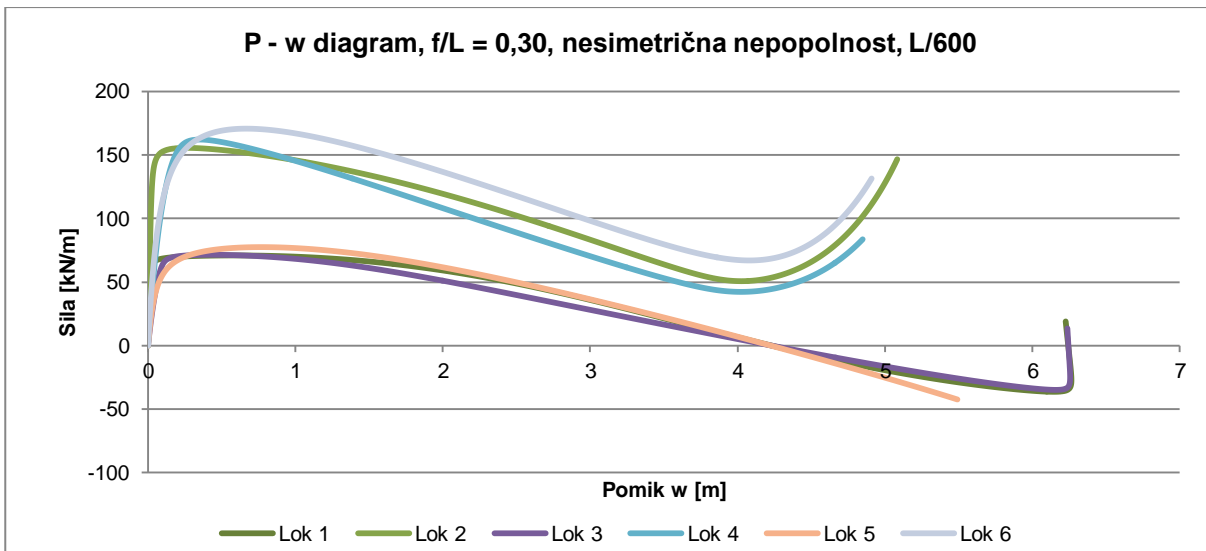
Graf 23: P-w diagram točke na sredini lokov  $f/L = 0,30$ , popolna konstrukcija



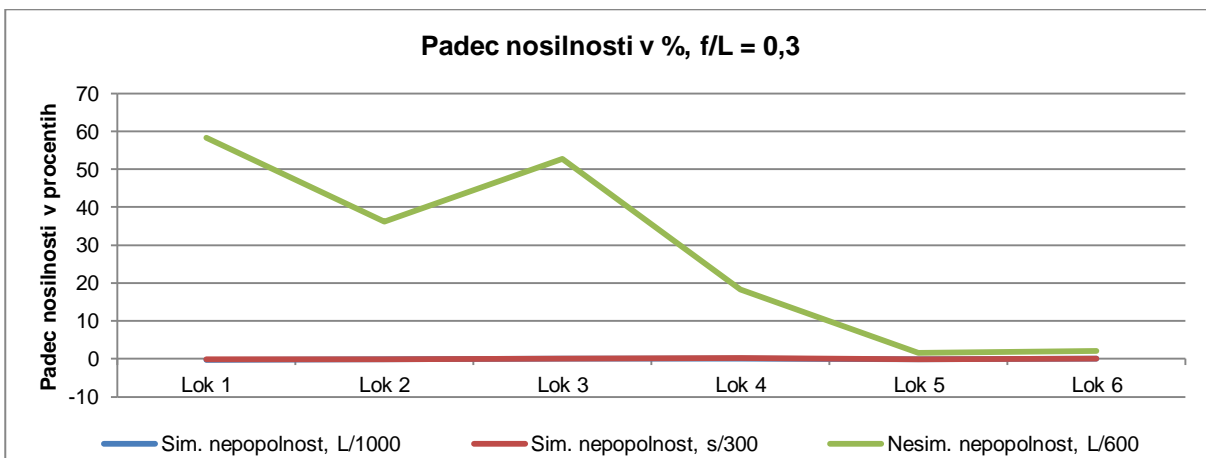
Graf 24: P-w diagram točke na sredini lokov  $f/L = 0,30$ , simetrična nepopolnost z amplitudo  $l/1000$



Graf 25: P-w diagram točke na sredini lokov  $f/L = 0,30$ , simetrična nepopolnost z amplitudo  $s/300$



Graf 26: P-w diagram točke na sredini lokov  $f/L = 0,30$ , nesimetrična nepopolnost z amplitudo  $L/600$



Graf 27: Padec mejne nosilnosti zaradi nepopolnosti v odstotkih, lok s faktorjem  $f/L = 0,30$



Mejna nosilnost togo podprtega loka je v vseh primerih višja kot vrtljivo podprtega loka. Največja razlika je pri popolni konstrukciji z nesimetrično obtežbo, kjer mejna nosilnost vrtljivo podprtega loka predstavlja le 45 % nosilnosti togo podprtega loka. Pri ostalih dveh obtežbah je razlika nekoliko manjša, še vedno pa precej višja kot pri ostalih oblikovnih faktorjih  $f/L$ . Oblika in smer obtežbe precej vplivata na nosilnost popolnega loka in loka s simetrično nepopolnostjo. Najbolj ugodna je obtežba pravokotno na os nosilca (lokalna Z os), najmanj ugodna pa nesimetrična obtežba v navpični smeri (globalna Z os).

Na mejno nosilnost simetrična nepopolnost nima pomembnega vpliva. V določenih primerih se mejna nosilnost pri nepopolni konstrukciji celo poveča, v ostalih primerih pa zmanjša. Vpliv simetrične nepopolnosti na zmanjšanje velikosti mejne nosilnosti je pri amplitudi nepopolnosti  $s/300$  povsod manjši kot 0,17%. Na podlagi tega rezultata lahko sklepam, da pri lokih z višjim oblikovnim faktorjem simetrična nepopolnost ne vpliva na velikost mejne nosilnosti oziroma je njen vpliv zanemarljivo majhen.

Nasprotno pa je vpliv nesimetrične nepopolnosti na mejno nosilnost precej velik. Padec mejne nosilnosti je pri loku z enakomerno obtežbo in vrtljivimi podporami kar 58,2 % (lok 1) oziroma 52,7 % (lok 3). Manjši padec je pri loku s togimi podporami. Tu pade mejna nosilnost pri obtežbi v lokalni Z smeri (lok 2) za 36,2 %, pri obtežbi v globalni Z smeri (lok 4) pa za približno polovico manj (18,2%). Zelo majhen padec nosilnosti je pri nesimetrični obtežbi – okoli 2 %. Na nesimetrično nepopolnost so bolj občutljive konstrukcije z vrtljivimi podporami, le pri nesimetrični obtežbi je odstotek zmanjšanja mejne nosilnosti loka s togimi podporami višji kot pri tistem z vrtljivimi podporami. Na grafu 26 se vidi, da so mejne nosilnosti lokov s togimi podporami zbrane v pasu med 155 kN/m in 170 kN/m, pri vrtljivo podprtem loku pa je razpon mejne nosilnosti celo nekaj manjši – vrednosti so zbrane okoli 71 kN/m (lok 5 je nekoliko višje – pri 77 kN/m).

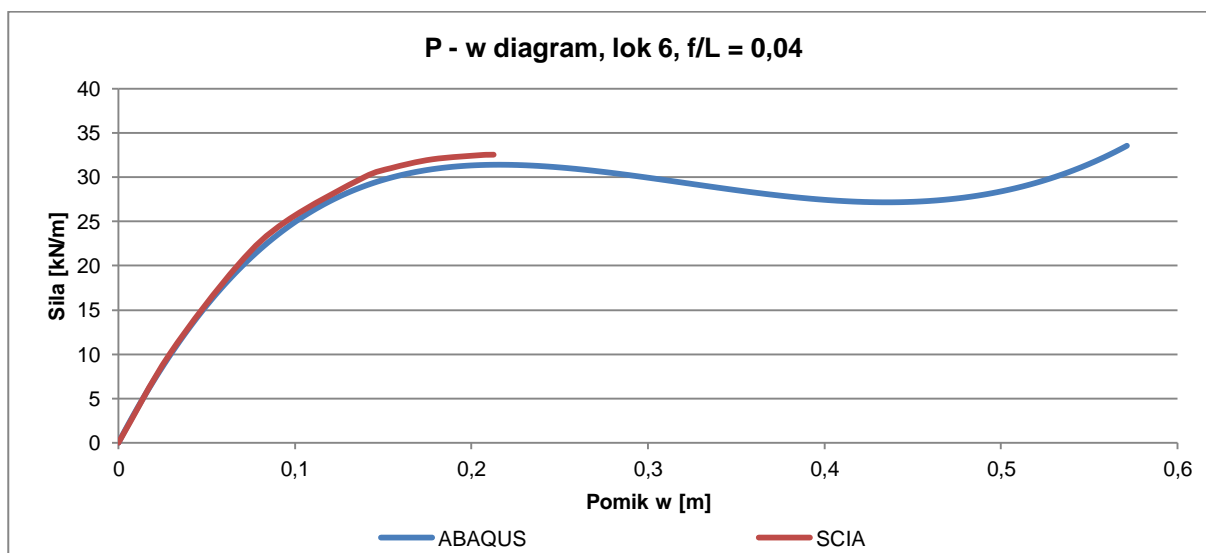
### **3.2.5 Račun lokov v programu SCIA Engineer in primerjava rezultatov z rezultati iz programa Abaqus**

S programom Scia Engineer sem določila linearne in nelinearne lastne vrednosti pri obtežbi 10 kN/m za vseh šest lokov z vsemi oblikovnimi faktorji brez nepopolnosti. S pomočjo modificirane Newton-Raphsonove metode sem določila mejne vrednosti obtežbe pri loku 6 (togo podprt lok z nesimetrično obtežbo v globalni Z smeri) in narisala P-w diagrame točke na sredini loka ter določila osne sile. Rezultate sem primerjala z izračuni v Abaqusu. V preglednici 10 so zbrani rezultati mejne obtežbe in pomikov loka 6 brez nepopolnosti iz programov Abaqus in Scia Engineer. Ker so si P-w diagrami podobni, sem se odločila, da prikažem diagram za lok z najnižjim oblikovnim faktorjem  $f/L=0,04$  in lok z najvišjim oblikovnim faktorjem  $f/L=0,3$ . Za ta dva loka je narejena primerjava osnih sil na dveh nivojih. Prvi nivo je pri maksimalnem pomiku, ki da dobimo pri izračunu s programom Scia Engineer, drugi nivo pa je pri velikosti mejne obtežbe izračunane s programom Abaqus.

Preglednica 10: Lok 6, mejne vrednosti izračunane v Abaqusu in Scii Engineer

Primer	ABAQUS		SCIA ENGINEER		Razlika med mejnima obtežbama [%]
	P [kN/m]	w [m]	P [kN/m]	w [m]	
Lok 6, $f/L = 0,15$	134,0	-0,319	139,95	-0,2825	4,44
Lok 6, $f/L = 0,10$	95,7	-0,245	99,64	-0,2325	4,12
Lok 6, $f/L = 0,08$	76,7	-0,223	79,77	-0,253	4,00
Lok 6, $f/L = 0,06$	55,3	-0,211	57,46	-0,2046	3,91
Lok 6, $f/L = 0,04$	31,4	-0,215	32,52	-0,2124	3,57
Lok 6, $f/L = 0,20$	159,1	-0,407	166,96	-0,36	4,94
Lok 6, $f/L = 0,30$	174,5	-0,628	185,59	-0,4658	6,36

Takoj lahko opazimo, da so vrednosti mejne obtežbe, izračunane v Scii, višje kot tiste iz Abaqusa, pomiki pa so v večini primerov manjši. Razlog je v tem, da v Scii upoštevamo teorijo drugega reda, v Abaqusu pa je izračunano realno nelinearno obnašanje. Tako vidimo, da je realno obnašanje v nelinearnem območju bolj neugodno, kot ga določimo po teoriji drugega reda.

Graf 28: P-w diagram točke na sredini loka 6,  $f/L = 0,04$ , primerjava med Abaqus-om in Scio

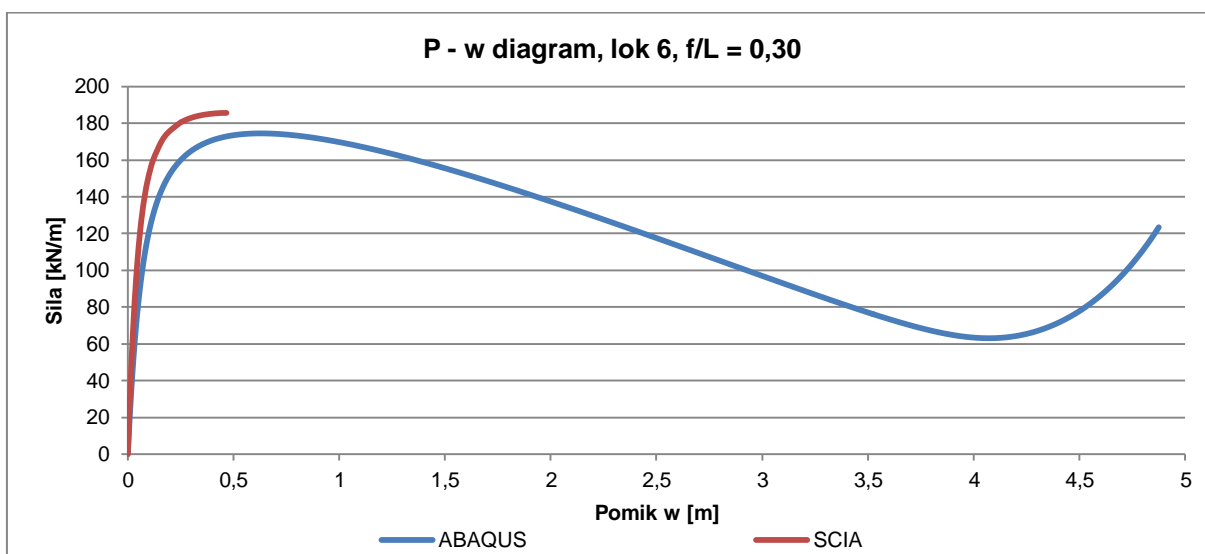
Mejna obtežba pri oblikovnem faktorju 0,04, izračunana v Abaqus-u, znaša 31,4 kN/m, rezultat iz Scie pa nam da za 3,59 % višjo vrednost, tj. 32,52 kN/m. Razlika med računom po teoriji drugega reda in nelinearni analizi po metodi dolžine lokov se začne pri 17 kN/m – do te vrednosti sta oba grafa še skupaj in ju ne moremo dobro ločiti, nato pa se začneta odmikati in lahko opazimo razliko med njima.

V preglednici 11 je primerjava osnih sil določenih v Abaqusu in Scii Engineer. V prvi vrstici je primerjava osnih sil pri maksimalnem pomiku določenem v Scii Engineer. Pomik znaša 0,2124 mm. V drugi vrstici je primerjava osnih sil pri mejni obtežbi določeni v Abaqusu, tj. pri obtežbi 31,4 kN/m.

Preglednica 11: Primerjava osnih sil pri loku 6,  $f/L=0,04$

	Scia	Abaqus
<b>Oсна sila pri pomiku 212,4 mm</b>	873,6 kN	837,3 kN
<b>Oсна sila pri obtežbi 31,4 kN/m</b>	783,3 kN	841,6 kN

Oсни sili se pri enakem povesu točke na sredini loka razlikujeta. Njuna razlika znaša 35 kN, višja je osna sila, določena v Scii. Razlog je v višjem nivoju obtežbe, ki se na loku nahaja. Pri enakem nivoju obtežbe vidimo, da je osna sila določena v Abaqusu višja, kot tista iz Scie. To je tudi razlog, da je mejna obtežba določena v Abaqusu nižja od tiste v Scii in da se preskok sistema določen po metodi dolžine lokov zgodi prej kot po teoriji drugega reda.



Graf 29: P-w diagram točke na sredini loka 6,  $f/L=0,30$ , primerjava med ABAQUS-om in SCIO

Mejna obtežba pri oblikovnem faktorju 0,30, izračunana v Abaqus-u, znaša 174,5 kN/m, rezultat iz Scie nam da za 6,36 % višjo vrednost, tj. 185,59 kN/m. Razlika med računom po teoriji drugega reda in nelinearni analizi po metodi dolžine lokov se začne pri 80 kN/m. Do te vrednosti sta oba grafa še pokrita, nato pa se počasi začneta odmikati.

V preglednici 12 je primerjava osnih sil določenih v Abaqusu in Scii Engineer. V prvi vrstici je primerjava osnih sil pri maksimalnem pomiku določenem v Scii Engineer. Pomik znaša 0,4658 mm. V drugi vrstici je primerjava osnih sil pri mejni obtežbi določeni v Abaqusu, tj. pri obtežbi 174,5 kN/m.

Preglednica 12: Primerjava osnih sil pri loku 6,  $f/L=0,3$

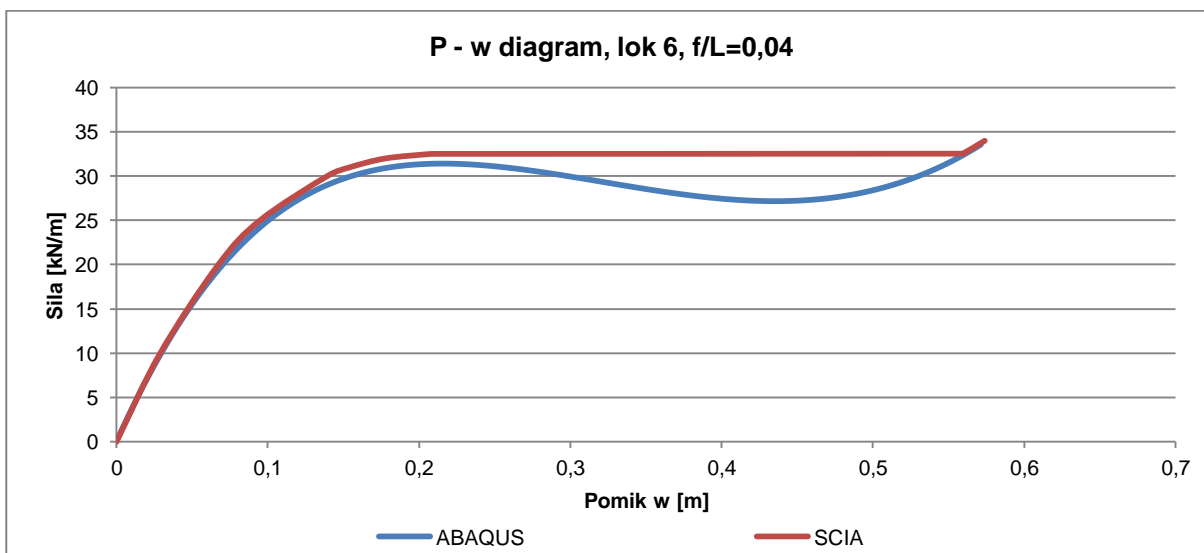
	Scia	Abaqus
<b>Oсна sila pri pomiku 465,8 mm</b>	849,77 kN	786,6 kN
<b>Oсна sila pri obtežbi 174,5 kN/m</b>	783,3 kN	809,7 kN

Pri enakem pomiku je osna sila v Scii višja kot tista iz Abaqusa. Razlog je v višji obtežbi, ki se v tistem trenutku nahaja na loku. Pri enaki obtežbi, tj. pri mejni obtežbi določeni v Abaqusu, pa je višja osna sila v Abaqusu. Posledica tega je, enako kot pri loku z oblikovnim

faktorjem  $f/L=0,04$ , da se preskok sistema zgodi pri nižji mejni obtežbi kot pri izračunu v Scii Engineer.

Pri opazovanju rezultatov vidimo, da je med mejno nosilnostjo, izračunano po teoriji drugega reda in po metodi dolžin loka, višja razlika pri loku z višjim oblikovnim faktorjem. Pri oblikovnem faktorju  $f/L=0,04$  je nosilnost, izračunana s programom Scia, večja od tiste iz Abaqusa za 3,57 %, pri loku z oblikovnim faktorjem 0,3 pa je ta razlika 6,36 %.

V vseh primerih sem uspela narisati P-w diagram točke na sredini loka do mejne nosilnosti, nato pa se zgodi preskok sistema. Zanimivo je videti, kakšen je P-w diagram, ki ga določim na podlagi rezultatov iz Sciee Engineer, če obremenjujem tudi po doseženi mejni obtežbi. Pri naslednjem povečanju pri računu po modificirani Newton-Raphsonovi metodi dobim pomik, ki pa je kar velik. Na grafu 30 je razlaga, zakaj je pomik tako velik – ker se zgodi preskok sistema in linija, ki označuje pomik točke, skoči na pomik nekaj čez 0,5 m in ujame linijo, ki opisuje obnašanje točke na sredini loka, določeno v Abaqusu.



Graf 30: P-w diagram točke na sredini loka 6,  $f/L=0,04$ , preskok sistema v programu SCIA Engineer

Pri loku z oblikovnim faktorjem 0,04 je dolžina preskoka relativno majhna (0,35 m), ker je tudi padec sile v Abaqusu majhen. Pri loku z višjim oblikovnim faktorjem npr. 0,3, pa je ta padec večji, zato bi bila tudi dolžina preskoka večja. Dolžina preskoka v realnosti pomeni, kakšen bi bil nenaden pomik pri dosegu mejne obtežbe.

Težava pri računu po teoriji drugega reda po modificirani Newton-Raphsonovi metode je lahko, da damo na konstrukcijo že na začetku preveliko obtežbo. Program nam bo analizo uspešno izvedel in če nismo dovolj pozorni na velikost pomikov, ki jih dobimo, smo lahko na diagramu že nad mejno obtežbo za preskok sistema. To pa je lahko pri realnih konstrukcijah zelo nevarno.

### 3.2.6 Lastne vrednosti lokov

Linearne lastne vrednosti predstavljajo mejno nosilnost pri elastičen materialu in linearnem izračunu. Določila sem jih v programih Abaqus in SCIA Engineer. Vse rezultate sem zbrala v preglednici 13, poleg linearnih lastnih vrednosti pa sem v preglednico zapisala še nelinearno lastno vrednost pri obtežbi 10 kN/m, izračunano s programom SCIA Engineer ter mejne vrednosti obtežbe popolne in nepopolne (nesimetrična nepopolnost L/600 in simetrična nepopolnost s/300) konstrukcije, izračunane s programom Abaqus.

Preglednica 13: Lastne vrednosti in mejne obtežbe lokov izračunane s programom Abaqus in Scia

	f/L	Linearne l. v.		Nelinearne l.v.	Mejna obtežba - Abaqus		
		ABAQUS	SCIA	SCIA	Popolna k.	Sim. nep.	Nesim. nep
LOK 1	0,15	65,6	70,1	69,1	139,5	138,3	59,0
	0,10	49,9	52,4	50,7	97,5	95,8	42,4
	0,08	41,6	43,5	41,4	75,6	73,7	33,8
	0,06	32,5	33,6	30,8	50,6	48,4	24,4
	0,04	22,7	23,6	18,8	22,3	19,9	14,1
	0,20	73,7	80,6	79,8	163,9	163,3	68,6
	0,30	71,7	81,8	81,6	170,3	170,6	71,1
LOK 2	0,15	139,5	147,2	141,7	174,7	173,0	120,2
	0,10	106,6	110,8	99,6	110,0	107,1	83,4
	0,08	90,3	93,5	78,1	79,2	76,7	64,7
	0,06	73,2	75,6	50,9	49,0	46,7	44,2
	0,04	57,0	58,7	25,4	24,1	22,4	23,5
	0,20	159,4	171,3	/	218,1	217,0	144,1
	0,30	164,1	183,5	/	243,3	243,5	155,3
LOK 3	0,15	67,4	69,7	68,7	129,1	127,9	60,0
	0,10	50,6	52,3	50,6	94,2	92,6	42,7
	0,08	42,0	43,4	41,3	74,4	72,5	34,0
	0,06	32,7	33,8	30,6	50,3	48,2	24,4
	0,04	22,8	23,6	18,8	22,3	19,9	14,1
	0,20	76,6	79,3	78,6	147,3	146,5	70,2
	0,30	74,0	77,0	76,4	151,2	151,0	71,6
LOK 4	0,15	145,2	148,8	141,2	164,9	163,2	122,6
	0,10	108,7	111,4	99,8	108,0	105,5	83,9
	0,08	91,5	93,9	76,1	78,8	76,2	464,9
	0,06	73,8	75,7	50,3	49,0	46,6	44,2
	0,04	57,2	58,8	25,4	24,1	22,4	23,5
	0,20	169,6	173,9	167,1	194,6	193,5	148,1
	0,30	181,1	185,7	178,5	198,5	198,2	162,3
LOK 5	0,15	89,8	93,1	/	63,8	63,3	61,4
	0,10	67,5	69,8	49,6	46,6	45,9	44,0
	0,08	56,0	57,9	39,6	38,0	37,2	35,4

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 13

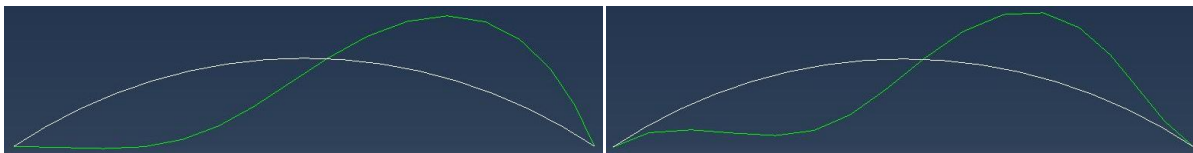
	<b>0,06</b>	43,6	45,0	29,6	28,5	27,0	25,9
	<b>0,04</b>	30,4	31,4	19,6	17,9	16,3	15,6
	<b>0,20</b>	102,0	106,1	/	74,6	74,3	72,3
	<b>0,30</b>	98,5	103,9	/	79,0	79,1	77,7
<b>LOK 6</b>	<b>0,15</b>	193,6	197,7	/	134,0	132,9	129,0
	<b>0,10</b>	144,9	148,2	98,4	95,7	94,2	90,7
	<b>0,08</b>	122,1	125,0	78,9	76,7	75,0	72,0
	<b>0,06</b>	98,4	100,9	56,5	55,3	53,8	51,4
	<b>0,04</b>	76,3	78,3	33,6	31,4	30,2	30,1
	<b>0,20</b>	226,0	230,5	/	159,1	158,4	154,4
	<b>0,30</b>	241,2	245,6	/	174,5	174,5	170,8

Linearne lastne vrednosti, ki sem jih izračunala v Abaqusu, so v vseh primerih nižje od tistih, ki sem jih izračunala s programom Scia Engineer. Razlika znaša med 0,9 (lok 1,  $f/L=0,04$ ) in 19,4 (lok 2,  $f/L=0,2$ ). Opazila sem tudi, da je lastna vrednost lokov z oblikovnim faktorjem 0,3 pri vrtljivih podporah nižja kot pri faktorju 0,2, čeprav bi pričakovala, da je vrednost višja. Razlog je verjetno v sami geometriji – lok je že previsok in višina deluje neugodno na nosilnost.

Nelinearna lastna vrednost pri obtežbi 10 kN/m je v vseh primerih nižja kot linearna lastna vrednost. To je pričakovano, saj imamo sedaj konstrukcijo obremenjeno in imamo že neko majhno deformacijo, torej je tudi sam lok nekoliko drugačne oblike – deformiran zaradi sile. Vidimo lahko, da se pri loku z nižjim oblikovnim faktorjem lastna vrednost bolj zmanjša glede na linearno vrednost kot pri višjih faktorjih. Razlog je v tem, da predstavlja obtežba 10 kN/m pri plitvih lokih že kar precejšen odstotek kritične sile – okoli 50 % ( $f/L = 0,04$ ), zato je tudi deformacija loka pod tako obtežbo večja. Pri višjih lokih taka obtežba predstavlja okoli 5 % kritične obtežbe (izjema je lok 5, tam predstavlja 12,5 %), zato je deformacija loka nižja, manjše je tudi zmanjšanje lastne vrednosti. Program mi pri nekaterih višjih lokih ni mogel določiti nelinearne lastne vrednosti – ne najde rešitve.

Ko primerjam mejne obtežbe popolnega loka in loka s simetrično nepopolnostjo vidim, da je pri simetrični obtežbi, pri skoraj vseh oblikovnih faktorjih (izjema je 0,04 ter v nekaterih primerih 0,06 in 0,08) višja kot linearna lastna vrednost. To si razlagam tako, da sta oblika obtežbe in geometrija taka, da preneseta v določenih pogojih obtežbo, ki je sicer višja od linearne lastne vrednosti. Seveda pa ni nujno, da bi se tako obnašala konstrukcija tudi v realnem stanju, saj že manjša nelinearna nepopolnost lahko povzroči drastičen padec mejne nosilnosti. V preglednici so podani rezultati za amplitudo nesimetrične nepopolnosti  $L/600$  in tam lahko vidimo, kakšen padec mejne nosilnosti se nam zgodi. V vseh primerih pade vrednost pod linearno lastno vrednost in tudi pod nelinearno lastno vrednost loka. Pri loku 5 in 6 pa je tudi pri popolni konstrukciji vrednost mejne obtežbe pod vrednostjo linearne lastne vrednosti, je pa zelo blizu nelinearni lastni vrednosti. Razlog, da je mejna nosilnost manjša, je v obliki obtežbe. Ta je nesimetrična in se že takoj deformira v smeri nesimetrične nepopolnosti, ki pa je enaka kot oblika prve lastne vrednosti (slika 26) in zato mejna obtežba

ne more biti višja kot je linearna lastna vrednost konstrukcije. Mejna obtežba popolne konstrukcije pri lokih 5 in 6 je podobna nelinearni lastni vrednosti. Če bi lok obremenila z višjo obtežbo kot 10 kN/m bi se nam tudi nelinearna lastna vrednost manjšala – približevala bi se mejni obtežbi.



Slika 26: Oblika prve lastne vrednosti: na sliki levo je vrtljivo podprt lok, na sliki desno pa togo podprt lok

Oblika prve lastne vrednosti je enaka obliki nesimetrične nepopolnosti. To je tudi razlog, zakaj mejna nosilnost pri loku z nesimetrično nepopolnostjo tako močno pade.

Na sliki 26 se vidi, da je prva lastna oblika pri vrtljivo podprtem loku in togo podprtem loku malenkost drugačna. Pri vrtljivo podprtem loku se element zavrti že ob podpori in dobimo bolj gladko obliko kot pri togo podprtem loku. Tam se element ob podpori zelo malo deformira, večina deformacije in zasuka se zgodi, ko se vpliv togosti podpore na elementu zmanjša.

### 3.2.7 Kontrola preskoka sistema po EN 1993-2

V dodatku D, 2. dela evrokoda 3 (Projektiranje jeklenih konstrukcij – Jekleni mostovi) je podan kriterij, po katerem lahko kontroliramo preskok sistema.

Preskok sistema sklepamo, da je preprečen, če smo zadovoljili naslednjemu kriteriju:

$$l \sqrt{\frac{EA}{12EI_y}} > K \quad (1)$$

kjer je:

$l$  - razpon loka

$I_y$  - vztrajnostni moment prereza

$A$  - ploščina prereza

$K$  – faktor, podan v standardu v tabeli D.5

Vrednost na levi strani enačbe je pri vseh lokih enaka in znaša 43,9. Faktor  $K$  je odvisen od oblikovnega faktorja  $f/L$  in podpiranja loka – togo ali vrtljivo podprto. V evrokodu je narejena tabela za vrednosti 0,05, 0,075, 0,10, 0,15 in 0,20. Za ostale oblikovne faktorje sem vrednost faktorja  $K$  določila z interpolacijo.

Preglednica 14: Potrebna vrednost faktorja  $K$

Vrsta podpiranja	Oblikovni faktor $f/L$					
	0,2	0,15	0,1	0,08	0,06	0,04
<b>Vrtljive podpore</b>	8	10	17	21,8	30,4	40
<b>Toge podpore</b>	6	13	42	<b>86</b>	<b>230</b>	<b>410</b>

Vrednost za oblikovni faktor  $f/L=0,04$  ni točno določena, saj je zadnji podatek v evrokodu za vrednost 0,05. Vrednost za 0,04 sem določila tako, da sem trend naraščanja faktorja  $K$  iz predhodnega intervala podaljšala še na interval od 0,05 do 0,04 (ekstapolacija).

Iz preglednice 14 vidimo, da imamo težavo s preskokom sistema pri togo podprem loku z oblikovnim faktorjem manjšim od 0,08. Pri ostalih primerih je kriteriju zadoščeno.

Zanimalo me je, kakšen prerez potrebujem pri oblikovnem faktorju  $f/L= ,08$  (in 0,06) pri enakem razponu loka  $L=10$  m, da bo kriteriju za preskok sistema zadoščeno.

Iz enačbe (1) sem določila prvi približek za maksimalen dovoljen  $h$ , da bo kriterij izpolnjen. Pri oblikovnem faktorju 0,08 ta znaša 11,63 cm (predpostavila sem kvadraten prerez), pri oblikovnem faktorju 0,06 pa 4,3 cm. Za lok s faktorjem 0,08 sem nato izbrala profil IPE100 in ko sem ga ponovno preverila, še vedno nisem zadostila kriteriju, je pa kriteriju zadostil profil IPE80. Za oblikovni faktor 0,06 nisem določila maksimalnega  $I$  profila, saj v katalogu gradbenih  $I$  profilov ni nobenega s tako majhno višino.

Določila sem še, kakšen je potreben razpon  $L$  pri profilu IPE160, da bo izpolnjen kriterij za preskok sistema.

Minimalen potreben razpon sem določila iz enačbe (1). Za lok z oblikovnim faktorjem 0,08 ta znaša 1960 cm, tj. 19,6 m, za lok z oblikovnim faktorjem 0,06 pa 52,4 m.

Glede na potrebne razpone oziroma maksimalne dovoljene profile sklepam, da kriteriju za preskok sistema pri togo podprtem loku z oblikovnim faktorjem nižjim od 0,08 težko zadostimo.

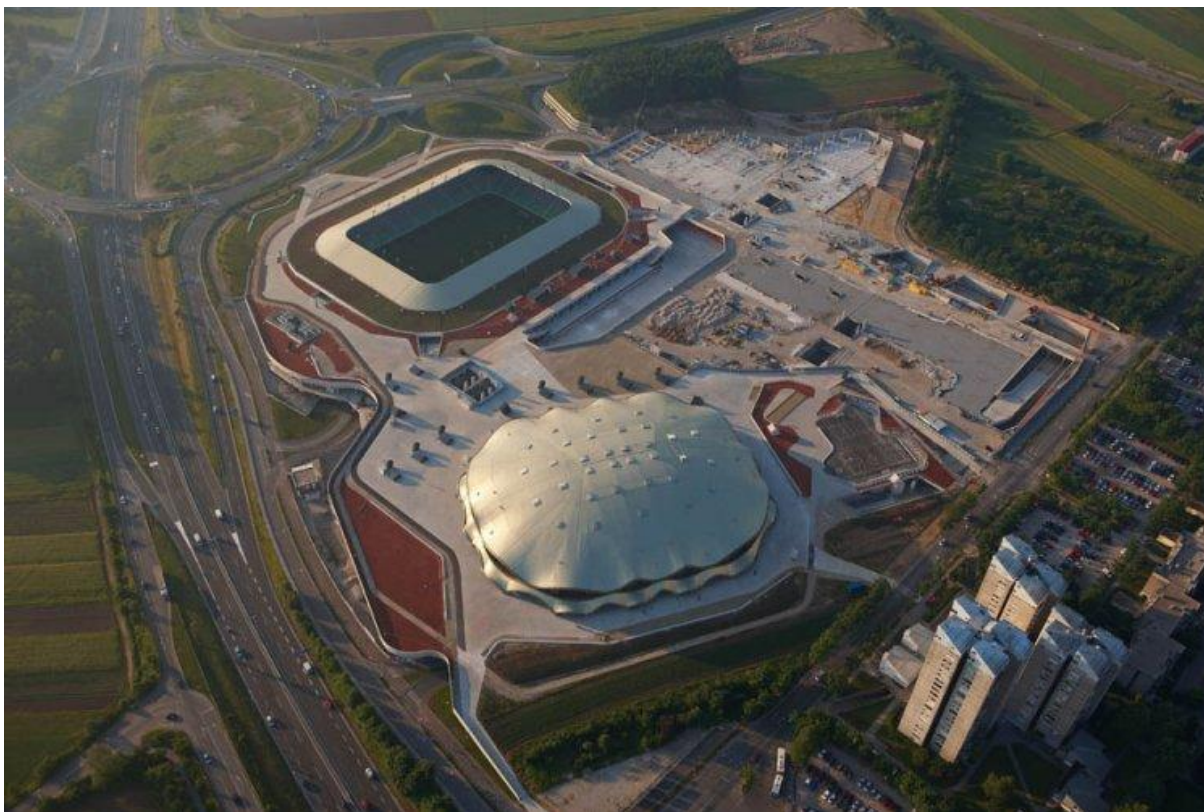


## 4 JEKLENA STREHA ŠPORTNE DVORANE V STOŽICAH

### 4.1 Uvod

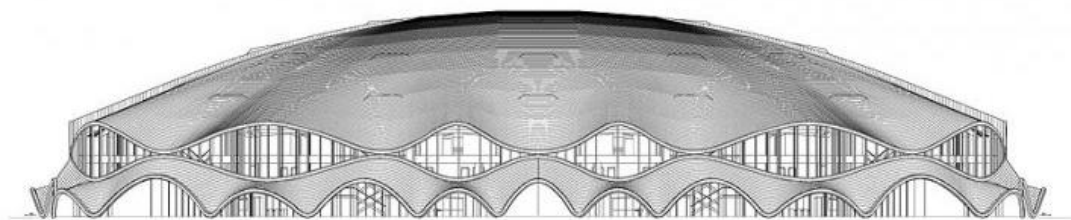
Športni park Stožice združuje nogometni stadion, športno dvorano, v gradnji pa je še nakupovalno središče in urejanje parka ter ostalih zunanjih športnih igrišč. Park se razprostira na 182.600 m<sup>2</sup> površine, od tega jih stadion zavzema 24.614 m<sup>2</sup>, športna dvorana 14.164 m<sup>2</sup> in park 143.973 m<sup>2</sup>. Nogometni stadion lahko sprejme več kot 16000 navijačev, športno dvorano pa lahko obišče več kot 12000 navijačev. Poleg športnih dogodkov se v dvorani in na stadionu odvijajo tudi različni kulturni dogodki.

Investitor projekta je Grep, d.o.o. skupaj z Mestno občino Ljubljana, arhitekturo je določil arhitekturni biro SADAR+VUGA, projektno dokumentacijo za streho športne dvorane so naredili v podjetju GRADIS, Biro za projektiranje Maribor, d.o.o. Podatki o konstrukciji so vzeti iz Načrta gradbenih konstrukcij, PZI, podjetja GRADIS BP Maribor ter iz članka avtorja Završki, M. z naslovom Projekt gradbene konstrukcije športne dvorane Stožice.



Slika 27: Športni park Stožice

Športna dvorana se nahaja v severozahodnem delu športnega parka. Tlorisne dimenzije objekta so 127 m x 161 m. Osrednji del objekta je igrišče s tribunami. V kletnem delu se nahaja ogrevalna dvorana, preostali kletni del je namenjen parkirnim prostorom. Večina dvorane in ostalih prostorov je v podzemnem delu, tako da vidimo na površju le del fasade in pa streho športne dvorane.



Slika 28: Nadzemni del športne dvorane

Jeklena streha je dimenzij 100 m x 120 m x 15 m in je zasnovana kot jeklena kupola iz mreže votlih pravokotnih profilov in votlih okroglih diagonal. Spoji so polnomomentni, priključki diagonal na loke in obroče pa so členkasti. Glavna jeklena konstrukcija je izvedena v jeklu kakovosti S355J2. Podpore so modelirane kot vrtljive podpore.

V času montaže je konstrukcija prehajala iz enega statičnega sistema v drugega do končne oblike. Med gradnjo je bilo potrebno podpiranje z začasnimi podporami. Začasne podpore so v višino merile od 30,75 m do 32,3 m. Ko je bila celotna streha zmontirana, so sečasne podpore postopno sprostile s pomočjo peščenih loncev.



Slika 29: Gradnja strehe športne dvorane, v notranjosti se vidijočasne podpore jeklene strehe

## 4.2 Geometrijski podatki, obtežba in nepopolnosti

### 4.2.1 Geometrijske karakteristike

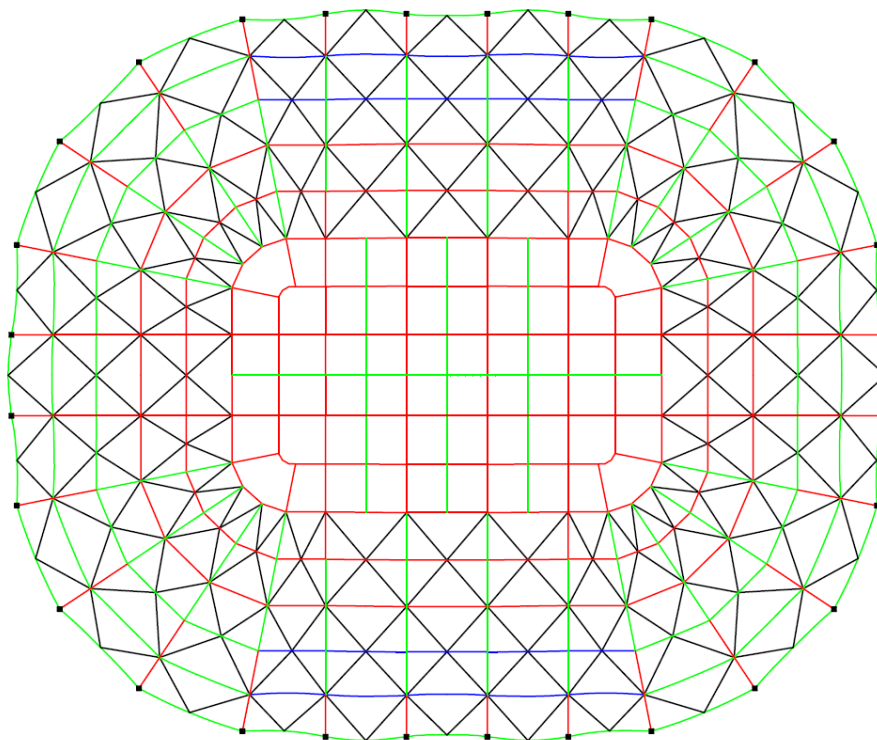
Jeklena streha dvorane je sestavljena iz štirih vrst profilov:

- RHS 500/300/16,
- RHS 500/300/12,5,
- RHS 500/300/8,
- CHS 323,9/6,3.

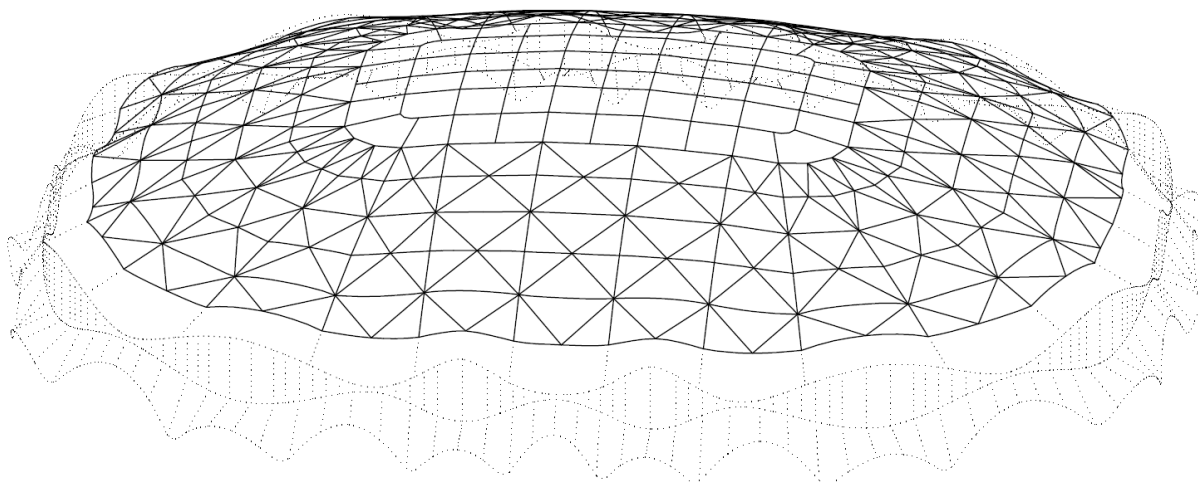
Votli pravokotni profili sestavljajo loke, obroče in temenske nosilce, okrogla cev pa je sestavni del diagonal. Na sliki 30 je v tlorisu pokazano, kako so profili porazdeljeni po strehi.

Streha ima na daljši strani razpon 117,3 m, na krajši strani pa 97,3 m. Višina strehe je 15 m – merjeno od podpor do najvišje točke na pokrovu – temenu. V diplomski nalogi sem jo

razdelila na 9 obročev ter temenski nosilec. V projektni dokumentaciji je streha razdeljena nekoliko drugače, ker je razdelitev narejena skupaj s fasadnim obročem in fasadnimi nosilci, ki se nahajajo naprej od podpor strehe. Ker so na podpore pritrjeni s posebnimi nosilci (na sliki 31 označeno s pikčasto šrafuro) na obnašanje strehe nimajo vpliva. Obroči si po vrsti sledijo tako, da je obroč 1 zunanji obroč, nato pa po vrsti do obroča 9, in temenskega nosilca na sredini strehe.



Slika 30: Položaj uporabljenih profilov - rdeča RHS 500/300/16, zelena RHS 500/300/12,5, modra RHS 500/300/8, črna CHS323,9/6,3 (diagonale)



Slika 31: 3D pogled na streho skupaj s fasadnim obročem

## 4.2.2 Obtežba strehe

Pri določitvi obtežbe na strehi sem izhajala iz Načrta gradbenih konstrukcij, PZI, ki ga je naredilo podjetje GRADIS BP Maribor. Lastna teža je enaka kot v projektni dokumentaciji, nekoliko je spremenjena obtežba s snegom. Obtežbe vetra in temperature nisem upoštevala, saj se v projektu vidi, da ne predstavljata kritične kombinacije za stabilnostno analizo. Koristna obtežba ima v kombinaciji s snegom obtežni faktor 0 in ni pomembna. Ker pa je tudi za moj račun potrebno poznati vso obtežbo, jo bom v nadaljevanju prikazala.

### 4.2.2.1 Lastna teža

Lastna teža je sestavljena iz lastne teže profilov, teže kritine in teže opreme.

#### 4.2.2.1.1 Lastna teža profilov

Lastno težo profilov sem določila s pomočjo prostorninske teže jekla, ki znaša  $78 \text{ kN/m}^3$ . Obtežbo sem enakomerno nanese na vsak RHS profil. Ker so diagonale modelirane kot palični elementi, ne prenesejo linijske obtežbe, zato sem težo diagonal prenesla v vozlišča.

#### 4.2.2.1.2 Teža kritine

Teža kritine je enakomerno porazdeljena po celotni strehi. Obtežbo sem nanese na obroč in na temenski nosilec, pred tem sem jo razdelila na vsak obroč posebej po trapeznem pravilu, saj program Abaqus ne preračuna ploskovne obtežbe na linijske elemente. Plasti in njihova teža, ki so upoštevani pri izračunu, so prikazani v preglednici 15.

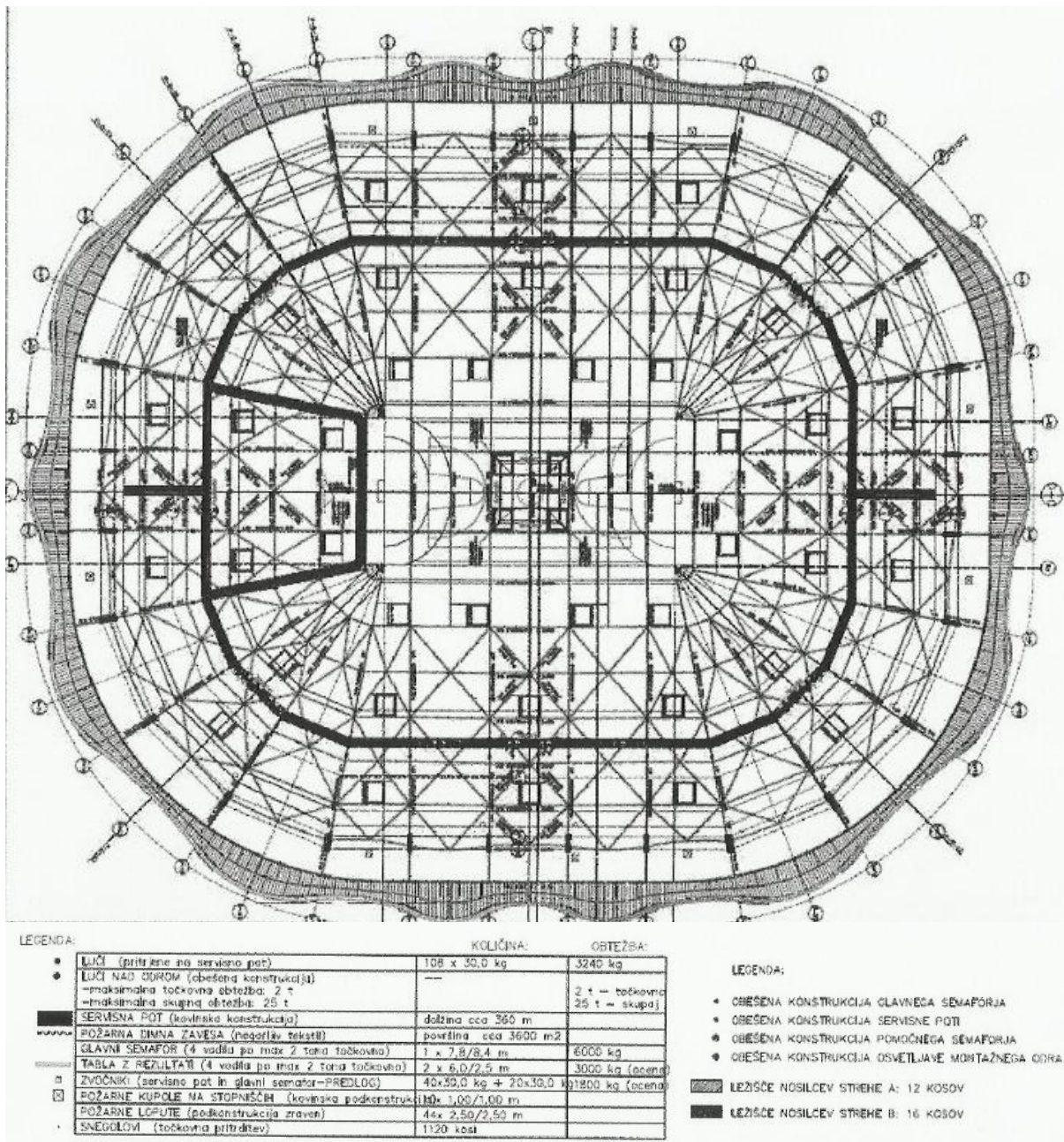
Preglednica 15: Teža kritine

Sloj podkonstrukcije	Debelina	Obtežba
Bitumenska skodlja (tegola)	2x0,5 cm	0,15 $\text{kN/m}^2$
Bitumenska lepenka	2x4 mm	0,08 $\text{kN/m}^2$
Toplotna izolacija z bit. prevleko	6 cm	0,12 $\text{kN/m}^2$
Toplotna izolacija	10 cm	0,1 $\text{kN/m}^2$
Trapezna pločevina	205 mm	0,235 $\text{kN/m}^2$
		<b>0,649 <math>\text{kN/m}^2</math></b>

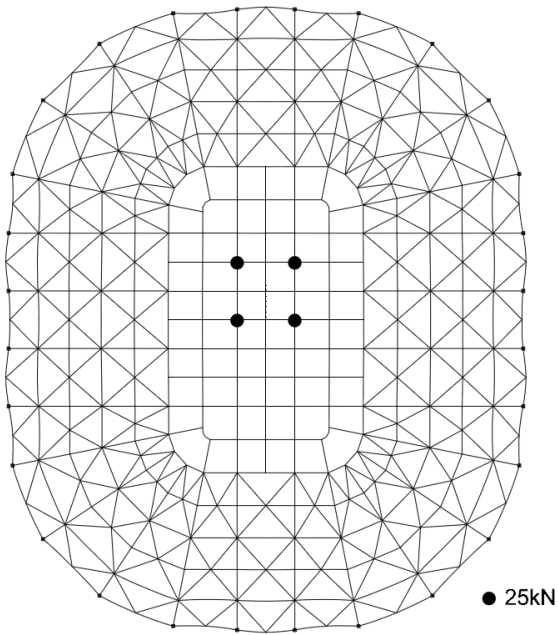
#### 4.2.2.1.3 Teža opreme

Oprema, ki je obešena na streho je podatek arhitekta. Na sliki 32 je prikazana shema obtežbe, naslednje slike pa prikazujejo obtežbo opreme, kot sem jo vnesla v program.

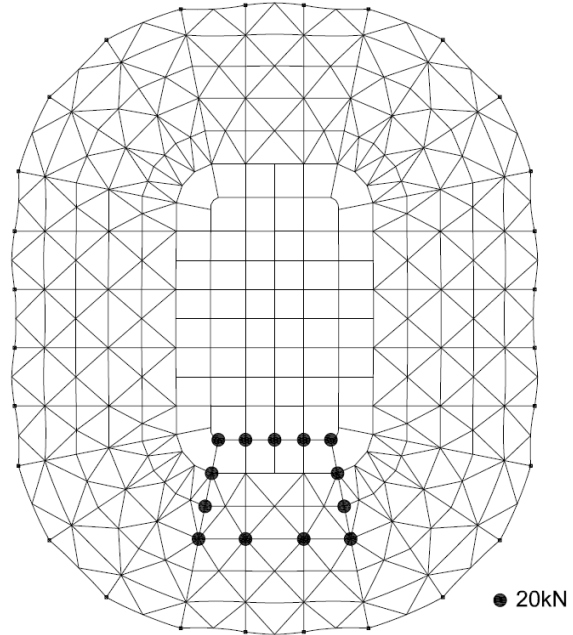
Med težo opreme sodijo: glavni semafor in tabla z rezultati, luči nad odrom, vzdrževalni hodnik in luči, dimne kupole in dimne zavese. Vsa obtežba je točkovna in prenesena v vozlišča, saj jih le na tak način lahko modeliram v programu.



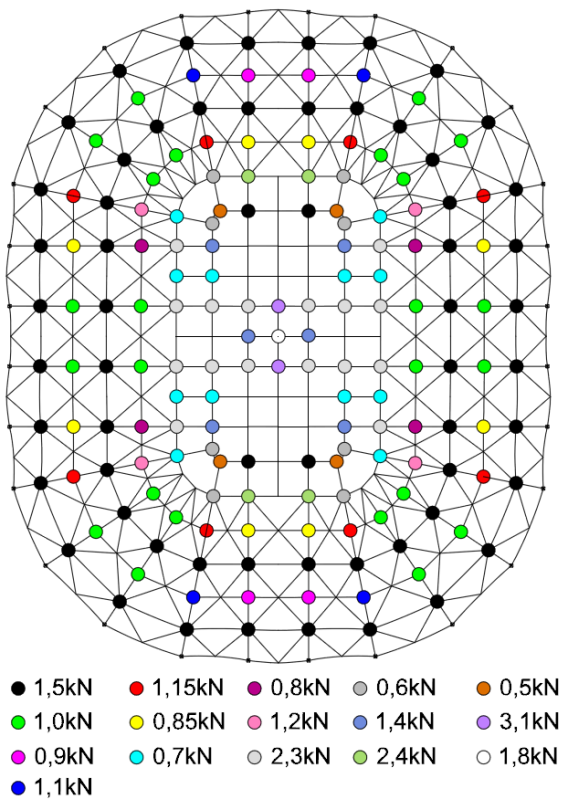
Slika 32: Shema opreme (podatek arhitekta)



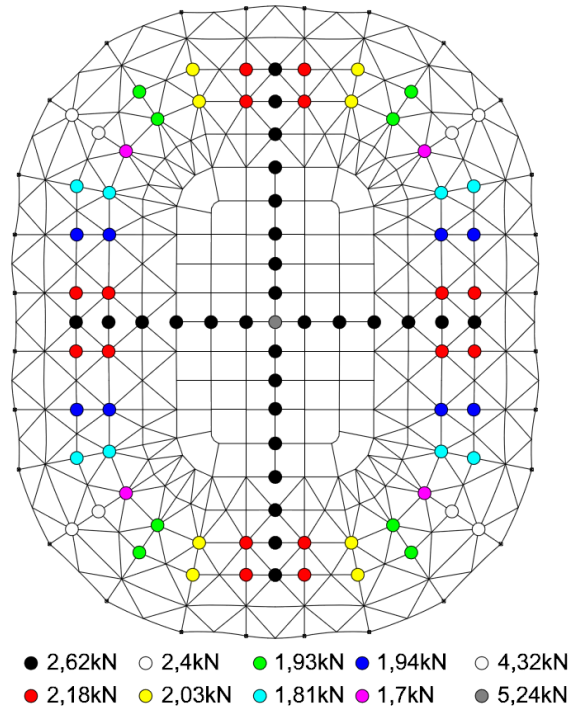
Slika 33: Teža opreme - glavni semafor, tabla z rezultati



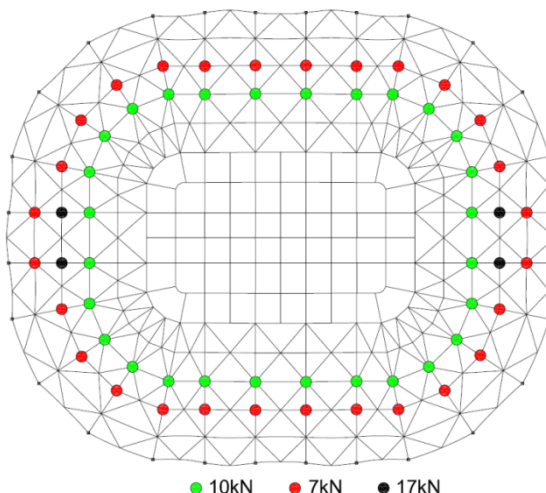
Slika 34: Teža opreme - luči nad odrom



Slika 35: Teža opreme - dimne kupole



Slika 36: Teža opreme - dimne zavese



Slika 37: Teža opreme - vzdrževalni hodnik in luči

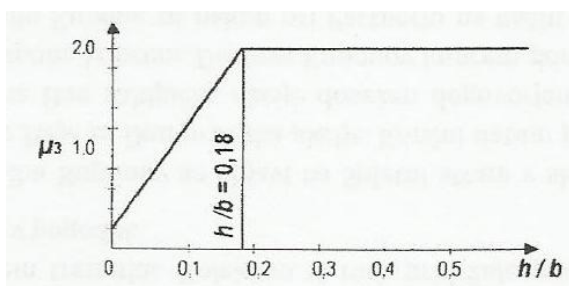
#### 4.2.2.2 Obtežba s snegom

Obtežbo s snegom sem določila s SIST EN 1991-1-3.

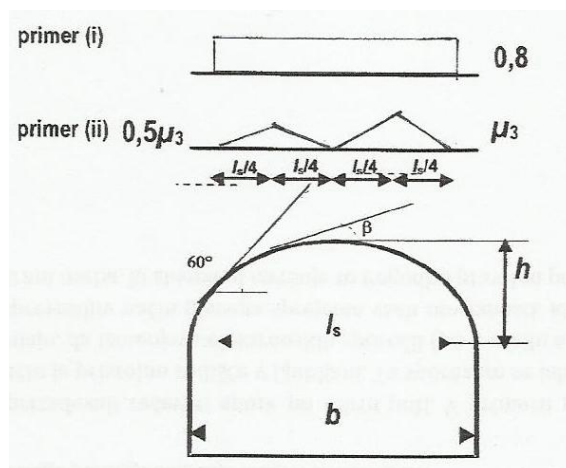
Karakteristična obtežba snega na tleh (nadmorska višina je  $A = 298$  m.n.v) znaša

$$s_k = 1,293 \left( 1 + \left( \frac{A}{728} \right)^2 \right) = 1,51 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

Oblika obtežbe s snegom in oblikovni koeficient za cilindrične strehe je določen v SIST EN 1991-1-3, točka 5.3.5, sliki 5.5 in 5.6.



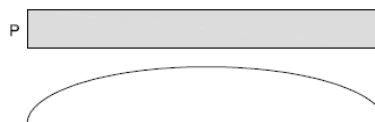
Slika 38: Priporočena vrednost oblikovnega koeficienta obtežbe snega za cilindrične glede na faktor  $h/b$



Slika 39: Oblikovni koeficienti obtežbe snega za cilindrične strehe

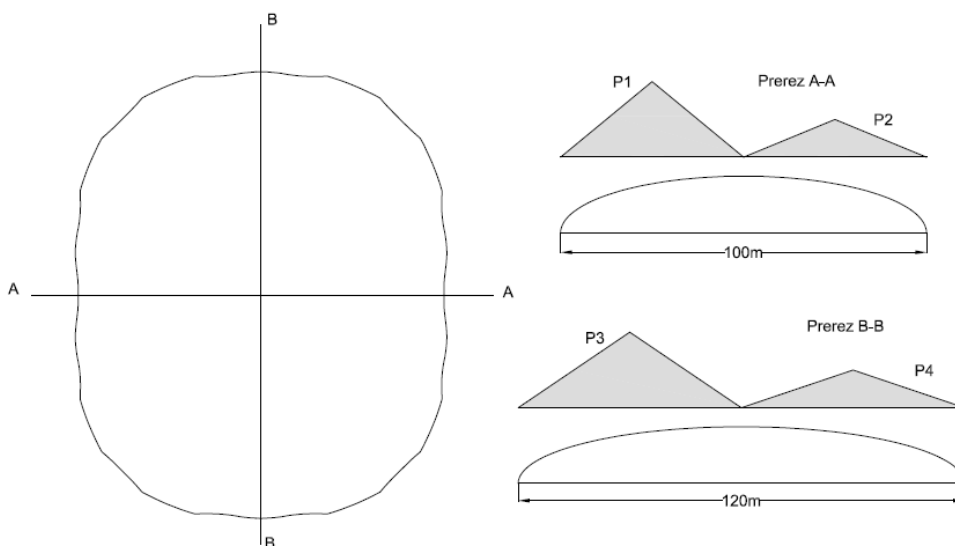
- Enakomerna obtežba s snegom

$$P = 0,8 \quad s_k = 1,208 \text{ kN/m}^2$$



Slika 40: Enakomerna obtežba s snegom

Kopičenje snega je možno v dveh smereh, kot prikazuje slika 41, zato imamo dve vrsti nakopičenega snega, velikost njune obtežbe je podana v nadaljevanju.



Slika 41: Obtežba z nakopičenim snegom

- Kopičenje snega – prerez A-A

$$\frac{h}{b} = \frac{15m}{100m} = 0,15 \rightarrow \mu_3 = 0,2 + 10 * 0,15 = 1,7 \quad (3)$$

$$P_1 = 1,7 * 1,51 = 2,567 \text{ kN/m}^2$$

$$P_2 = 0,5 * P_1 = 1,284 \text{ kN/m}^2$$

V projektni dokumentaciji sta vrednost  $P_1$  in  $P_2$  višji, kot sta tu izračunani. Razlog je v tem, da so za višino  $h$  vzeli 18 m, kar je višina od fasadnega obroča do temena. Ker pa fasadni obroč ni del strehe, sem pri izračunu višine upoštevala višino od podpor do temena. Vrednost  $P_1$  v projektu znaša 3,02 kN/m<sup>2</sup>,  $P_2$  pa je 1,51 kN/m<sup>2</sup>.

- Kopičenje snega – prerez B-B

$$\frac{h}{b} = \frac{15m}{120m} = 0,125 \rightarrow \mu_3 = 0,2 + 10 * 0,125 = 1,45 \quad (4)$$

$$P_3 = 1,45 * 1,51 = 2,190 \text{ kN/m}^2$$

$$P_4 = 0,5 * P_3 = 1,095 \text{ kN/m}^2$$

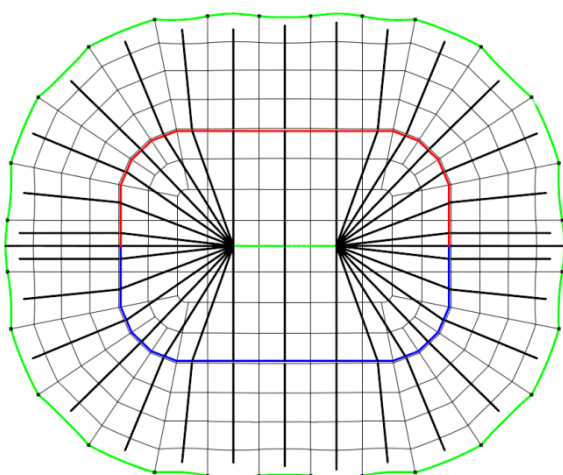
Zaradi enakega vzroka kot pri kopičenju snega v prerezu A-A, sta tudi v tem primeru vrednosti  $P_3$  in  $P_4$  višji od zgoraj izračunanih.  $P_3$  ima v projektu vrednost 2,57 kN/m<sup>2</sup>,  $P_4$  pa 1,28 kN/m<sup>2</sup>.



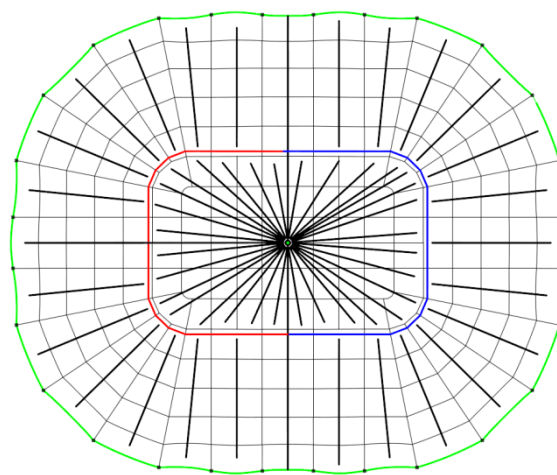
### 4.2.2.3 Oblike in kombinacije obtežb

#### 4.2.2.3.1 Oblike nakopičenega snega

Lastna teža profilov, kritina in enakomerna obtežba s snegom so enakomerne ploskovne obtežbe, ki sem jih porazdelila po obročih kot linijske obtežbe. Tudi nakopičen sneg je ploskovna obtežba in sem ga pretvorila v linijsko obtežbo, pred tem pa sem določila obliko nakopičenja snega, saj me je zanimalo, kako ta oblika nakopičenja vpliva na nosilnost strehe. Na spodnjih slikah je grafičen prikaz oblik nakopičenega snega, ki sem jih obravnavala. Pri vsaki od oblik nakopičenja je prerez A-A oziroma B-B enak, kot na sliki 41. Rdeča barva na slikah označuje položaj maksimalne obtežbe  $P$  ( $P_1$  ali  $P_3$ ), modra barva označuje polovično obtežbo  $0,5 P$  ( $P_2$  oziroma  $P_4$ ), zelena barva velikost obtežbe  $0 \text{ kN/m}^2$ , črne črte pa prikazujejo smer padca sile od  $P$  oziroma  $0,5 P$  do  $0$ .



Slika 42: Nakopičen sneg 1  
(kopičenje vidno v prerezu A-A)

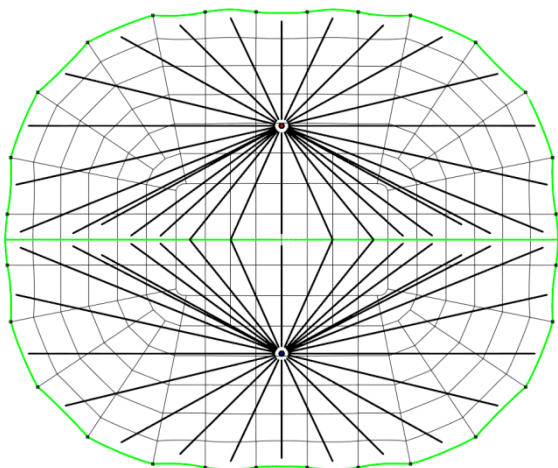


Slika 43: Nakopičen sneg 2  
(kopičenje vidno v prerezu B-B)

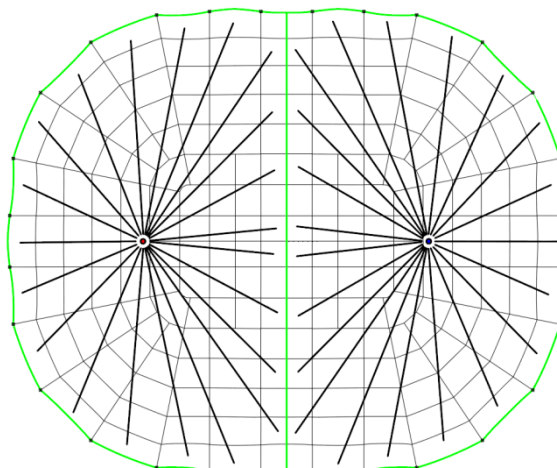
Na sliki 42 in 43 je nakopičen sneg, pri katerem maksimalna obtežba sledi geometriji obroča. Pri nakopičenem snegu 1 je na zgornji polovici maksimalna obtežba  $P_1$ , pri nakopičenem snegu 2 pa je večja obremenitev na levi strani strehe. Razporeditev, uporabljena v projektni dokumentaciji, je na podobna. Pri nakopičenju A je v projektni dokumentaciji porazdelitev skoraj enaka kot nakopičeni sneg 1, razlika je v velikosti obtežbe, ki pripada prvemu obroču. V mojem primeru obroču 1 pripada polovica obtežbe prvega pasu, v projektni dokumentaciji pa je delno upoštevan tudi pas do fasadnega obroča. Pri oblikovanju kombinacij sem se zato odločila, da ustvarim več kombinacij za nakopičen sneg 1:

- KS1 – Nakopičen sneg 1, obtežbi  $P_1$  in  $P_2$  izračunani tukaj (prerez A-A), oblika obtežbe enaka kot na sliki 42,
- KS1 – G – Nakopičen sneg 1, obtežbi  $P_1$  in  $P_2$  iz projektne dokumentacije, razporeditev obtežbe na elemente enaka kot pri KS1, razlika je v nivoju obtežbe,
- KS1 – A – Nakopičenje A, kot je obravnavano v projektni dokumentaciji, razporeditev obtežbe je enaka, kot je narisana v statični analizi pri obtežnih slučajih (projektna dokumentacija).

Razlika v projektni dokumentaciji je tudi pri nakopičenju B. Tam kopičenje ni upoštevano na celotni polovici strehe, ampak samo na delu do temena. Pri oblikovanju teh kombinacij pa sem upoštevala le dve – nakopičen sneg 1 in obtežbi  $P_3$  in  $P_4$  izračunane tukaj ter nakopičenje B, kot je obravnavano v projektni dokumentaciji.

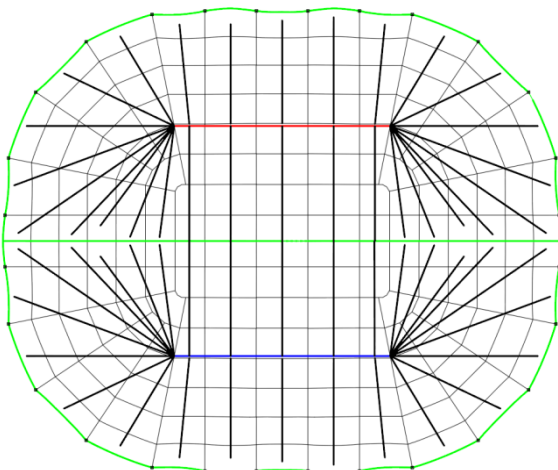


Slika 44: Nakopičen sneg 3  
(kopičenje vidno v prerezu A-A)

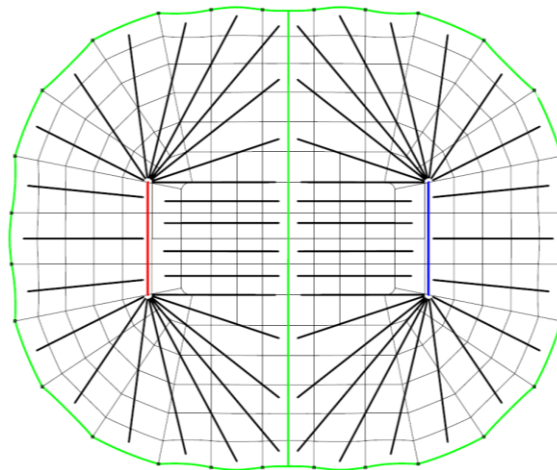


Slika 45: Nakopičen sneg 4  
(kopičenje vidno v prerezu B-B)

Na slikah 44 in 45 je maksimalna obtežba prisotna le v točki na sredini posameznega dela strehe, nato pa pada do podpor in sredine strehe – ima približno obliko stožca.

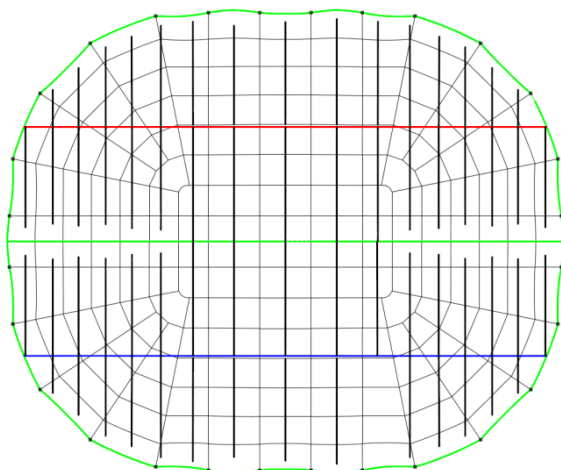


Slika 46: Nakopičen sneg 5  
(kopičenje vidno v prerezu A-A)

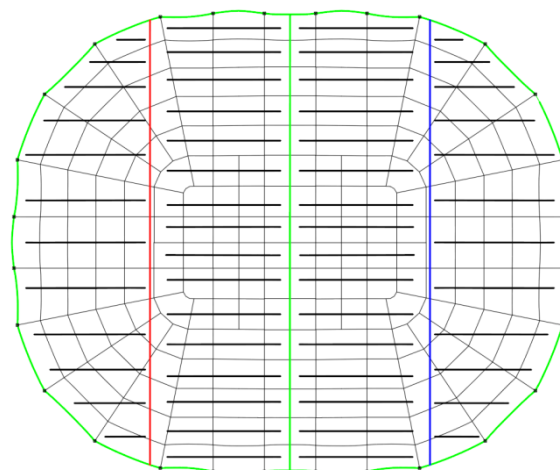


Slika 47: Nakopičen sneg 6  
(kopičenje vidno v prerezu B-B)

Pri nakopičenem snegu 5 in 6 je maksimalna obtežba na ravnem delu streh, nato pa se zmanjšuje do roba strehe in sredine strehe.



Slika 48: Nakopičen sneg 7  
(kopičenje vidno v prerezu A-A)



Slika 49: Nakopičen sneg 8  
(kopičenje vidno v prerezu B-B)

Pri nakopičenem snegu 7 in 8 je maksimalna obtežba podobna kot pri oblikah 5 in 6, le da je maksimum v ravni liniji podaljšan do roba strehe, nato pa obtežba pada proti sredini in robu strehe.

#### 4.2.2.3.2 Kombinacije obtežb

Vsi izračuni so narejeni za kombinacijo obtežbe pri mejnem stanju nosilnosti. Faktor za lastno težo je 1,35, za obtežbo s snegom pa 1,5. V spodnji preglednici so zapisane obtežne kombinacije in njihovo poimenovanje, kot ga bom uporabljala pri analizi rezultatov.

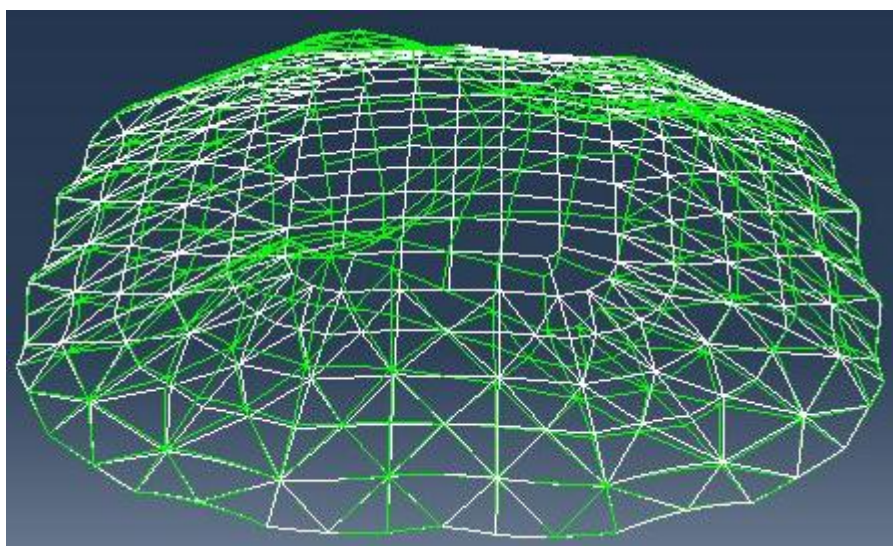
Preglednica 16: Obtežne kombinacije

Ime obtežne kombinacije	Obtežba in njen faktor
Enakomeren sneg (ES)	Lastna teža (1,35) + enakomeren sneg (1,5)
Kopičenje snega 1 (KS1)	Lastna teža (1,35) + nakopičen sneg 1 (1,5)
Kopičenje snega 1 – G (KS1-G)	Lastna teža (1,35) + nakopičen sneg 1, velikost $P_1$ iz projektne dokumentacije (1,5)
Kopičenje snega 1 – A (KS1-A)	Lastna teža (1,35) + nakopičen sneg A iz projektne dokumentacije (1,5)
Kopičenje snega 2 (KS2)	Lastna teža (1,35) + nakopičen sneg 2 (1,5)
Kopičenje snega 2 – B (KS2-B)	Lastna teža (1,35) + nakopičen sneg B iz projektne dokumentacije (1,5)
Kopičenje snega 3 (KS3)	Lastna teža (1,35) + nakopičen sneg 3 (1,5)
Kopičenje snega 4 (KS4)	Lastna teža (1,35) + nakopičen sneg 4 (1,5)
Kopičenje snega 5 (KS5)	Lastna teža (1,35) + nakopičen sneg 5 (1,5)
Kopičenje snega 6 (KS6)	Lastna teža (1,35) + nakopičen sneg 6 (1,5)
Kopičenje snega 7 (KS7)	Lastna teža (1,35) + nakopičen sneg 7 (1,5)
Kopičenje snega 8 (KS8)	Lastna teža (1,35) + nakopičen sneg 8 (1,5)

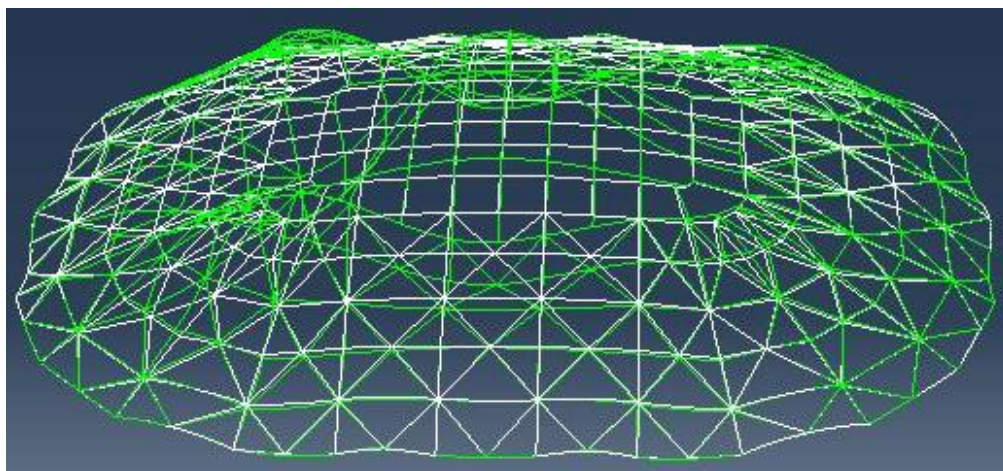
### 4.2.3 Nepopolnosti

Poleg izračunov, ki sem jih naredila na popolni konstrukciji, sem naredila še preračune na konstrukciji z vnesenimi nepopolnostmi.

Obliko nepopolnosti sem izbrala na podlagi rezultatov računa lastnih vrednosti in njihove oblike. Izbrala sem dve vrsti nepopolnosti – prva nepopolnost je nesimetrična nepopolnost v smeri krajše stranice (slika 50), druga nesimetrična nepopolnost pa v smeri daljše stranice (slika 51). Simetrične nepopolnosti nisem upoštevala, saj se pri rezultatih v primeru loka vidi, da nima tako velikega vpliva na samo nosilnost. Amplitudo nepopolnosti sem določila glede na zahtevo v standardu EN1993-2. Uporabljeni profili so vročevaljani in imajo, po podatkih v projektni dokumentaciji, uklonsko krivuljo  $a$ , amplituda nepopolnosti za to uklonsko krivuljo znaša  $L/600$ .



Slika 50: Nepopolnost 1 - nesimetrična nepopolnost v krajši smeri,  $e_0 = 0,162\text{m}$



Slika 51: Nepopolnost 2 - nesimetrična nepopolnost v daljši smeri,  $e_0 = 0,196\text{m}$

### 4.3 Kontrola preskoka sistema po EN 1993-2

Kontrolo preskoka sistema sem naredila enako kot pri loku. Najprej sem kontrolo naredila za krajši razpon, nato pa še za daljšega.

#### 4.3.1 Kontrola preskoka sistema v krajši smeri strehe

Dolžina razpona v krajši smeri je 100 m, višina je 15 m, oblikovni faktor  $f/L$  znaša 0,15. Iz preglednice v standardu (ali preglednica 14) vidimo, da je potreben faktor  $K=10$ .

V krajši smeri noben lok ni samo iz ene vrste profilov – sestavljen je iz kombinacije profilov debeline 12,5 mm in 16 mm. Naredila sem kontrolo za primer, ko imamo profile debeline 12,5 mm, primer za profile debeline 16 mm ter dejansko stanje loka na sredini in enega nad njim. Kontrolo sem naredila po enačbi (1). Levo stran enačbe (1) sem označila s  $K'$

- Profili RHS 500/300/12,5

$$L = 97,3 \text{ m}$$

$$A = 193,75 \text{ cm}^2 \quad \Rightarrow \quad K' = 151 > K = 10 \quad \text{Preskok sistema ni merodajen.}$$

$$I_y = 66898 \text{ cm}^4$$

- Profili RHS 500/300/16

$$L = 97,3 \text{ m}$$

$$A = 245,76 \text{ cm}^2 \quad \Rightarrow \quad K' = 152 > K = 10 \quad \text{Preskok sistema ni merodajen.}$$

$$I_y = 83576 \text{ cm}^4$$

- Dejansko stanje – lok na sredini

$$L = 97,3 \text{ m}$$

$$A_{\text{nad.}} = 219,19 \text{ cm}^2 \quad \Rightarrow \quad K' = 151,8 > K = 10 \quad \text{Preskok sistema ni merodajen.}$$

$$I_{y, \text{nad.}} = 75055 \text{ cm}^4$$

- Dejansko stanje – lok nad sredinskim lokom

$$L = 97,3 \text{ m}$$

$$A_{\text{nad.}} = 225,84 \text{ cm}^2 \quad \Rightarrow \quad K' = 150 > K = 10 \quad \text{Preskok sistema ni merodajen.}$$

$$I_{y, \text{nad.}} = 77190 \text{ cm}^4$$

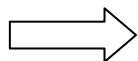
#### 4.3.2 kontrola preskoka sistema v daljši smeri strehe

Dolžina razpona v daljši smeri je 117,3 m, višina je 15 m, oblikovni faktor  $f/L=0,125$ . Faktor, ki določa preskok sistema, sem določila iz preglednice v Evrokodu s pomočjo interpolacije in znaša  $K = 13,5$ . Lok v daljši smeri je iz profilov debeline 16 mm.

$L = 117,3 \text{ m}$

$A = 245,76 \text{ cm}^2$

$I_y = 83576 \text{ cm}^4$

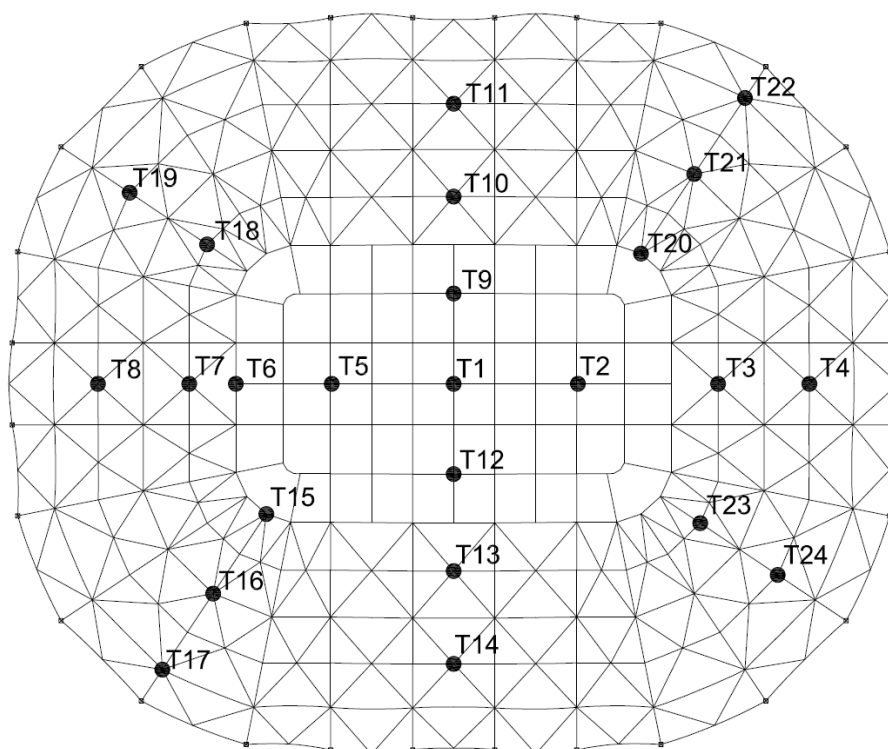


$K' = 184 > K = 13,5$  Preskok sistema ni merodajen.

Čeprav nam kontrola preskoka po Evrokodu pokaže, da preskok sistema ni merodajen, nam rezultati, dobljeni v Abaqusu po metodi dolžine lokov, prikažejo ravnotežne poti, ki so značilne prav za preskok sistema.

#### 4.4 Kritični faktorji nosilnosti pri obravnavanih obtežbah

Streho športne dvorane v Stožicah sem najprej analizirala s programom Abaqus po metodi dolžine lokov. Izračunala sem faktorje mejne nosilnosti po nelinearni analizi (LPF faktor) pri popolni konstrukciji ter pri konstrukciji z nepopolnostjo 1 in 2. Določila sem lastne vrednosti (mejna nosilnost pri elastičnem obnašanju in linearnem izračunu) in obliko prve lastne vrednosti popolne konstrukcije, za najbolj značilne obtežne kombinacije (enakomeren sneg, kopičenje snega 1) sem narisala P-w diagrame in prikazala slike deformiranja konstrukcije ter njihove deformacijske oblike. Povsem sem opazovala v točkah, prikazanih na sliki (52).



Slika 52: Položaj opazovanih točk

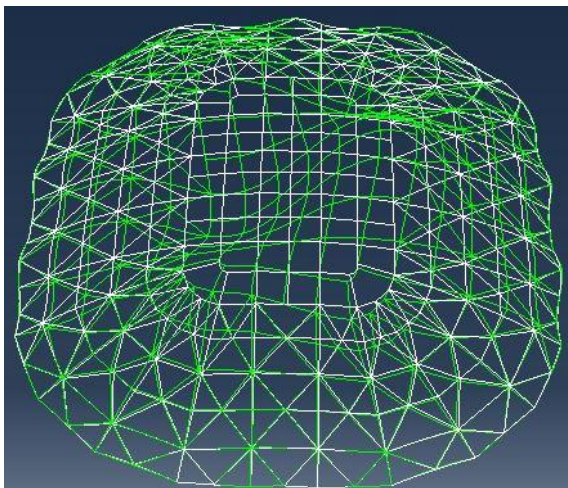
Zaradi obsežnih rezultatov sem se odločila, da bom podrobno predstavila osnovni dve obtežni kombinaciji, tj. enakomeren sneg (ES), kopičenje snega 1 (KS1) za popolno konstrukcijo in obe obliki nepopolnosti. Pri ostalih obtežnih kombinacijah sem v preglednico zapisala mejni obtežni faktor in lastno vrednost ter rezultate komentirala.

#### 4.4.1 Rezultati obtežne kombinacije »enakomeren sneg«

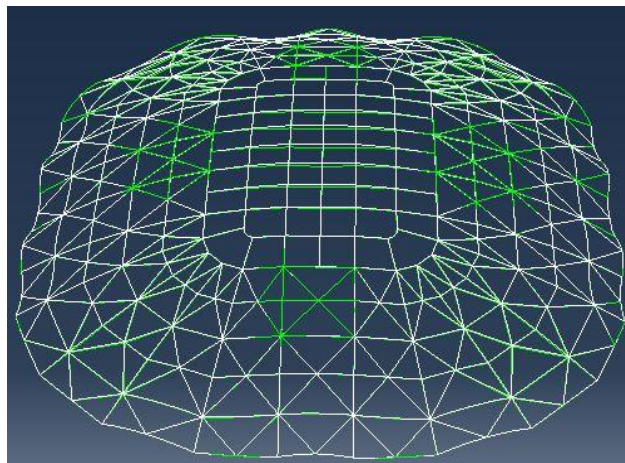
Pri tej obtežni kombinaciji nimamo kopičenja obtežbe. To je osnovna obtežna kombinacija, kjer je sneg enakomerno porazdeljen po celotnem tlorisu. V preglednici so zbrani rezultati (LPF faktor oziroma mejni faktor povečanja obtežbe, maksimalni povos strehe pri LPF=1 in LPF=mejni) za popolno konstrukcijo in konstrukcijo z vneseno nepopolnostjo 1 in 2. Za popolno konstrukcijo je podana tudi prva lastna vrednost. V nadaljevanju je prikazana deformirana oblika strehe pri maksimalni vrednosti faktorja LPF, velikost povosov pri faktorju 1 in njegovi maksimalni vrednosti ter oblika prve lastne vrednosti.

Preglednica 17: Mejni faktorji nosilnosti pri obtežni kombinaciji "enakomeren sneg"

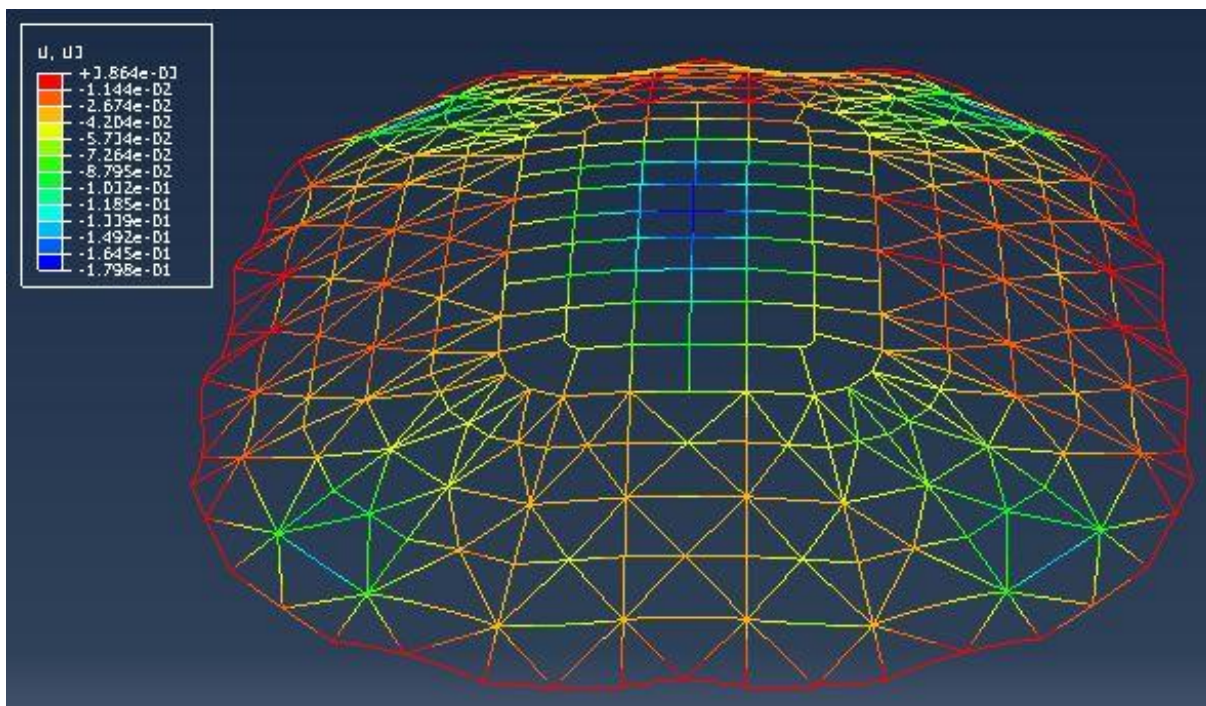
	LPF faktor	Poves w pri LPF=1	Poves w pri LPF <sub>mejni</sub>	Prva lastna vrednost
<b>Popolna konstrukcija</b>	1,582	0,1798	0,7811	1,959
<b>Nepopolnost 1</b>	1,363	0,2594	0,7623	
<b>Nepopolnost 2</b>	1,370	0,2687	0,8008	



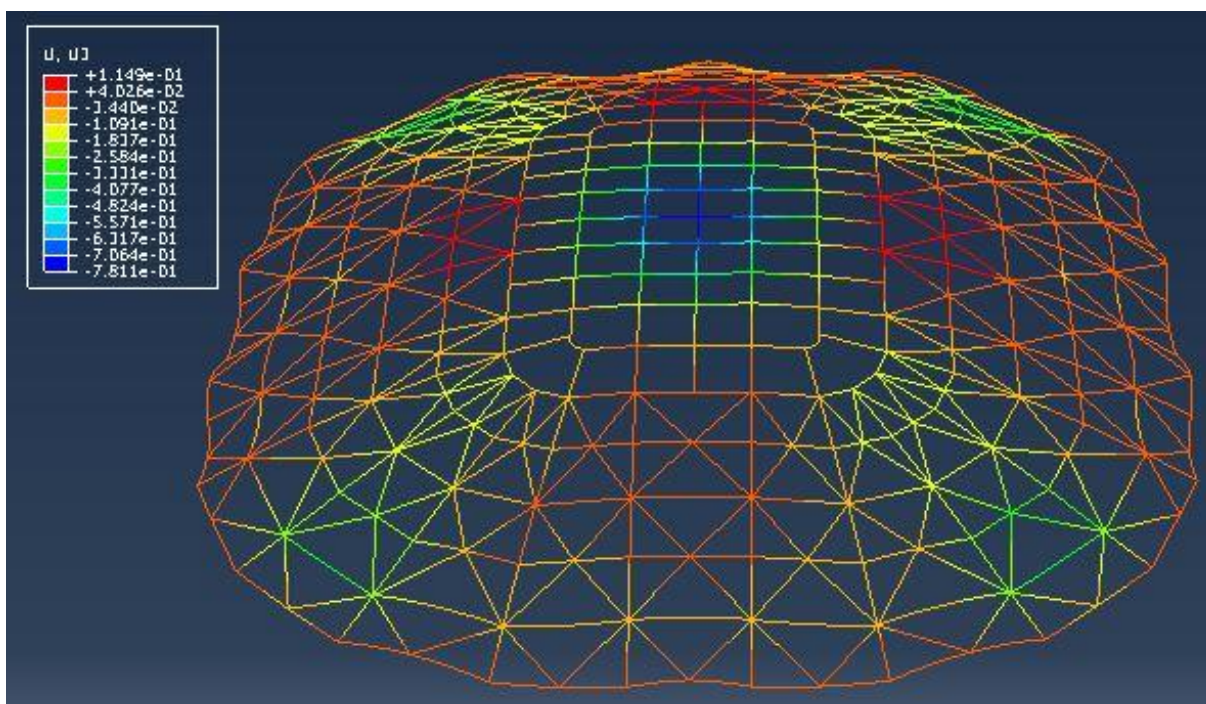
Slika 53: Oblika prve lastne vrednosti popolne konstrukcije (ES)



Slika 54: Deformirana oblika popolne konstrukcije pri LPF<sub>mejni</sub> (ES)



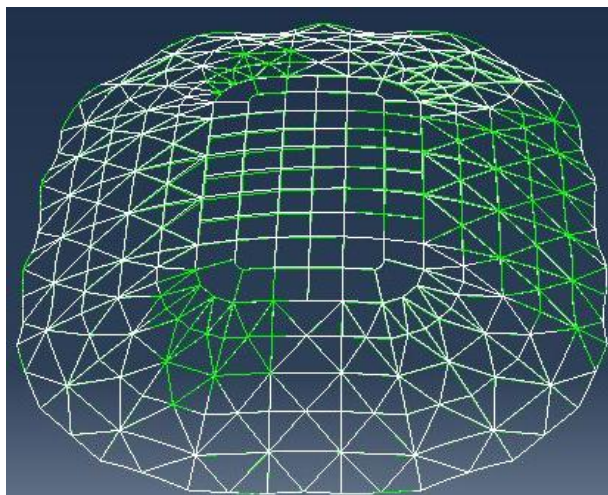
Slika 55: Poves strehe brez nepopolnosti pri LPF=1 (ES)

Slika 56: Poves strehe brez nepopolnosti pri LPF<sub>mejni</sub> (ES)

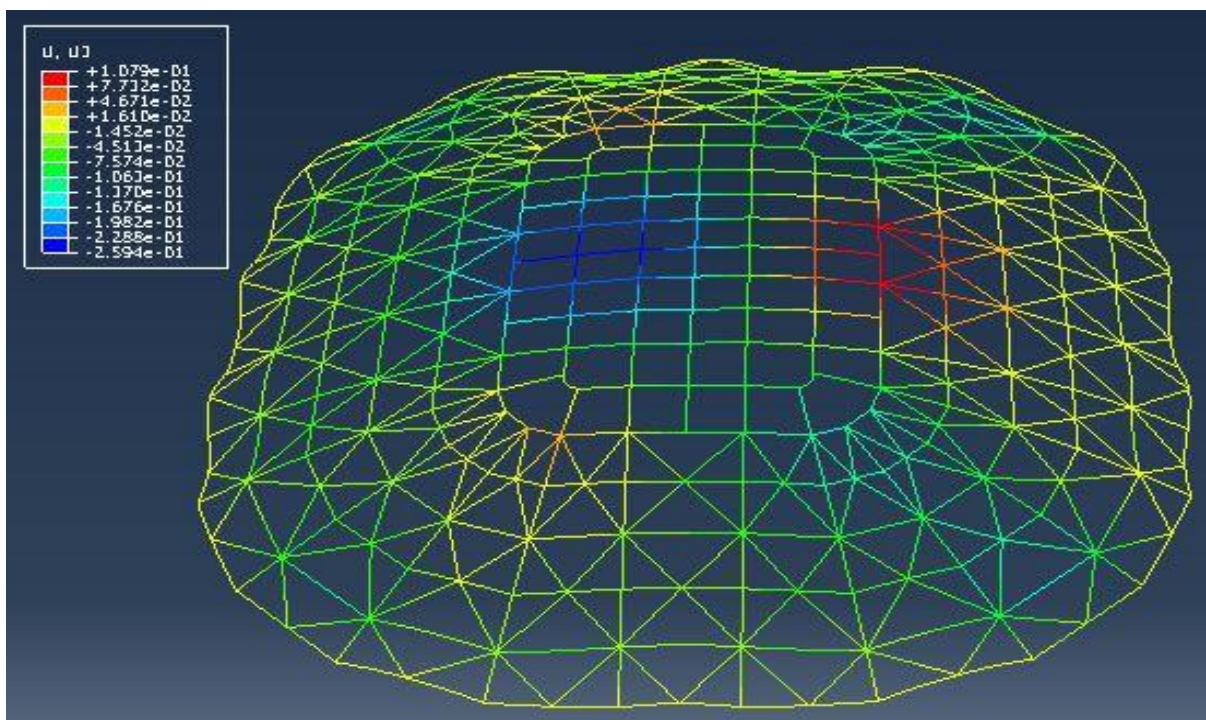
Popolna konstrukcija se deformira tako, da se temenski del poveša, streha levo in desno od temena pa se dviguje. To se vidi predvsem na sliki 56, kjer je opazno, da je najvišji dvig strehe tik ob temenskem delu, največji poves pa v temenu. Maksimalni poves je ves čas v isti točki, se pa njegova velikost med faktorjema 1 do 1,58 močno poveča – več kot štirikrat. Poves pri mejnem LPF predstavlja  $L/120$ , moramo pa vedeti, da se kmalu za tem lahko zgodi nenadno povečanje pomikov zaradi preskoka sistema.



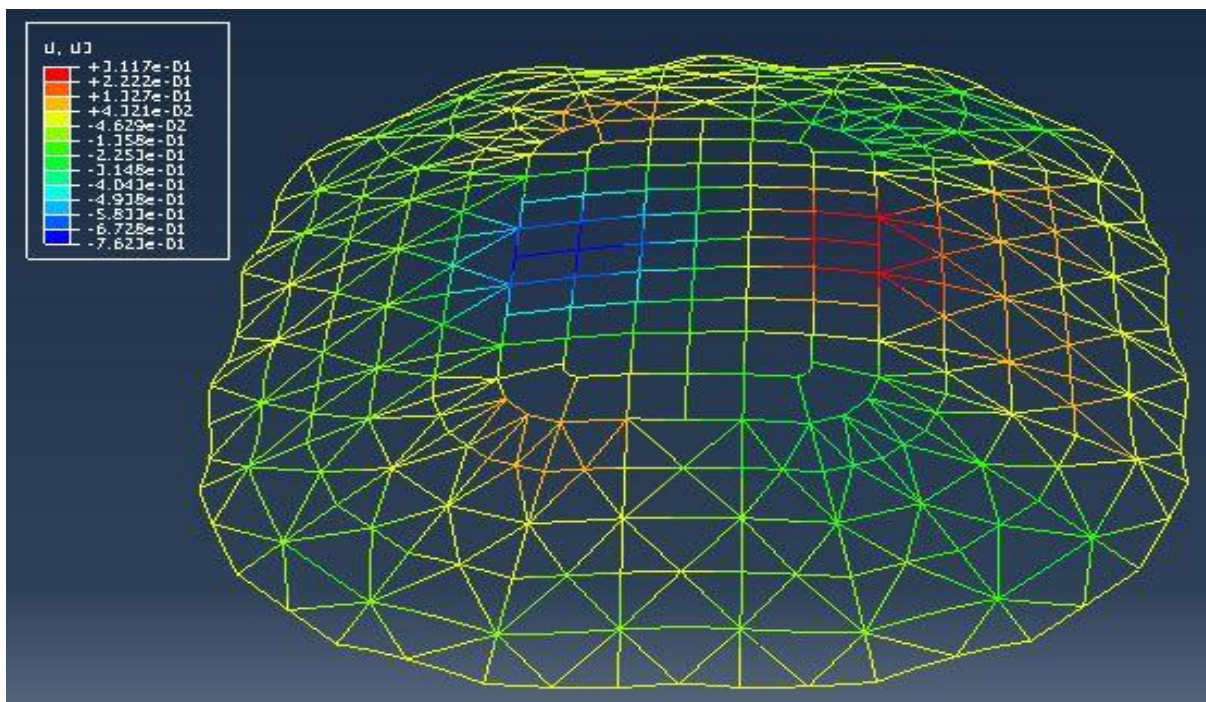
Nepopolnost 1 precej vpliva na nosilnost – mejni faktor se zmanjša na vrednost 1,36, poveča se maksimalni povos pri nivoju projektne obtežbe in nekoliko zmanjša pri mejni vrednosti LPF. Ker je nižji faktor, je pričakovano tudi nižji pomik. Na slikah deformirane oblike in povosov se lepo vidi, kako vpliva nepopolnost na deformiranje – deformacijska oblika strehe se počasi približuje obliki vnesene nepopolnosti.



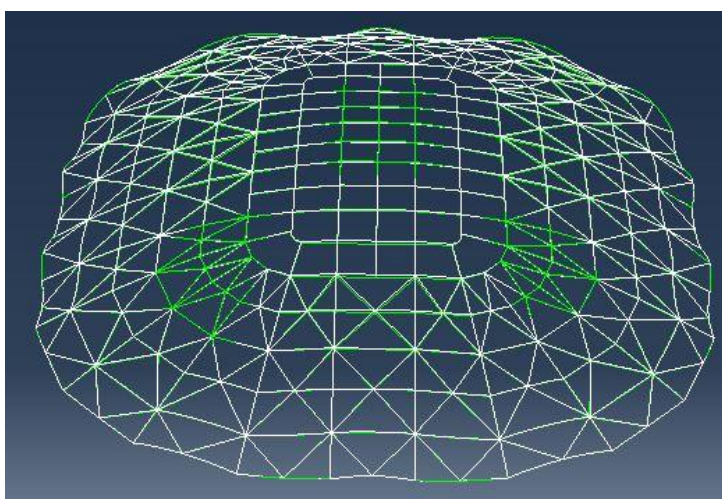
Slika 57: Deformacijska oblika strehe z nepopolnostjo 1 pri  $LPF_{mejni}$  (ES)

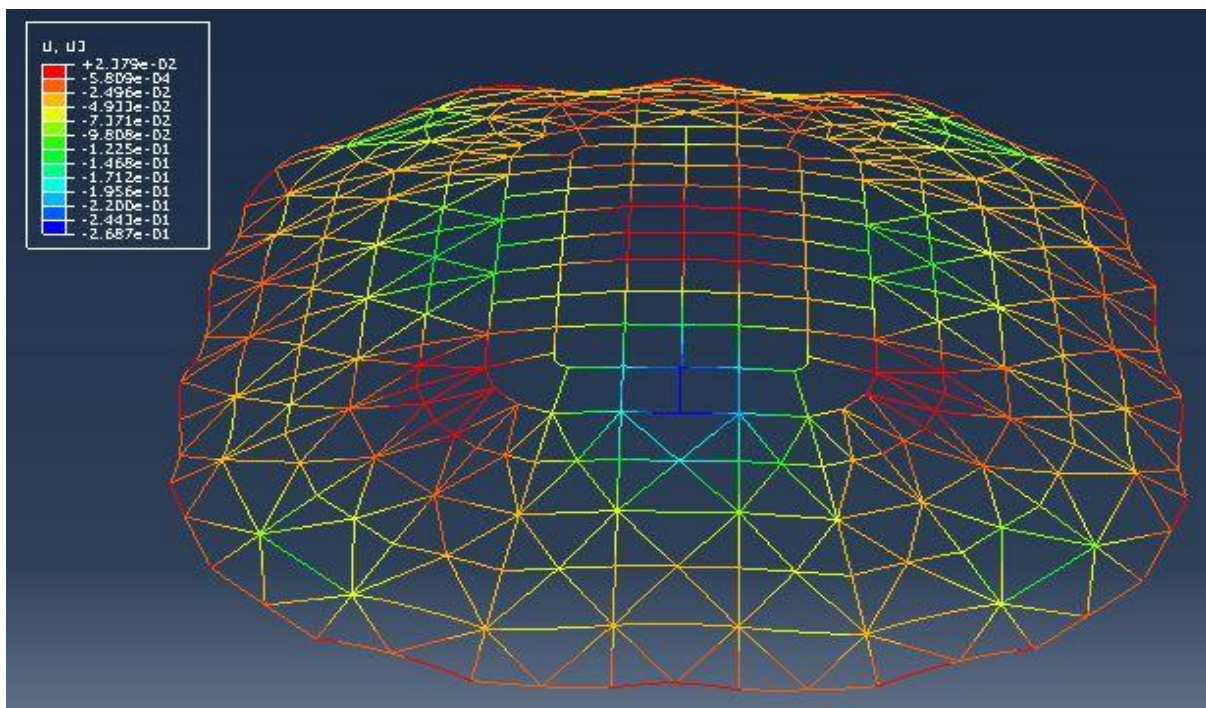


Slika 58: Povos strehe z nepopolnostjo 1 pri  $LPF=1$  (ES)

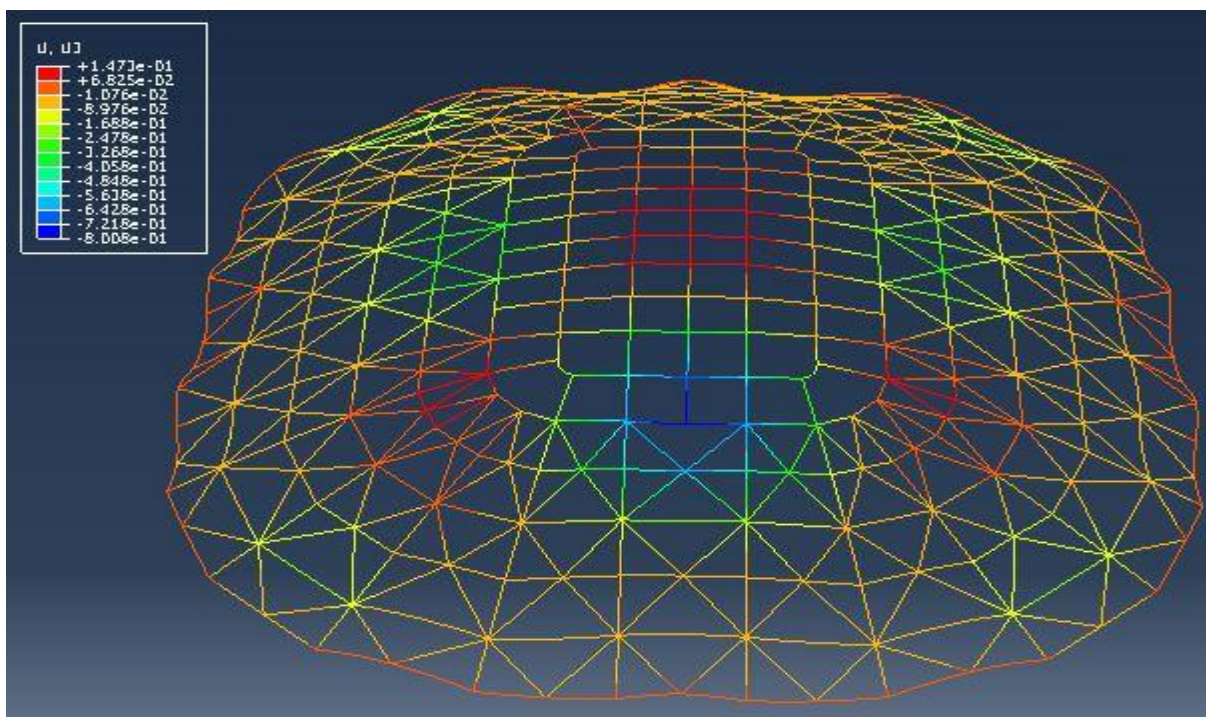
Slika 59: Povese strehe z nepopolnostjo 1 pri  $LPF_{mejni}$  (ES)

Nepopolnost 2 manj vpliva na nosilnost strehe, čeprav je sama amplituda nepopolnosti višja. Razlog je v tem, da ima nepopolnost 2 obliko lastne vrednosti, ki je višjega reda in zato manj vpliva na mejno nosilnost in obnašanje konstrukcije kot se to čuti pri prvi lastni vrednosti. Kljub temu pa povzroči večje povese, kot jih imamo pri popolni konstrukciji in konstrukciji z nepopolnostjo 1. Razlog je v točkovni obtežbi, ki jo imamo na delu največjih pomikov. Na delu konstrukcije, kjer je vnesena nepopolnost, se nahajajo tudi luči pod odrom, ki predstavljajo določeno točkovno obtežbo. Seveda pa je razlog večjih pomikov tudi amplituda nepopolnosti, ki nekaj povesa že takoj na začetku predpiše temu delu strehe. Na slikah se vidi, kako vnesena nepopolnost vpliva na obliko deformiranja strehe – na sprednjem delu je sedaj povese največji, temenski del pa se začne dvigovati.

Slika 60: Deformacijska oblika strehe z nepopolnostjo 2 pri  $LPF_{mejni}$  (ES)

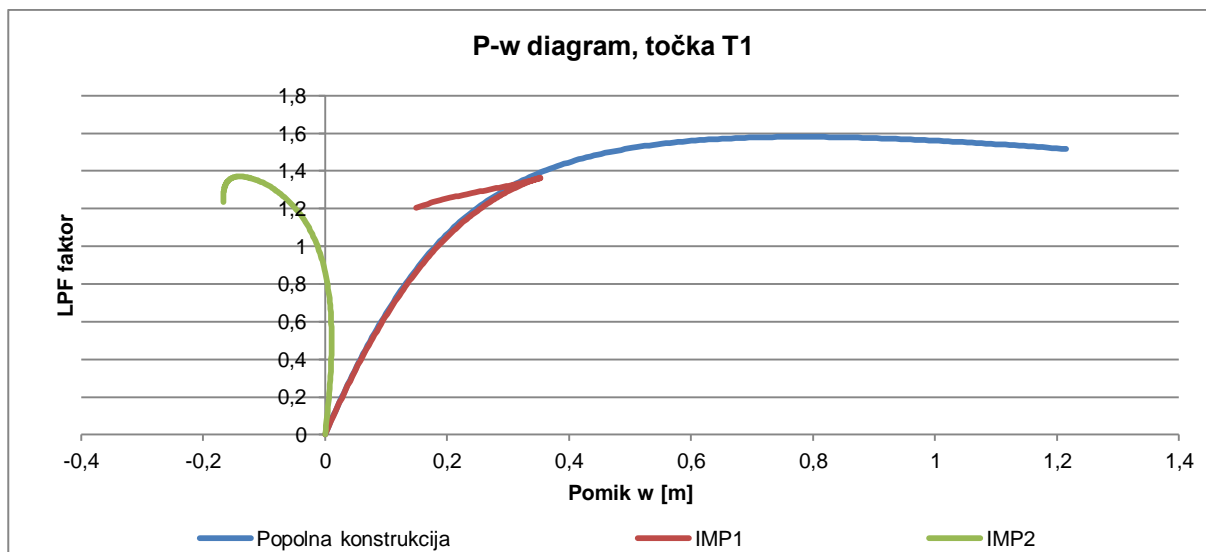


Slika 61: Poves strehe z nepopolnostjo 2 pri LPF=1 (ES)



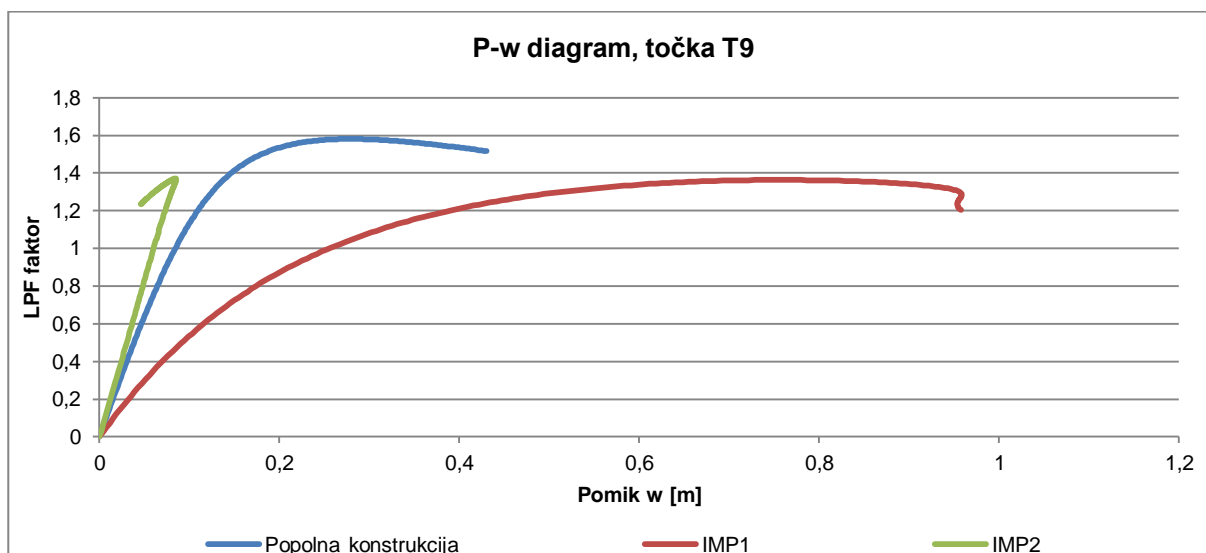
Slika 62: Poves strehe z nepopolnostjo 2 pri LPF<sub>mejni</sub> (ES)

V nadaljevanju so prikazani P-w diagrami za 5 izbranih točk. Izbrala sem točko T1, tj. temensko točko, na kateri se bo lepo videlo obnašanje popolne konstrukcije. Pri točkah T9, T19 in T13 se bo videl vpliv nepopolnosti 1, pri točki T6 pa vpliv nepopolnosti 2.



Graf 31: P-w diagram točke T1 (ES)

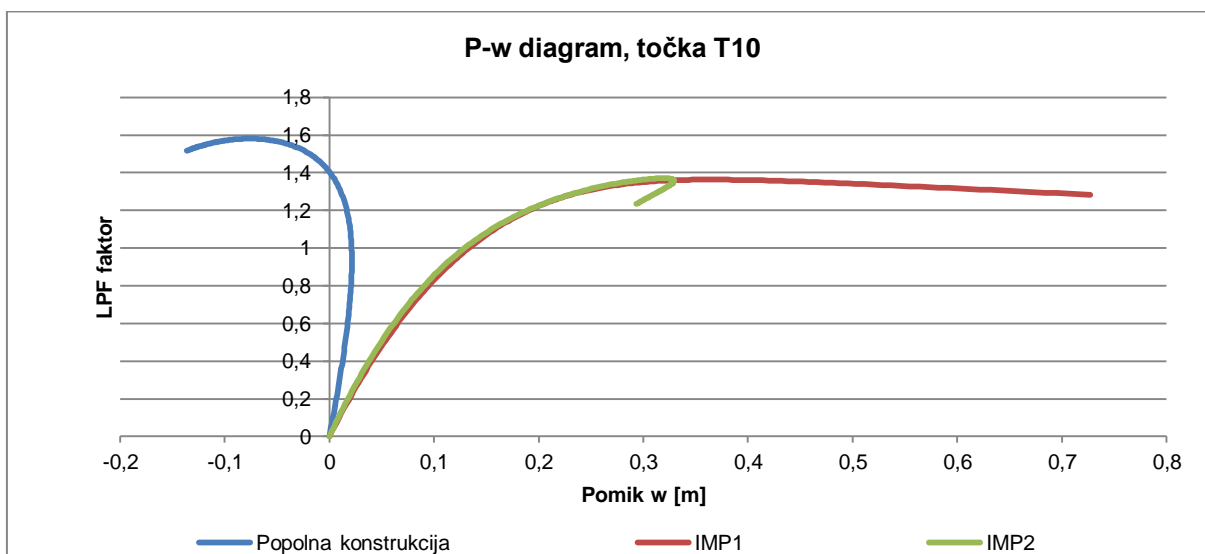
Točka T1 se najbolj povese pri popolni konstrukciji. Pri nepopolnosti se nekaj časa (do faktorja nekaj manj kot 1,4) pomika enako kot pri popolni konstrukciji, nato pa se njen povese začne hitro zmanjševati. Razlog je v tem, da se pomiki na daljši strani strehe začnejo močno povečevati in posledica tega je zmanjšanje pomika v točki T1. Streha dobiva obliko lastne vrednosti, kjer ima ena stran strehe velike povese, druga stran pa dvig. Pri nepopolnosti 2 se točka T1 v začetnem delu ne premika veliko, kasneje (ko prihajamo do mejnega LPF faktorja) pa se začne dvigovati.



Graf 32: P-w diagram točke T9 (ES)

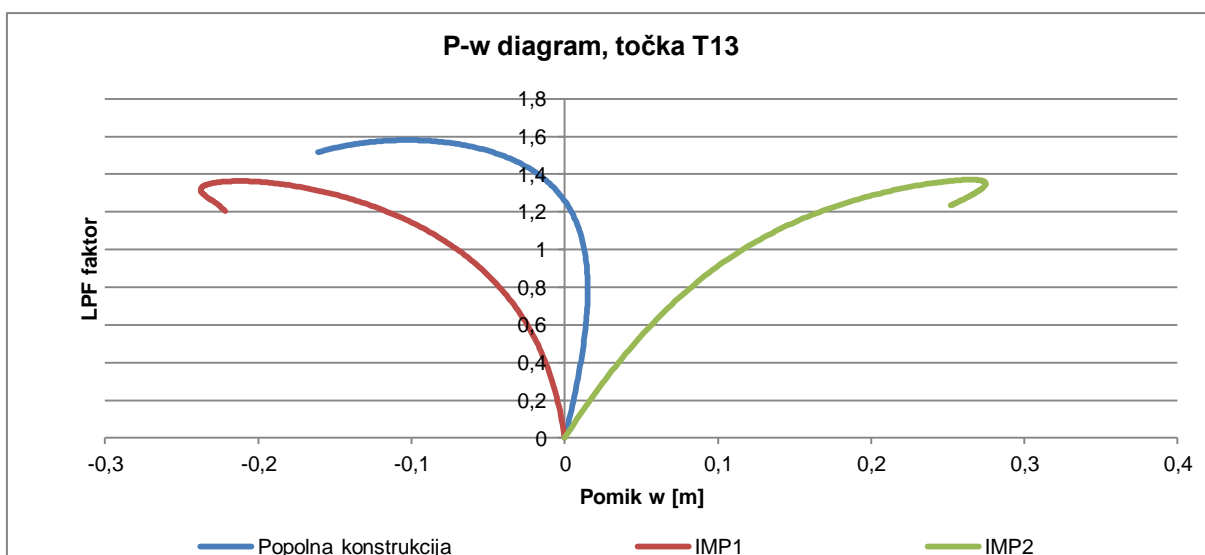
Nepopolnost 1 na pomik točke T9 deluje zelo neugodno, saj vsili pomik v smeri, v katero se pomakne že popolna konstrukcija. Vidimo lahko, da ima točka T9 že pri nizkem obtežnem faktorju precej večji povese kot popolna konstrukcija, v limitni točki diagrama pa je povese več kot enkrat večji. Obnašanje točke pri vneseni nepopolnosti 2 pa je tipičen primer obnašanja točke, ko je vnesena nepopolnost v nasprotni smeri kot bi bilo sicer pomikanje točke. Vidi se, da se pomik počasi povečuje, nato pa po dosegu mejne vrednosti LPF faktorja začne padati.

Razlog za to je povečanje pomikov v drugem delu konstrukcije (del, kjer se nahaja točka T6), saj se tam zgodi preskok sistema.



Graf 33: P-w diagram točke T10 (ES)

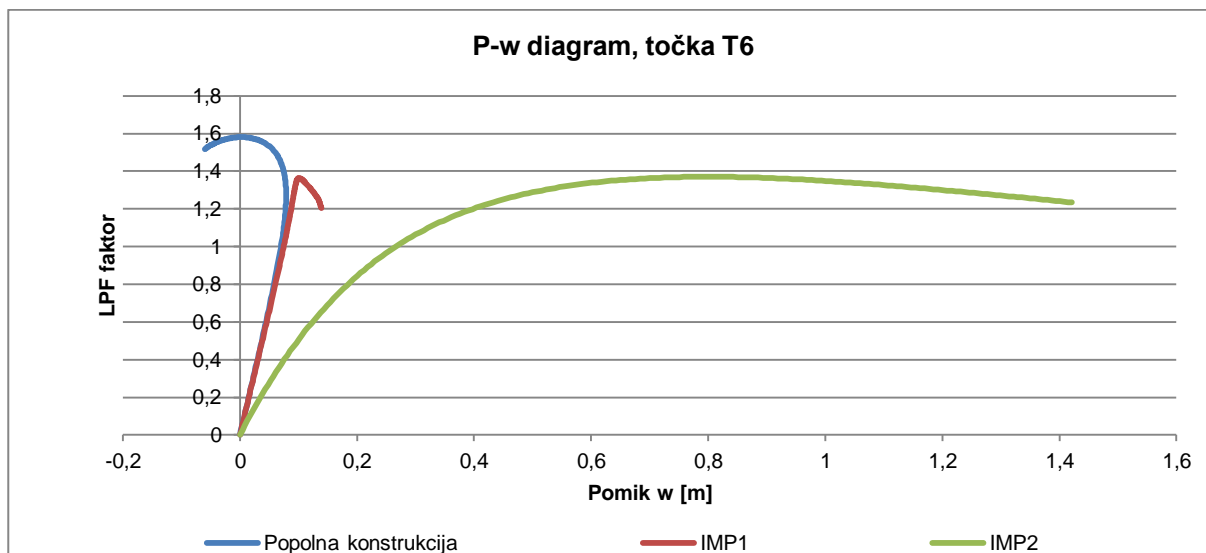
Točka T10 se nahaja na istem delu strehe kot točka T9, zato lahko opazimo podobnost med diagramoma za nepopolnost – njuna oblika je skoraj enaka, razlika je v pomiku, ki je v tem primeru manjši. Popolna konstrukcija se v tej točki obnaša drugače. Ta del strehe se začne dvigovati, kar lahko vidimo na sliki deformirane oblike strehe (slika 54). Pri nepopolnosti 2 se konstrukcija do kritičnega faktorja obnaša enako kot pri nepopolnosti 1, po doseženem kritičnem faktorju pa začne pomik hitro padati, medtem ko pri nepopolnosti 1 pomik še naprej raste. Razlog je zopet v povečanju povosov na drugem delu strehe (točka T6).



Graf 34: P-w diagram točke T13 (ES)

Točka T13 se nahaja na nasprotni strani strehe kot točka T10. V tem delu se, pri popolni konstrukciji in pri nesimetrični obtežbi, konstrukcija začne dvigovati. Obnašanje točke je ravno nasprotno kot v točki T10 pri nesimetrični nepopolnosti. Tako je tudi pričakovati, saj je

vnesena nepopolnost nesimetrična. Obnašanje točke T13 pa je enako točki T10 pri popolni konstrukciji in nepopolnosti 2. Razlog je v simetriji po sredini daljšega razpona. Vsa obtežba na konstrukciji je simetrična v tej smeri, tudi nepopolnost 2, zato je tako obnašanje pričakovano.



Graf 35: P-w diagram točke T6 (ES)

V točki T6 imamo največji povos pri nesimetrični nepopolnosti 2. V tej točki se po doseženi kritični vrednosti povos najhitreje in najbolj večja (ob majhnem padcu obtežbe imamo velik pomik točke), kar povzroči manjšanje pomika v vseh ostalih točkah. Pri popolni konstrukciji se ta točka ne pomika ves čas navzdol. Na začetku se povos počasi večja, bližje kot smo mejnemu faktorju, bolj se točka dviga in na koncu je nad višino, ki jo ima v nedeformiranem stanju. Pri nepopolnosti 1 je začetno obnašanje enako kot pri popolni konstrukciji, po dosegu mejnega faktorja pa se povos začne malo hitreje povečevati.

Pri enakomerno obteženi strehi lahko rečemo, da je nepopolnost 1 bolj neugodna, kar je pričakovano, saj je enaka obliki prve lastne vrednosti.

#### 4.4.2 Rezultati obtežne kombinacije »kopičenje snega 1«

Pri tej obtežni kombinaciji imamo kopičenje snega v smeri krajše stranice. Tudi to je osnovna obtežna kombinacija, saj je sneg porazdeljen tako, kot pričakuje standard, da se bo konstrukcija obtežila. V preglednici so zbrani rezultati (LPF faktor oziroma mejni faktor povečanja obtežbe, maksimalni povos strehe pri  $LPF=1$  in  $LPF=$ mejni) za popolno konstrukcijo in konstrukcijo z vneseno nepopolnostjo 1 in 2. Za popolno konstrukcijo je podana tudi prva lastna vrednost. V nadaljevanju je prikazana deformirana oblika strehe pri mejni vrednosti faktorja LPF, velikost povosov pri faktorju 1 in njegovi mejni vrednosti. Oblika prve lastne vrednosti je enaka kot pri enakomernem snegu, zato je ne bom ponovno prikazala.

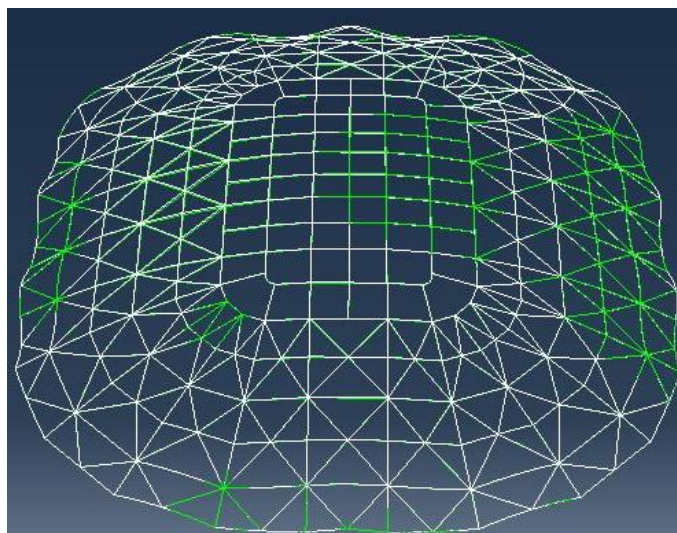
Preglednica 18: Mejni faktorji nosilnosti pri obtežni kombinaciji "kopičenje snega 1"

	LPF faktor	Poves w pri LPF=1	Poves w pri LPF <sub>mejni</sub>	Prva lastna vrednost
<b>Popolna konstrukcija</b>	1,0996	0,3455	0,5982	1,8003
<b>Nepopolnost 1</b>	0,8805	/	0,7228	
<b>Nepopolnost 2</b>	0,8784	/	0,7587	

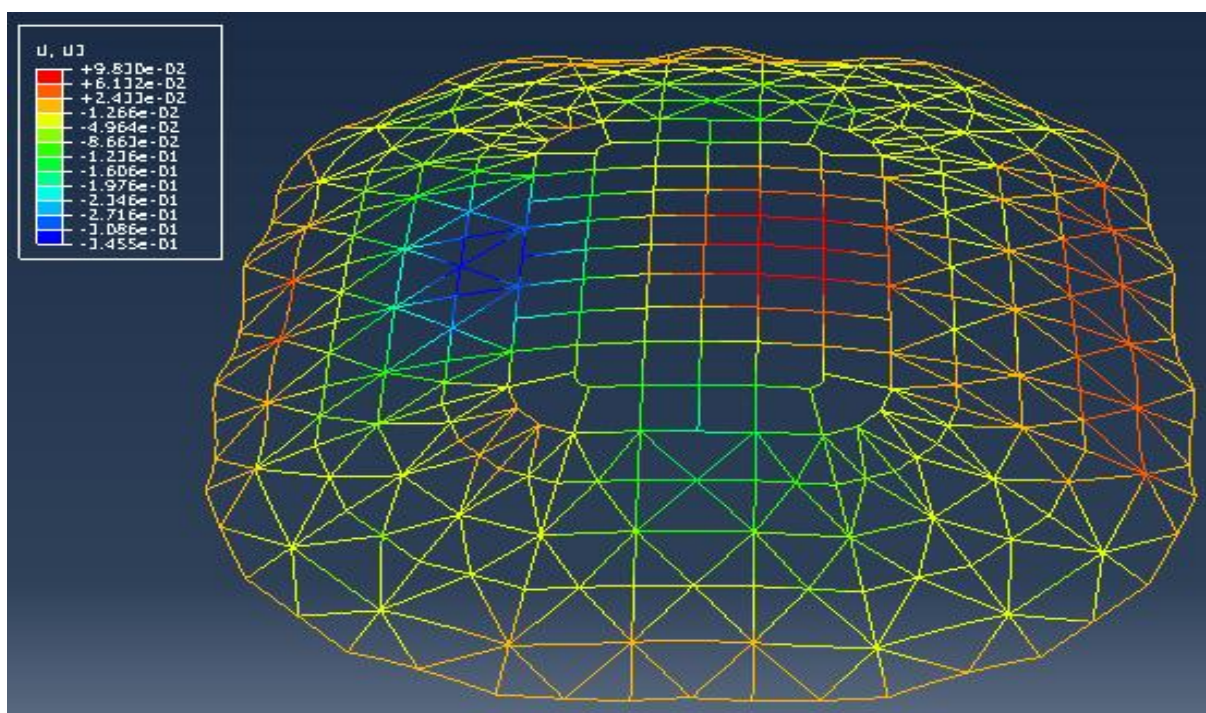
Vrednost mejnega faktorja je pri popolni konstrukciji malenkost nad 1, pri vneseni nepopolnosti pa te vrednosti ne doseže. To pomeni, da konstrukcija ne bo prenesla projektne obtežbe ob deformiranem stanju, ampak obstaja verjetnost, da se bo že pred tem porušila. Seveda je tukaj vprašanje, ali bo do take obtežbe kdaj prišlo ter ali bo imela konstrukcija tako obliko nepopolnosti, kot sem jo predpostavila pri izračunu. Prav tako ni nujno, da bo amplituda nepopolnosti tako velika kot je pri računskem modelu. Vseeno ni najbolj spodbudno, da dobim rezultat, pri katerem mejni faktor ne preseže vrednosti 1.

V projektni dokumentaciji je izračunana mejna vrednost 1,94 – lastna vrednost strehe. Pri prejšnjih primerih (predvsem lok) se je videlo, da nam izračun po teoriji drugega reda poda višje vrednosti mejnih obtežb in lastnih vrednosti. V linearnem območju sta tudi izračun v projektni dokumentaciji in v diplomski nalogi verjetno zelo podobna, v nelinearnem območju pa se naredijo razlike, in to se je pokazalo tudi tukaj.

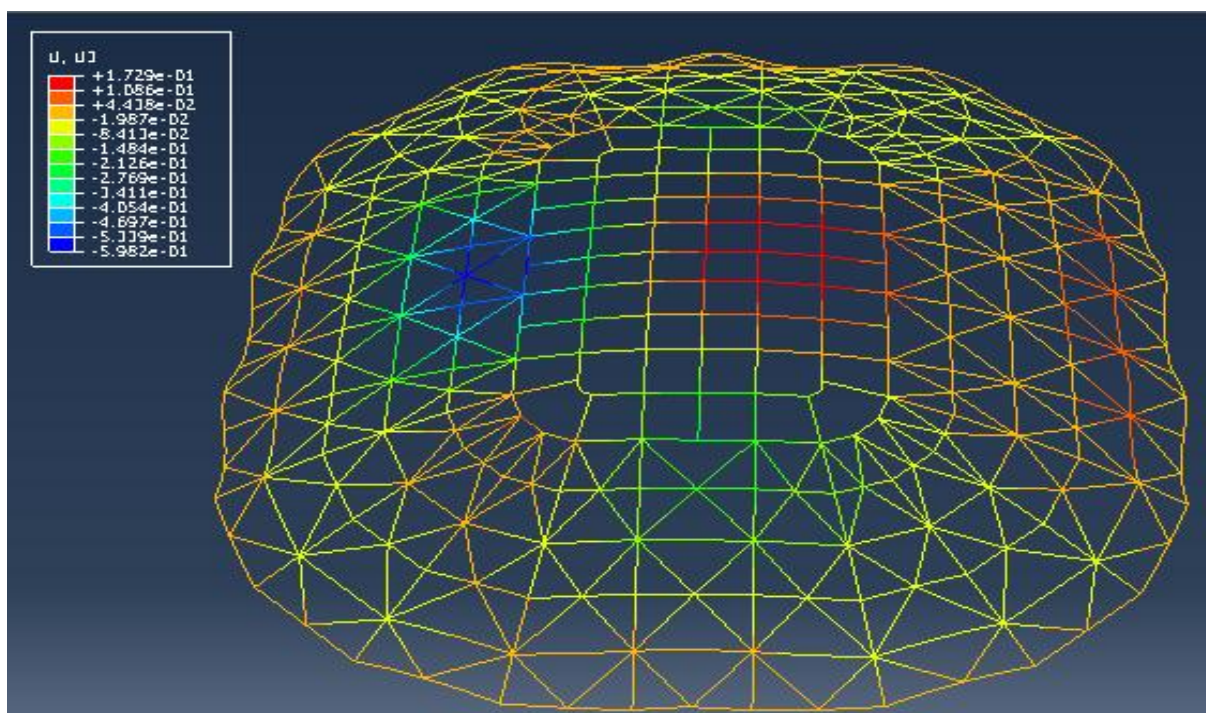
Ko gledamo vrednosti pomikov v preglednici vidimo, kako hitro naraščajo pomiki. LPF faktor se poveča za 0,1, medtem ko se pomik poveča za skoraj enkrat več. To nam samo dokazuje, da se pri mejnih vrednostih vse dogaja zelo hitro.



Slika 63: Deformacijska oblika strehe brez nepopolnosti pri LPF<sub>mejni</sub> (KS1)



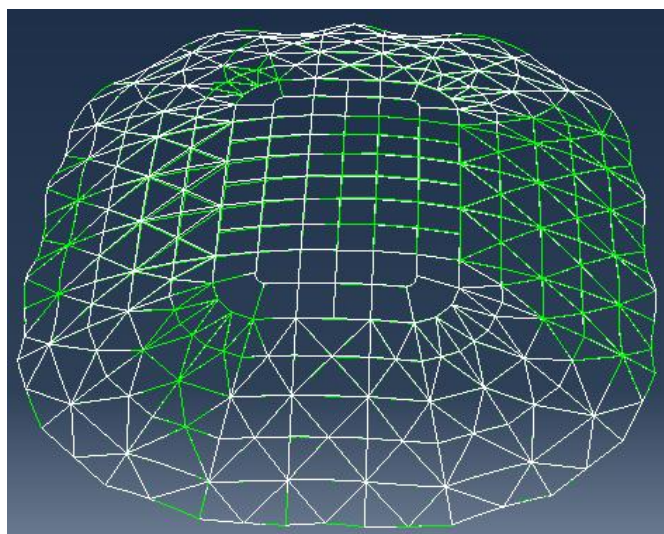
Slika 64: Poves strehe brez nepopolnosti pri LPF=1 (KS1)

Slika 65: Poves strehe brez nepopolnosti pri LPF<sub>mejni</sub> (KS1)

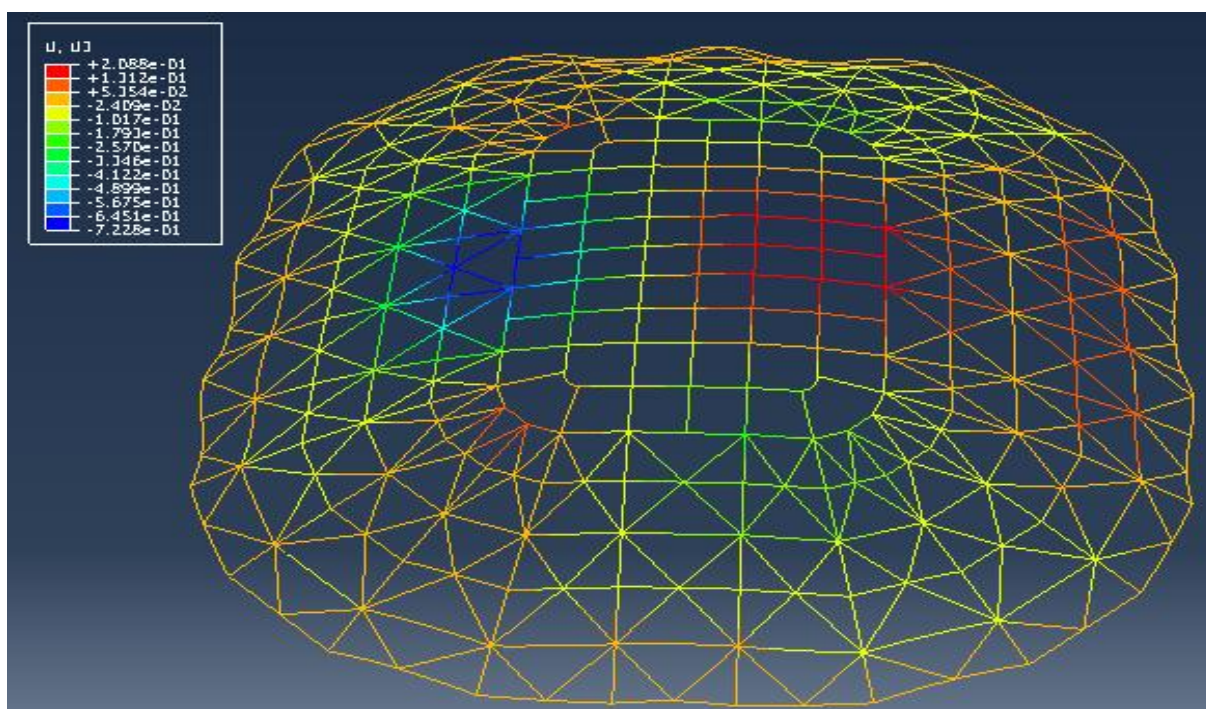
Oblika deformacije je taka, kot je oblika prve lastne vrednosti konstrukcije. Na levem delu strehe, kjer je največja obtežba, se streha povesi, medtem ko se na nasprotni strani in na temenskem delu, streha dvigne. Ko dosežemo dovolj visok nivo obtežbe pa se začne poves povečevati brez ustavljanja in dobimo porušitev.



Ker faktor povečanja obtežbe ne doseže vrednosti 1, je poves pri nepopolnosti 1 in 2 prikazan le pri mejni vrednosti faktorja.

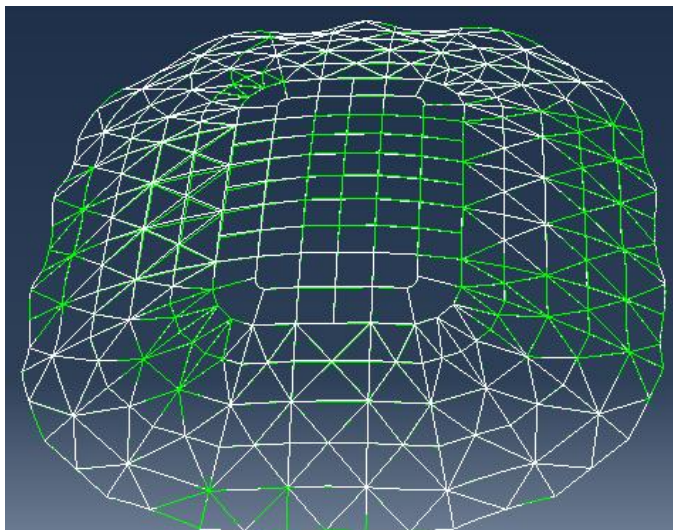
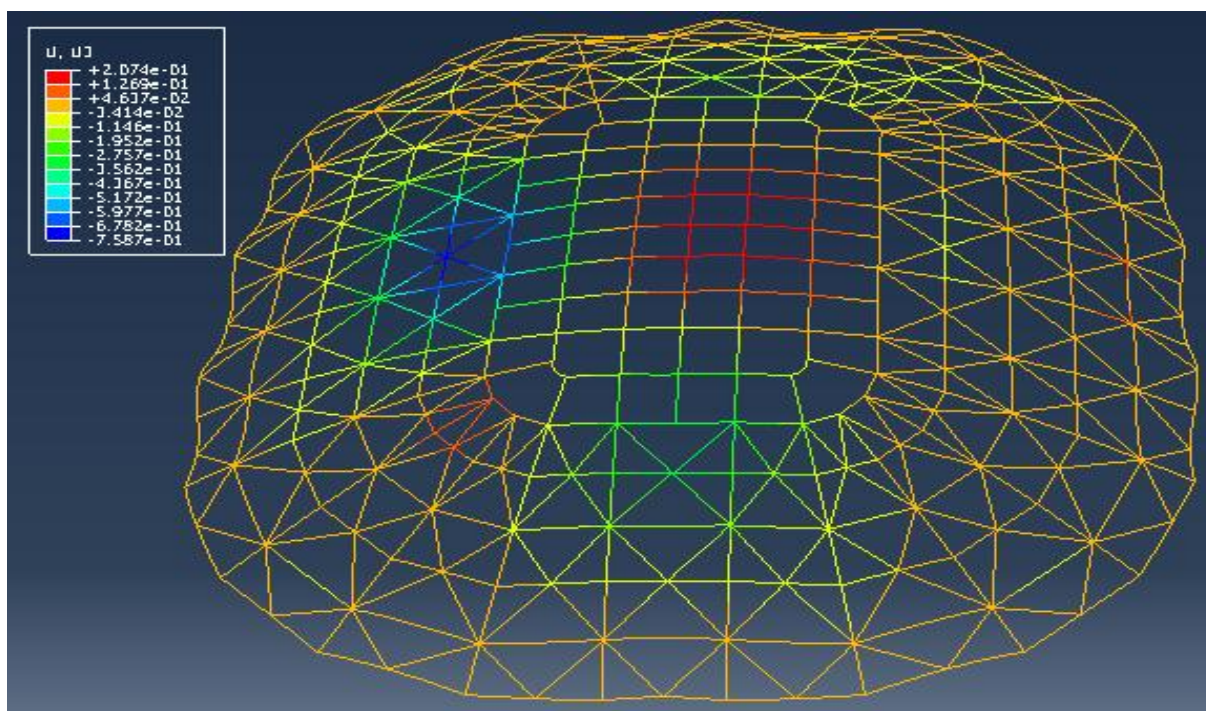


Slika 66: Deformacijska oblika strehe z nepopolnostjo 1 pri  $LPF_{mejni}$  (KS1)



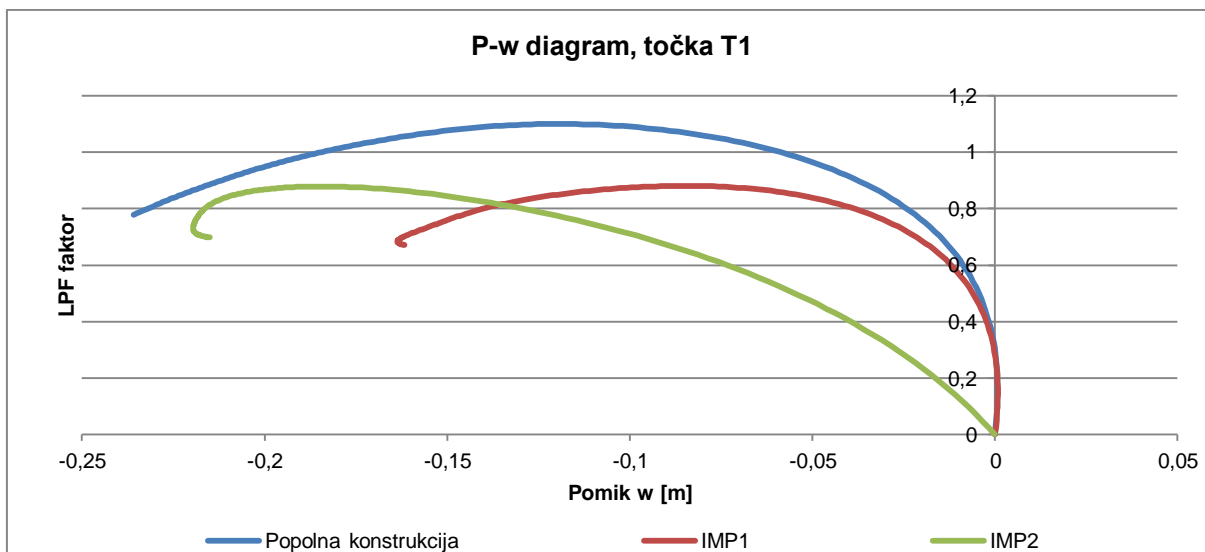
Slika 67: Poves strehe z nepopolnostjo 1 pri  $LPF_{mejni}$  (KS1)

Oblika deformacije je pri strehi z nepopolnostjo 1 enaka kot pri popolni strehi, saj je oblika nepopolnosti enaka kot oblika deformacije popolne strehe. Razlika je vidna v velikosti povesov, ki so pri strehi z nepopolnostjo precej večji, še posebej če upoštevamo dejstvo, da imamo tudi končno obtežbo nižjo. Če primerjamo sliki 66 in 67 lahko vidimo, da je na levi strani strehe z nepopolnostjo poves veliko bolj skoncentriran (večji krog temne modre barve), dvig strehe na nasprotni strani pa je bolj razširjen (rdeča barva). To pomeni, da je deformiranje strehe pri vneseni nepopolnosti večje, večja je razlika med maksimalnim povesom in maksimalnim dvigom, zato je tudi nevarnost nenadne porušitve večja.

Slika 68: Deformacijska oblika strehe z nepopolnostjo 2 pri  $LPF_{mejni}$  (KS1)Slika 69: Poves strehe z nepopolnostjo 2 pri  $LPF_{mejni}$  (KS1)

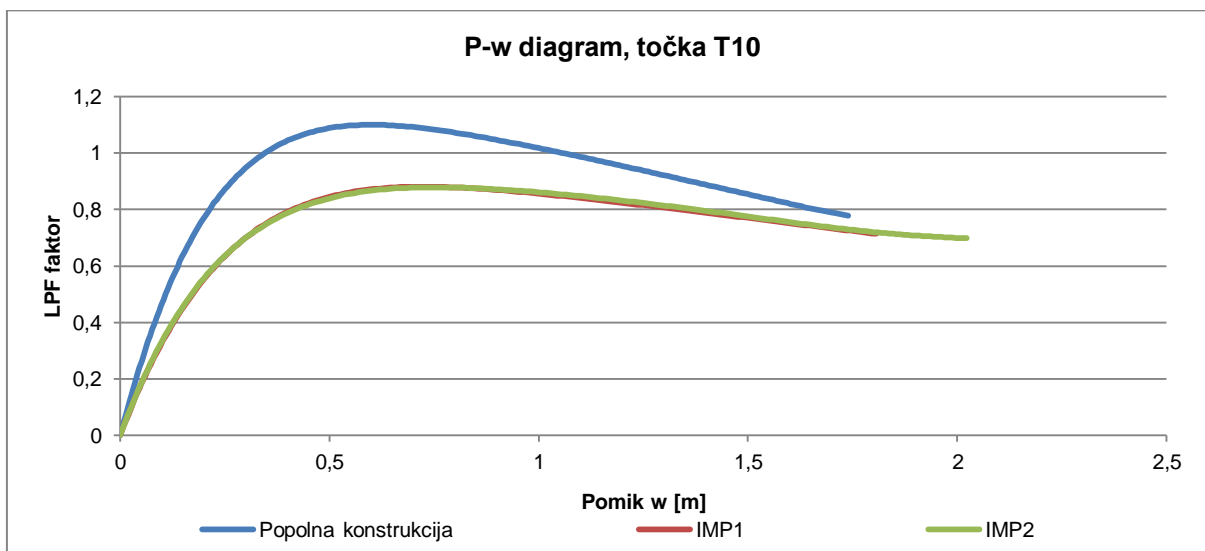
Pričakovala sem, da se bo pri mejnem obtežnem faktorju vpliv nepopolnosti 2 na obliki deformacije bolj opazen. Vpliv je zelo malo viden, kar pomeni, da v tem delu prevlada deformiranje zaradi obtežbe in ne več zaradi nepopolnosti. Vpliv nepopolnosti se nekoliko pozna pri povesu strehe, kjer je na sprednjem območju temnejša zelena barva, ki označuje poves, kot pa pri popolni konstrukciji in nepopolnosti 1, kar pomeni, da se je ta del nekoliko bolj povesil kot pri ostalih primerih. Bolj pa bo to vidno na P-w diagramih, ki so prikazani v nadaljevanju.

Odločila sem se, da prikažem P-w diagrame za točke T1, T10, T12, T7 in T13.



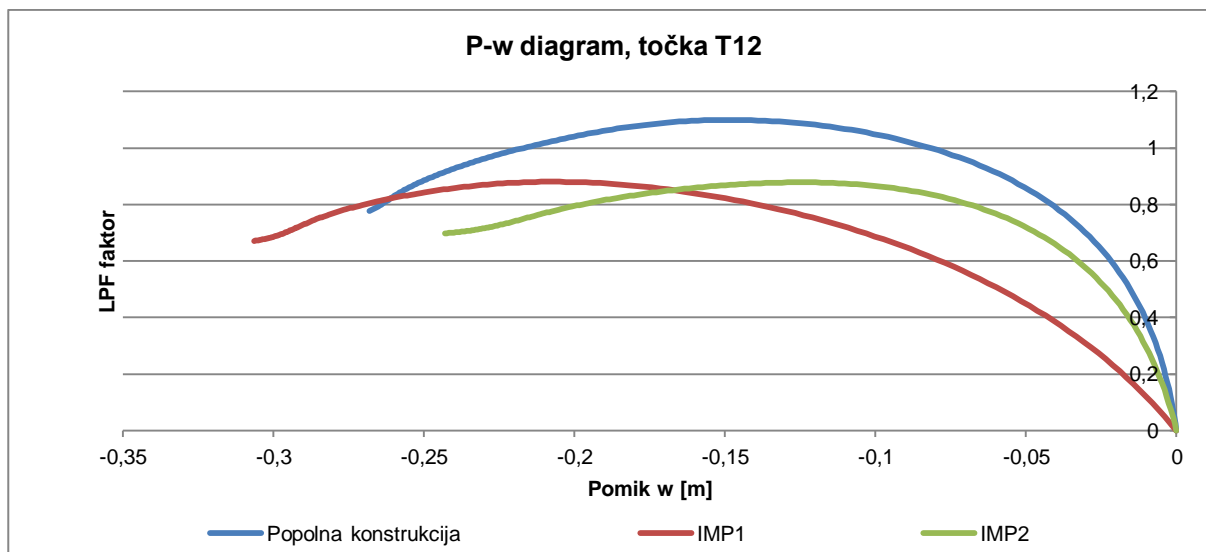
Graf 36: P-w diagram točke T1 (KS1)

Na P-w diagramu točke T1 vidimo, da se v vseh treh primerih točka dvigne. Pri nepopolnosti 2 je že v začetnem delu dvignjena, saj je taka oblika nepopolnosti, pri popolni konstrukciji in nepopolnosti 1 pa se v začetnem delu točka ne premakne oziroma se minimalno povese, nato pa se počasi začne dvigovanje točke. Pri strehi z nepopolnostjo lahko na koncu grafa opazimo, da se začne pomik točke manjšati. Razlog je preskok sistema in porušitev – najprej se poruši del strehe z največjo obtežbo, nato pa za seboj potegne še ostalo konstrukcijo.



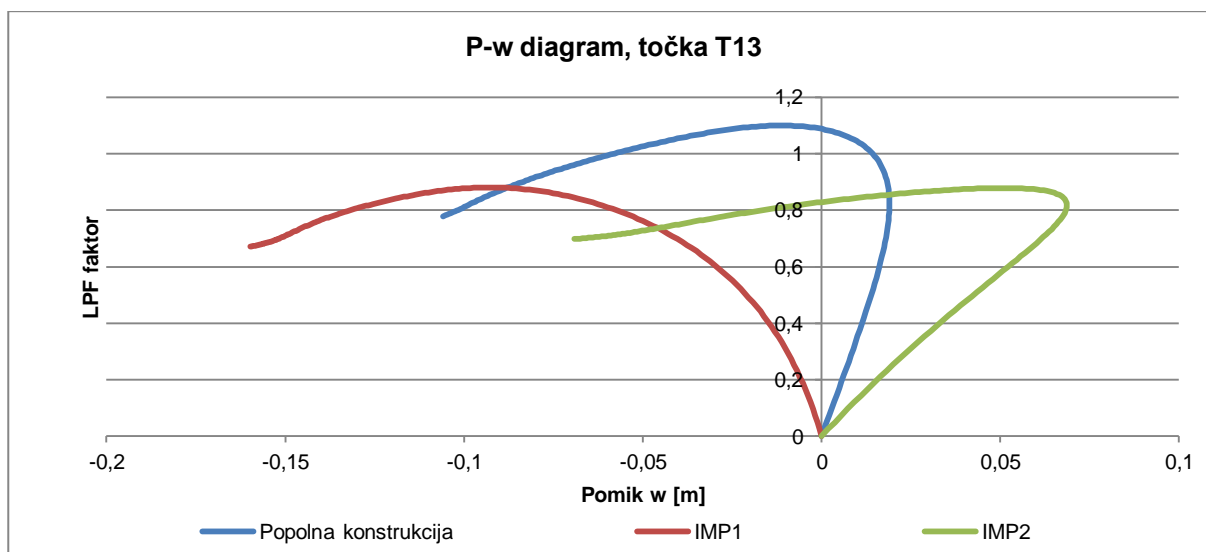
Graf 37: P-w diagram točke T10 (KS1)

Točka T10 je tista, ki se na celotni strehi najbolj povese. Vidimo lahko, da pomiki pri mejni vrednosti LPF faktorja presežejo vrednosti 0,7 m, za tem pa se začnejo hitro povečevati, tj. pri majhni spremembi vrednosti faktorja LPF je sprememba pomika velika, in presežejo vrednost 1,5 m, kar pa seveda tudi pri takem razponu strehe pomeni porušitev.



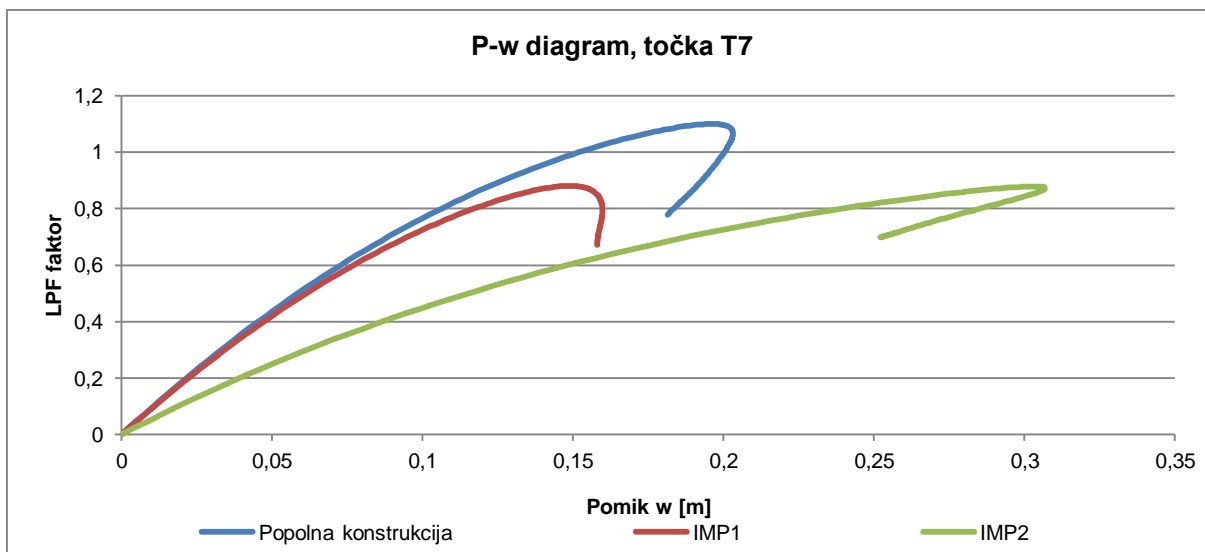
Graf 38: P-w diagram točke T12 (KS1)

Točka T12 je točka na konstrukciji, pri kateri je dvig najvišji. Vidimo, da se dvig pojavi pri vseh treh primerih, največji (in tudi najhitreje rastoč) je pri strehi z nepopolnostjo 1. Razlog je v tem, da je že v začetnem stanju konstrukcija take oblike (ob upoštevanju nepopolnosti), da je točka T12 nad nivojem popolne konstrukcije. Pri popolni konstrukciji in nepopolnosti 3 se pomik počasi večja, večja pa se tudi po doseženi mejni obtežbi.



Graf 39: P-w diagram točke T13 (KS1)

Točka T3 je na isti strani strehe kot točka T12, le da je pomaknjena bliže k podporam. Vidimo lahko, da se pri popolni konstrukciji in nepopolnosti 2 točka najprej povese, in šele ko pridemo v bližino mejnega faktorja se začne dvigovati in proti koncu je že nad svojo osnovno lego. Drugače pa je to pri nepopolnosti 1. Tam že oblika nepopolnosti določi, da se točka dvigne, sama obtežba pa ni dovolj velika, da bi temu nasprotovala, zato se točka tudi pri večanju obtežbe dviguje.



Graf 40: P-w diagram točke T7 (KS1)

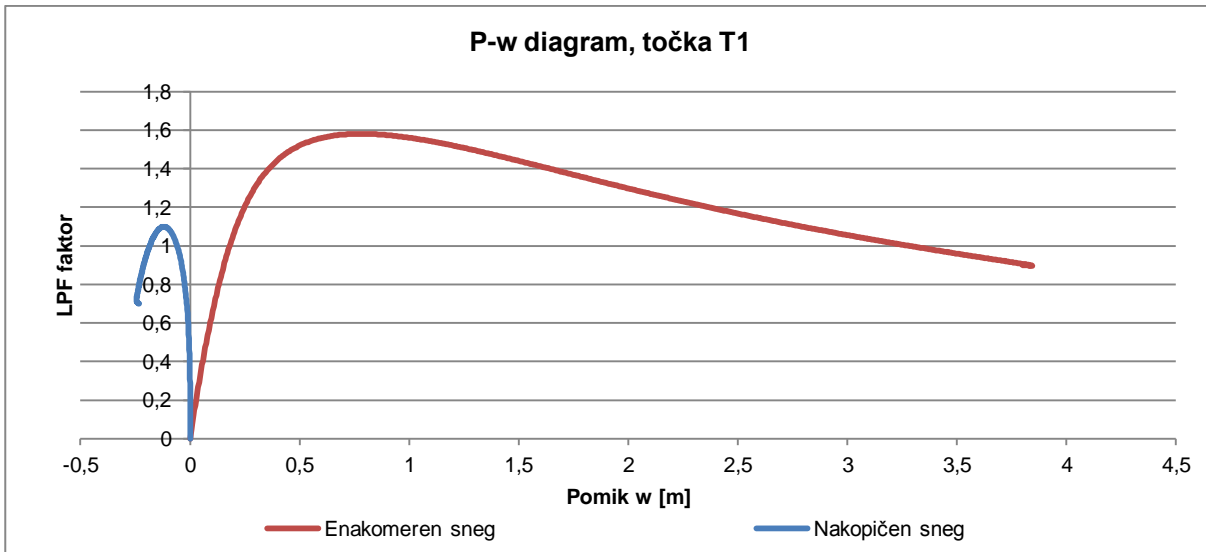
Točka T7 se nahaja na sprednjem delu strehe. Povese pri njej je relativno majhen (če ga primerjamo s točko T10). Največji je pri nepopolnosti 2, saj tako narekuje oblika nepopolnosti. Po doseženem mejnem faktorju se povese točke začne manjšati, verjetno zaradi večanja povese v točki T10, ki, po dosegu mejnega faktorja, bolj ali manj vpliva na celotno streho.

Težava oziroma nevarnost pri strehi je, da se ne bi oblikovale take nepopolnosti, ki bi močno znižale nosilnost strehe in s tem povzročile kolaps pri nižji obtežbi, kot je projektirano. Zaradi tega dejstva me je zanimalo, kolikšna je maksimalna obtežba s snegom, da je pri nepopolnosti 1, ki je upoštevana v računu, mejni faktor višji od 1.

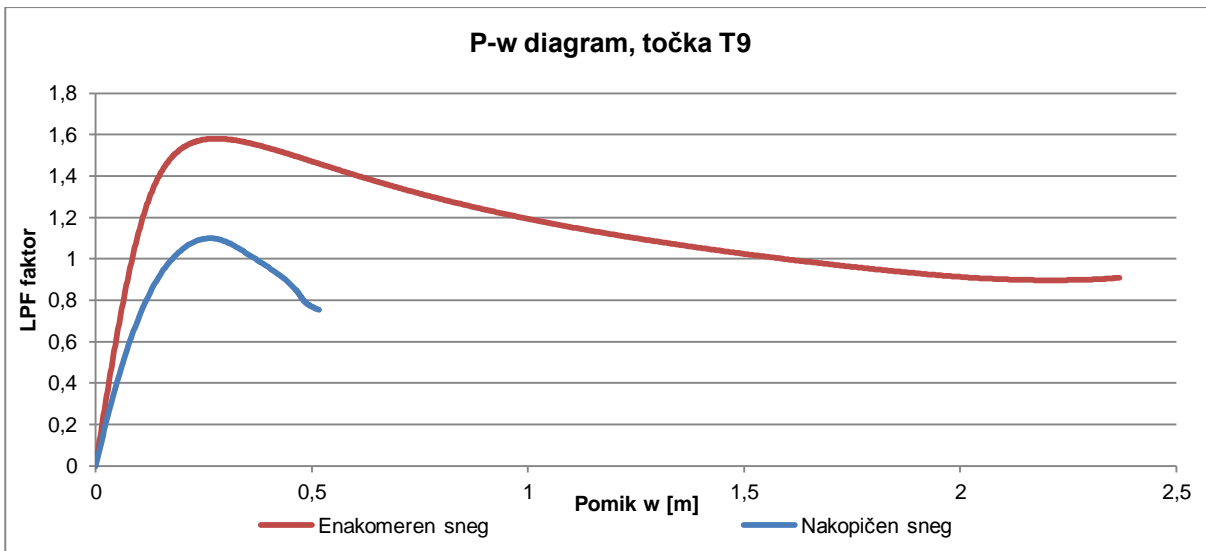
Po nekaj poskusih sem dobila odgovor. Streha z nepopolnostjo enake oblike kot je njena prva lastna vrednost in z amplitudo  $L/600$ , prenese **82 %** projektirane obtežbe s snegom. To pomeni, da namesto zahtevanih  $2,567 \text{ kN/m}^2$  na višji strani nakopičenja, prenese  $2,10 \text{ kN/m}^2$ . Mejni faktor obtežbe pri popolni konstrukciji v takem primeru znaša 1,268.

#### 4.4.3 Primerjava obnašanja konstrukcije pri obtežnih kombinacijah »enakomeren sneg« in »kopičenje snega 1«

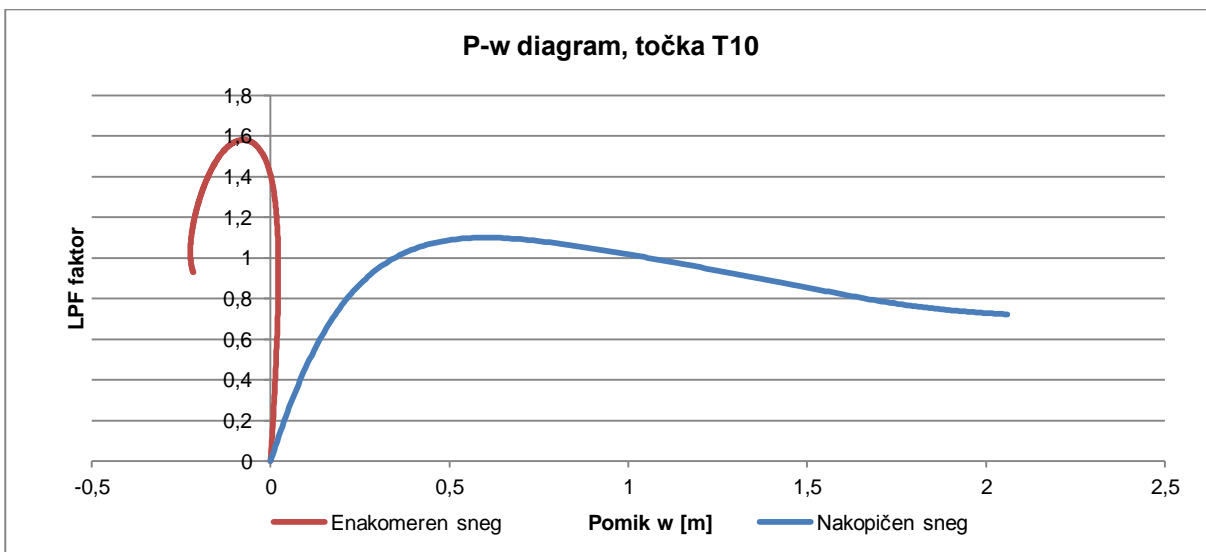
Pri obtežni kombinaciji, kjer imamo enakomeren sneg in kopičenje 1, sem pri popolnih konstrukcijah izračun ravnotežne poti podaljšala še dlje, kot je vidno na zgornjih P-w diagramih. Za točke T1, T9, T10, T12 in T13 (točke, ki se nahajajo na prerezu A-A, ki je označen na sliki 41 – določanje obtežbe z nakopičenim snegom) sem v nadaljevanju prikazala rezultate izračunane ravnotežne poti.



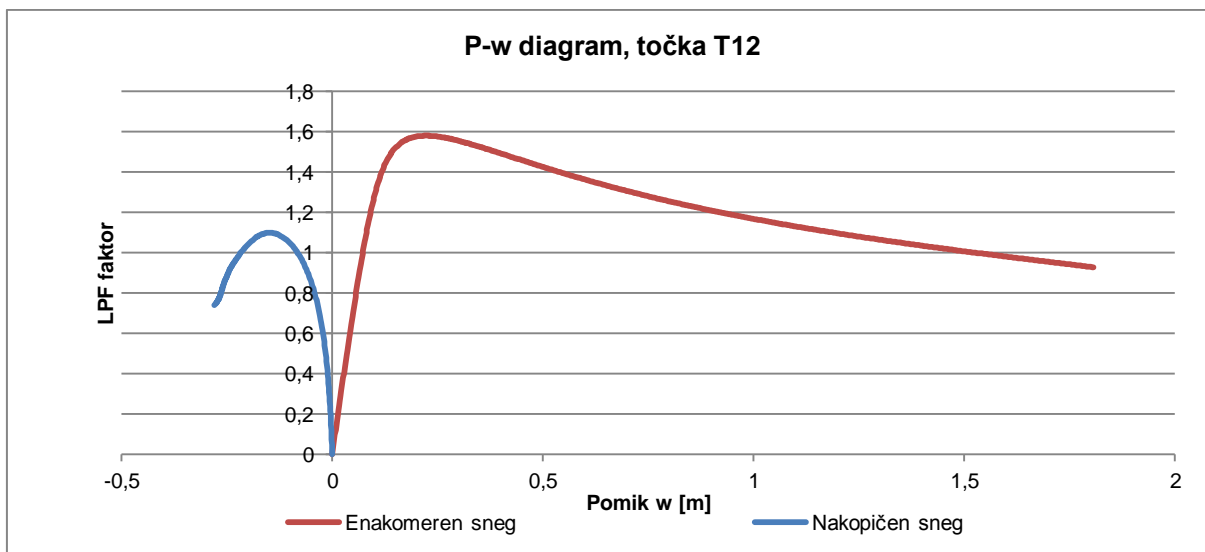
Graf 41: P-w diagram točke T1 popolne strehe pri enakomerni obtežbi in nakopičeni obtežbi 1



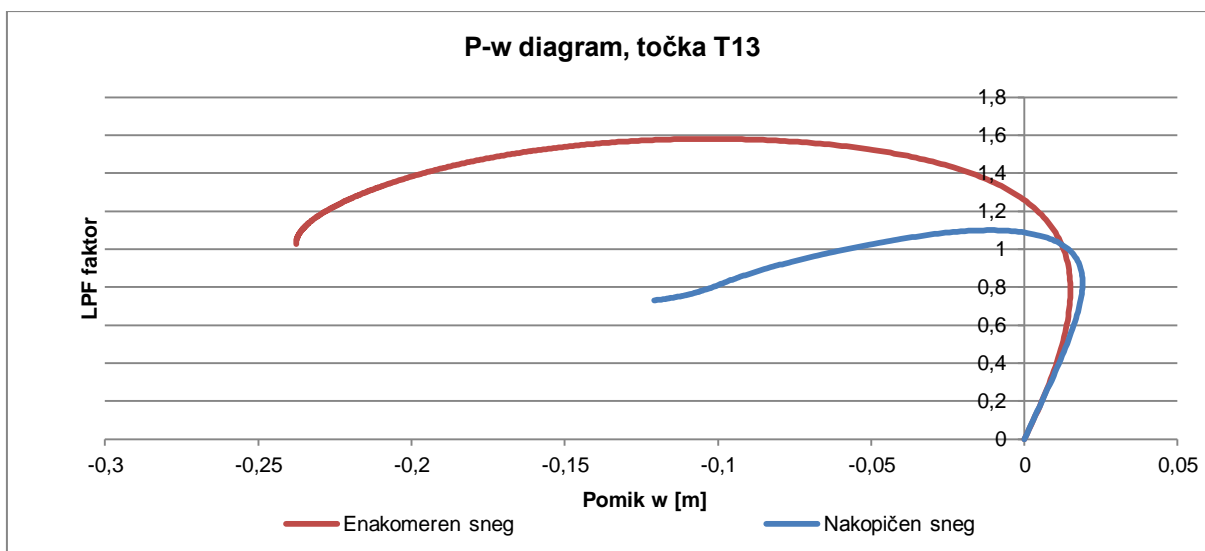
Graf 42: P-w diagram točke T9 popolne strehe pri enakomerni obtežbi in nakopičeni obtežbi 1



Graf 43: P-w diagram točke T10 popolne strehe pri enakomerni obtežbi in nakopičeni obtežbi 1



Graf 44: P-w diagram točke T12 popolne strehe pri enakomerni obtežbi in nakopičeni obtežbi 1



Graf 45: P-w diagram točke T13 popolne strehe pri enakomerni obtežbi in nakopičeni obtežbi 1

Oblike ravnotežnih poti so zelo zanimive. Pri nakopičenem snegu se lepo vidi, kako se pri točkah T9 in T10 pomik veča brez prekinitve. Pomik se sedaj meri v metrih in nič več v nekaj deset centimetrih. Točka T10 na koncu računa doseže povprečje nekaj več kot 3 m, točka T9 pa približno 30 cm več. Temenska točka se ves čas dviga, njena maksimalna vrednost je 25 cm. Točki na drugi strani strehe tudi vztrajata z dvigom. Program Abaqus določi ravnotežno pot tudi za nadaljnje obnašanje točk, vendar to nadaljevanje ravnotežnih poti ni več zanesljivo.

Diagrami so zanesljivi do prikazanega območja, nadaljevanje, ki ga program Abaqus sicer nariše, pa je vprašljivo. Točka T1 doseže v končni točki grafa povprečje 4 m točki, T9 in T10, ki se nahajata na levem delu strehe (območje, kjer je sicer višja del nakopičene obtežbe) sta povešeni za 2,5 m oziroma 2 m, točki na nasprotnem delu strehe pa sta dvignjeni za približno 20 cm. Po opisu lahko rečem, da je to enaka oblika, kot oblika prve lastne vrednosti konstrukcije.

#### 4.4.4 Rezultati ostalih obtežnih kombinacij

Kritične vrednosti ostalih obtežnih kombinacij, ki sem jih obravnavala, sem zbrala v naslednji preglednici. Za primerjavo z ostalimi rezultati sem v preglednici zapisala tudi že obravnavani kombinaciji enakomernega snega in kopičenje snega 1.

Preglednica 19: Mejne vrednosti popolne in nepopolne strehe vseh obtežnih kombinacij

Obtežna kombinacija	POPOLNA KONSTRUKCIJA		NEPOPOLNOST 1	NEPOPOLNOST 2
	LPF <sub>mejni</sub>	Prva lastna vrednost	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>
ES	1,581	1,959	1,363	1,37
KS1	1,099	1,8	0,88	0,878
KS1-G	0,978	1,641	0,787	0,784
KS1-A	1,009	1,712	0,828	0,809
KS2	1,459	1,856	1,141	1,058
KS2-B	1,283	1,814	1,182	0,916
KS3	1,166	2,046	0,932	0,924
KS4	1,608	2,312	1,508	1,119
KS5	1,157	1,909	0,904	0,894
KS6	1,536	2,212	1,433	1,062
KS7	1,2	1,862	0,915	0,911
KS8	1,572	2,178	1,476	1,065

Obtežne kombinacije z najnižjim mejnim faktorjem obtežbe imajo nakopičenje snega v smeri A-A, tj. v smeri krajšega razpona. Razlike med njimi so v obliki obtežbe (slike 42-49). Kombinacija KS1-G, ki ima mejni obtežni faktor nižji od 1 že pri popolni konstrukciji, ima enako porazdelitev obtežbe kot KS1, le velikost obtežbe je višja – upoštevala sem vrednost, ki je podana v projektni dokumentaciji. Kombinacija KS1-A je taka, kot so pri izračunu upoštevali projektanti pri analizi strehe dvorane v Stožicah. Lastna vrednost, ki je izračunana v njihovem primeru, je pri 1,94. Razlika je zaradi uporabljene metode računanja – pri kombinaciji KS1-A je uporabljena metoda dolžine lokov v programu Abaqus, v projektu pa je račun narejen po teoriji drugega reda. Med tema dvema metodama so razlike v rezultatih opisane že pri analizi loka v ravnini.

V vseh primerih, kjer je upoštevano kopičenje v krajši smeri, imamo pri strehi z nepopolnostjo mejni faktor obtežbe nižji od 1, medtem ko je pri kopičenju v daljši smeri le v enem primeru mejni LPF faktor pod vrednostjo 1. To se zgodi pri kombinaciji KS2-B, tj. kombinacija obtežbe, ki je bila obravnavana v projektni dokumentaciji. Lastnost te razporeditve je, da kopičenje ni upoštevano na temenskem delu strehe, ampak samo na začetnem delu strehe do temena. Kot kaže, je taka razporeditev nakopičene obtežbe s snegom v daljši smeri najbolj neugodna.

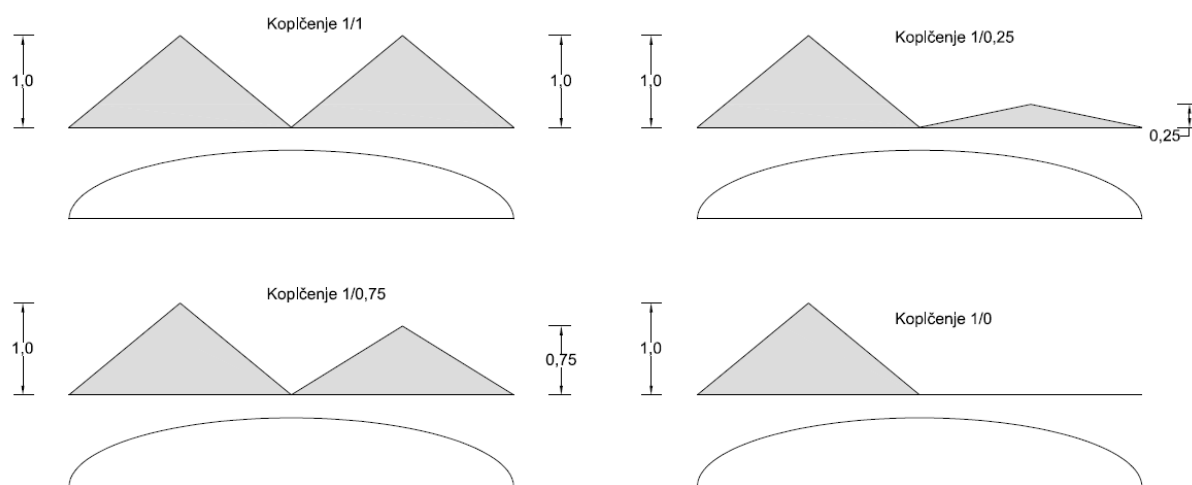
Ker se je za najbolj neugodno izkazala obtežna kombinacija kopičenje snega 1 in nepopolnost 1, sem se pri nadaljnjih izračunih osredotočila na ta primer, za primerjavo pa



sem računala še obtežno kombinacijo z enakomernim snegom, saj je tudi pomembna in je v vsakdanjem življenju večkrat prisotna realna obtežba kot nakopičen sneg.

#### 4.5 Vpliv višine kopičenja snega

Na velikost mejne nosilnosti in obnašanje strehe, zagotovo vpliva tudi višina nakopičenega snega na nasprotni strani. Pri obtežni kombinaciji z nakopičenim snegom je na manj obremenjeni strani faktor obtežbe 0,5. Sedaj pa sem ta faktor povečala na 1 in 0,75 ter zmanjšala na 0,25 in 0. Nove oblike obtežbe z nakopičenim snegom so prikazane na sliki 70.



Slika 70: Različne višine obravnavanega nakopičenega snega

Za vsako kopičenje sem izračunala mejni faktor pri strehi brez nepopolnosti ter pri strehi z nepopolnostjo ter lastno vrednost pri popolni strehi.

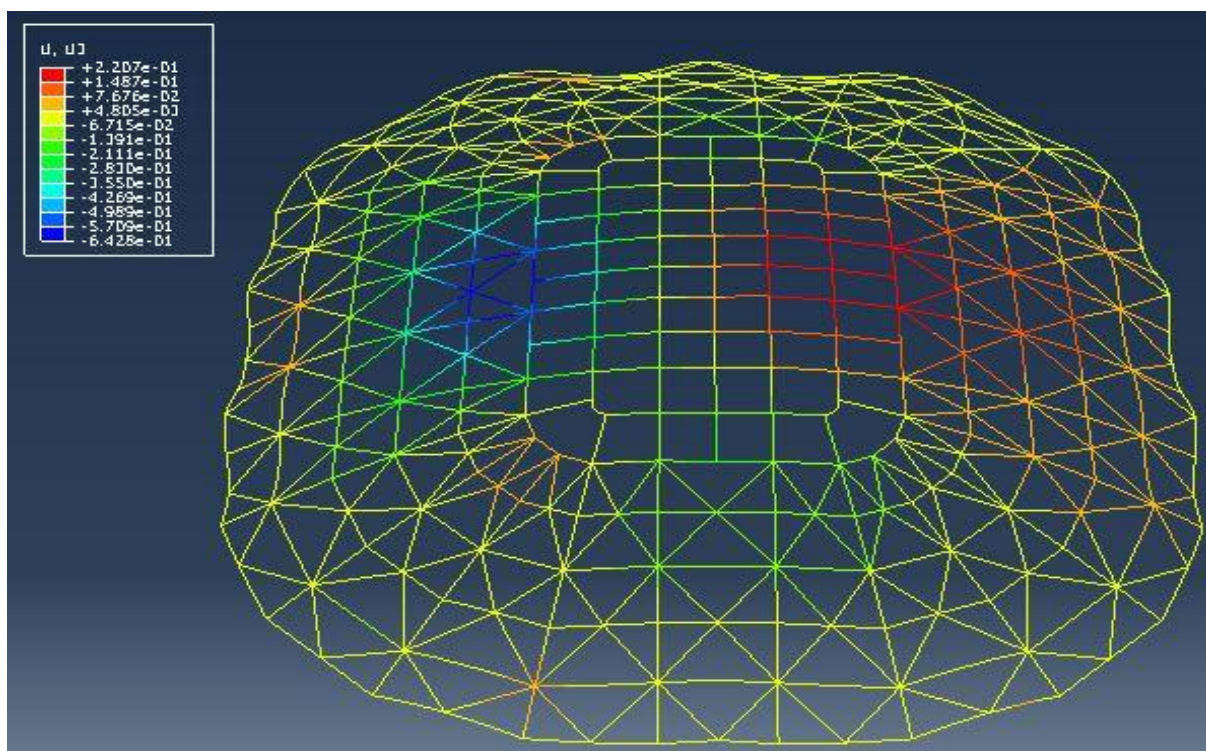
Preglednica 20: Mejne vrednosti strehe brez/z nepopolnostjo pri različnem nivoju kopičenja obtežbe

Oblika kopičenja	POPOLNA KONSTRUKCIJA			NEPOPOLNOST	
	LPF <sub>mejni</sub>	Pomik w [m]	1. LV	LPF <sub>mejni</sub>	Pomik w [m]
<b>Kopičenje 1/1</b>	1,144	0,5074	1,626	0,889	0,7042
<b>Kopičenje 1/0,75</b>	1,115	0,5673	1,729	0,885	0,7059
<b>Kopičenje 1/0,5</b>	1,099	0,5982	1,800	0,880	0,7228
<b>Kopičenje 1/0,25</b>	1,089	0,6292	1,849	0,876	0,7411
<b>Kopičenje 1/0</b>	1,076	0,6428	1,887	0,870	0,7467

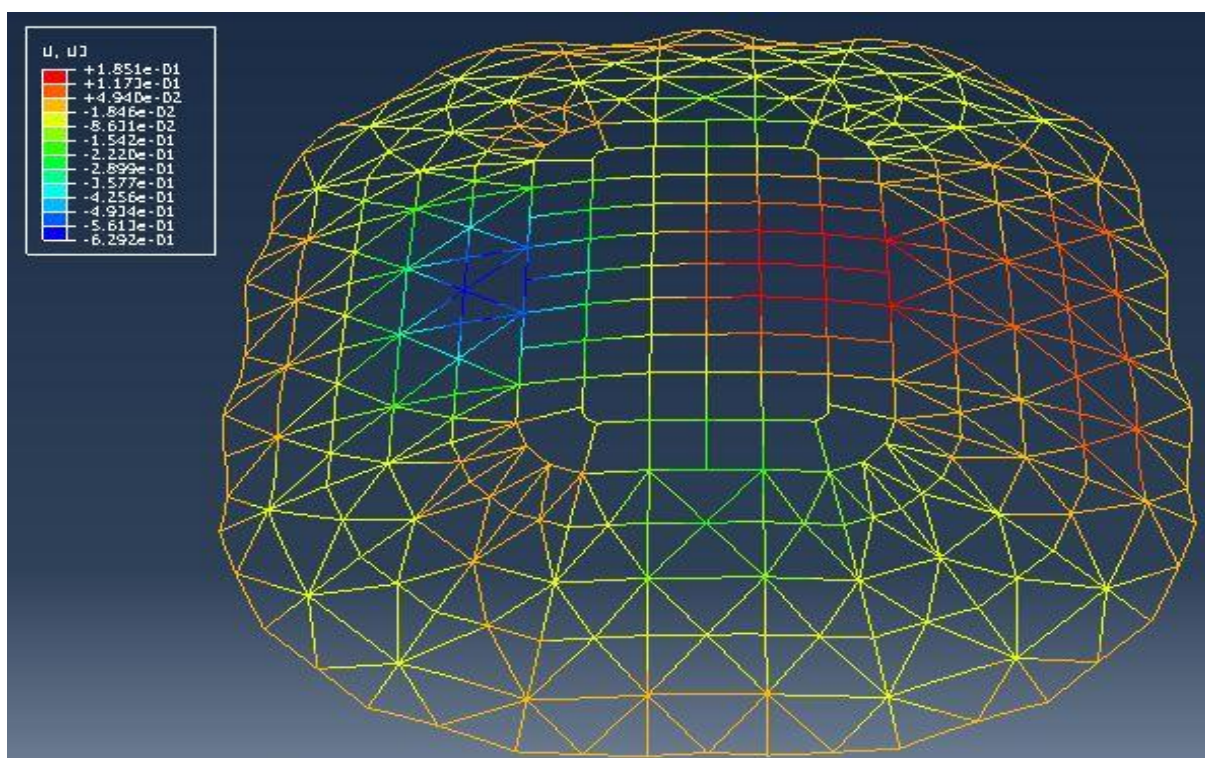
Vidimo, da višina nakopičenega snega ugodno vpliva na mejno nosilnost strehe. Razlog je v tem, da kopičenje na dodatni strani deluje za osnovno stran kot protiutež. Če te protiuteži ni, se lok v temenu lažje zavrti, posledica tega pa so večji pomiki na obteženi strani in nižja nosilnost. V primeru, ko pa protiutež imamo, se konstrukcija v temenu težje zavrti, zato je pomik nižji, višja pa je nosilnost. Nekako je tudi pričakovano, da bo višja obtežba nakopičenja bolje delovala kot nižja, saj dobimo z višanjem obtežbe bolj simetričen sistem ter bolj podoben enakomerni obtežbi. Kot je videti iz predhodnih rezultatov, je enakomerna obtežba za samo nosilnost najbolj ugodna. V nadaljevanju bom prikazala povese vseh petih

primerov kopičenja pri maksimalni obtežbi pri strehi brez nepopolnosti ter nekaj P-w diagramov za značilne točke. Potrebno je poudariti, da razlike me najvišjim in najnižjim mejnim faktorjem obtežbe niso velike.

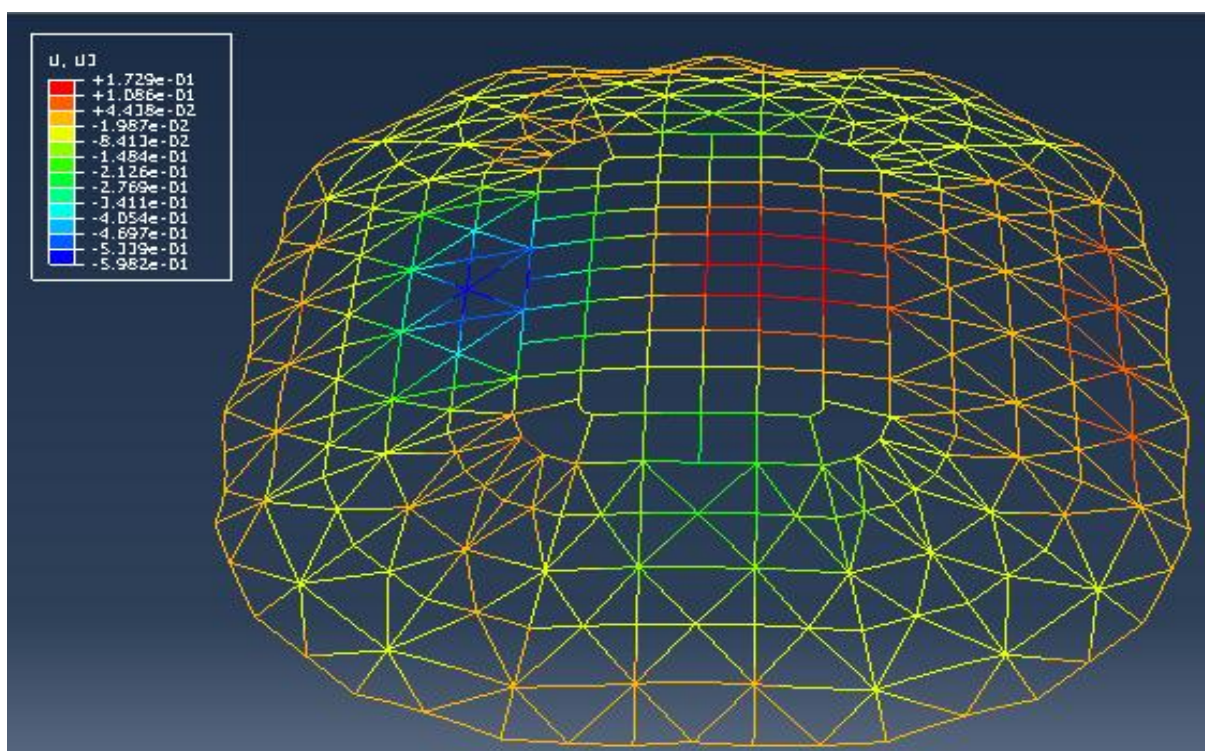
Mejna nosilnost pri strehi z nepopolnostjo nima tako velikega razpona med najmanjšo in največjo vrednostjo. V vseh primerih je med 0,87 in 0,89, kar pomeni, da pri nepopolni konstrukciji velikost kopičenja ne igra velike vloge. Tudi pomiki so zelo podobni, največja razlika med pomikom pri popolni konstrukciji in pomikom pri strehi z nepopolnostjo je pri kopičenju 1/1 (skoraj 20 cm), najmanjša razlika pa pri kopičenju 1/0 (10 cm). Razlog, da so vse mejne vrednosti približno na istem nivoju, je v obliki nepopolnosti. Pri popolni konstrukciji deluje kopičenje na dodatni strani kot protiutež, da se streha v temenu ne zasuka, pri nepopolnosti pa zasuk že vnesemo, tako da kopičenje poskuša samo umiliti ta zasuk. Ker oblika nepopolnosti prevlada nad obtežbo, poleg tega pa se tudi sama streha pri višjem LPF faktorju enako deformira, se vpliv protiuteži pri nepopolni konstrukciji ne pozna, zato so vse mejne vrednosti nosilnosti na enakem nivoju.



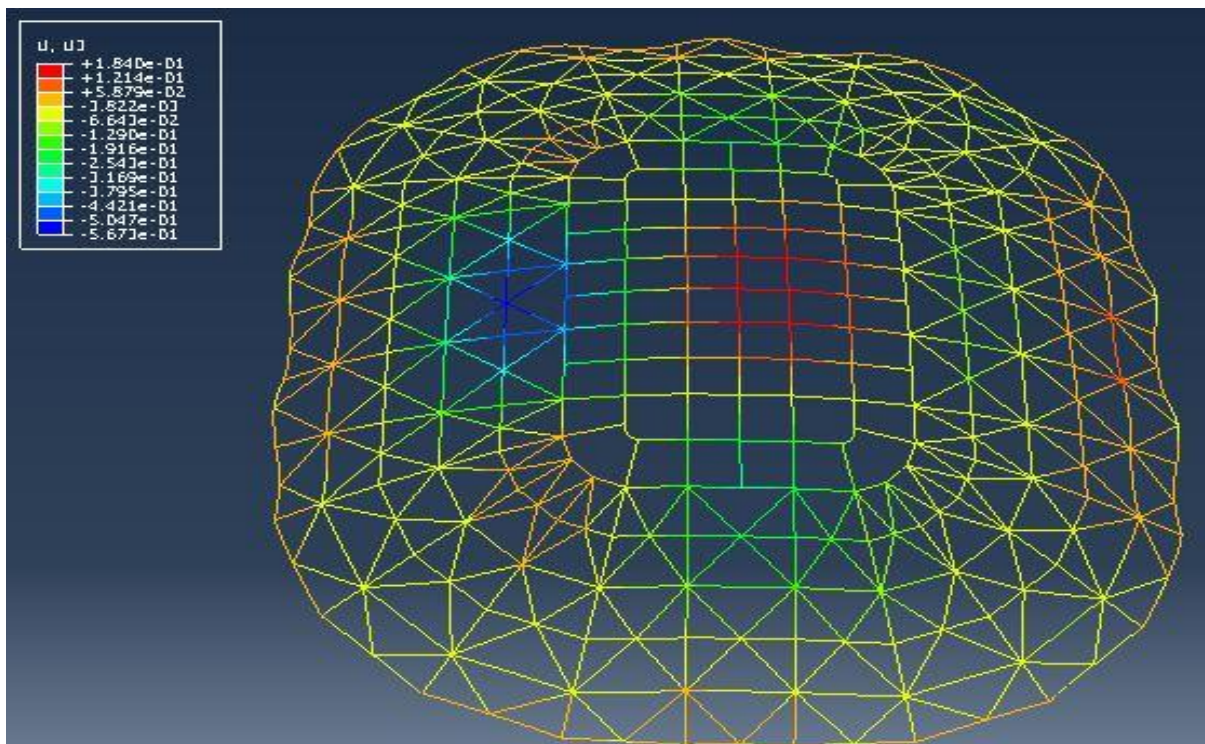
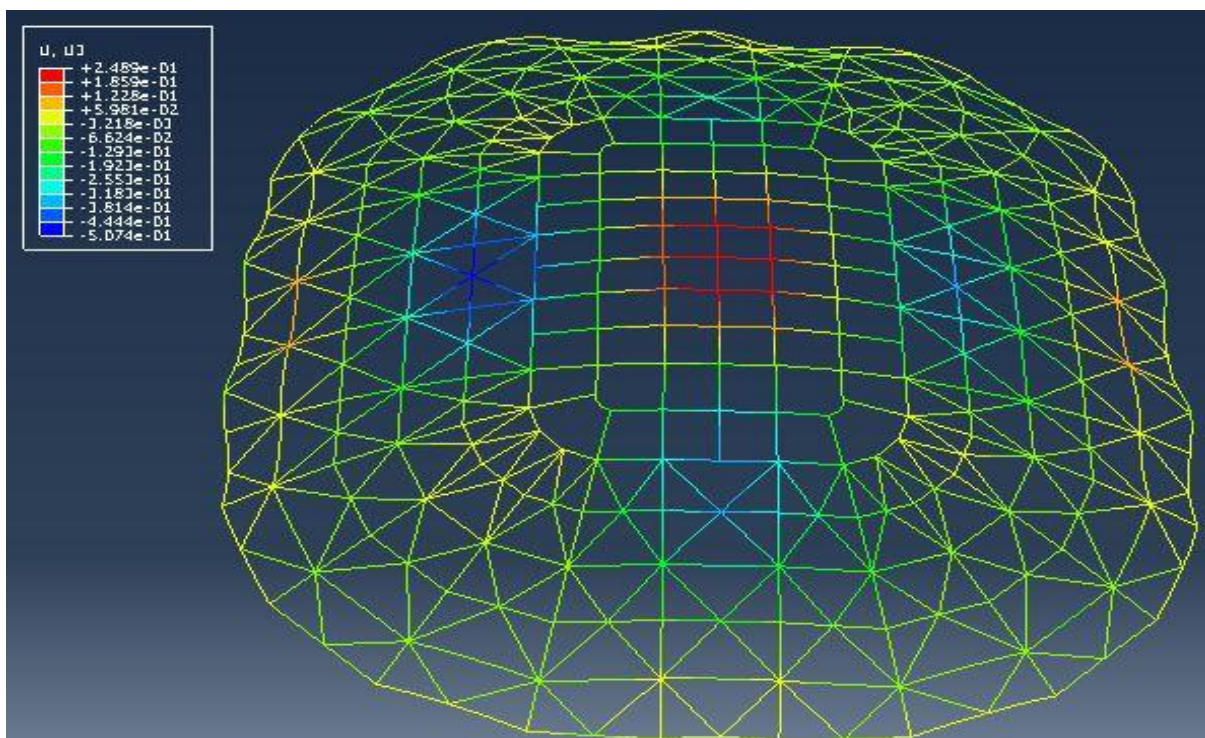
Slika 71: Poves strehe brez nepopolnosti pri  $LPF_{mejni}$  za primer kopičenja 1/0



Slika 72: Poves strehe brez nepopolnosti pri  $LPF_{mejni}$  za primer kopičenja 1/0,25



Slika 73: Poves strehe brez nepopolnosti pri  $LPF_{mejni}$  za primer kopičenja 1/0,5

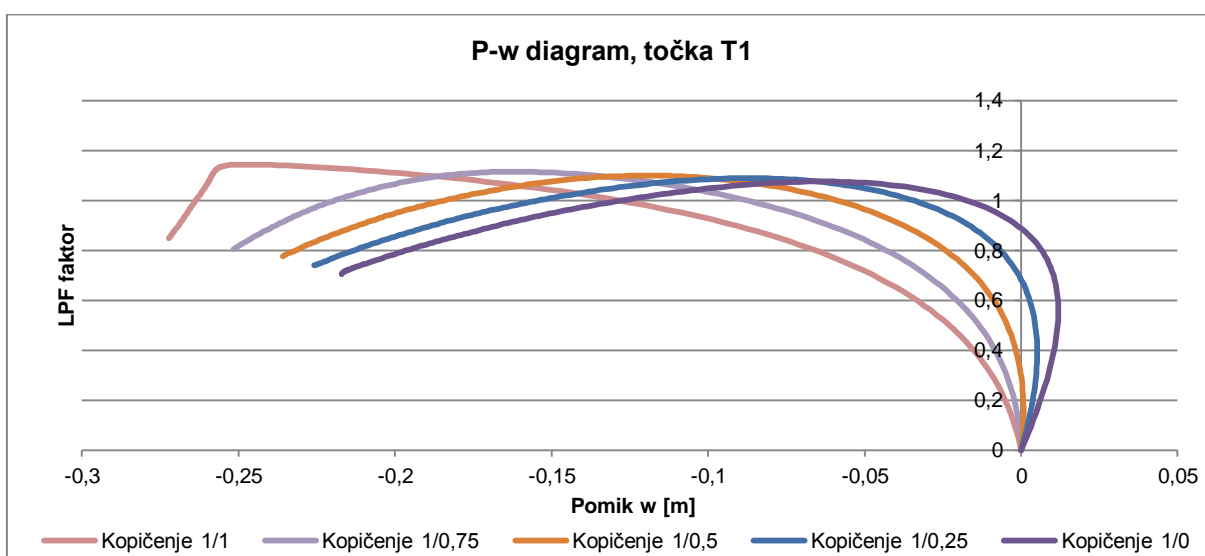
Slika 74: Poves strehe brez nepopolnosti pri  $LPF_{mejni}$  za primer kopičenja 1/0,75Slika 75: Poves strehe brez nepopolnosti pri  $LPF_{mejni}$  za primer kopičenje 1/1

Ko primerjamo poves strehe vseh petih primerov kopičenja pri strehi brez nepopolnosti lahko lepo vidimo, kako se spreminja oblika povesov. Pri kopičenju 1/0 je na levi strani strehe poves, na desni strani pa veliko območje dviga konstrukcije. Bolj kot se viša faktor kopičenja, manjša je površina dviga in pri kopičenju 1/1 je dvig samo na temenskem delu. Na desni

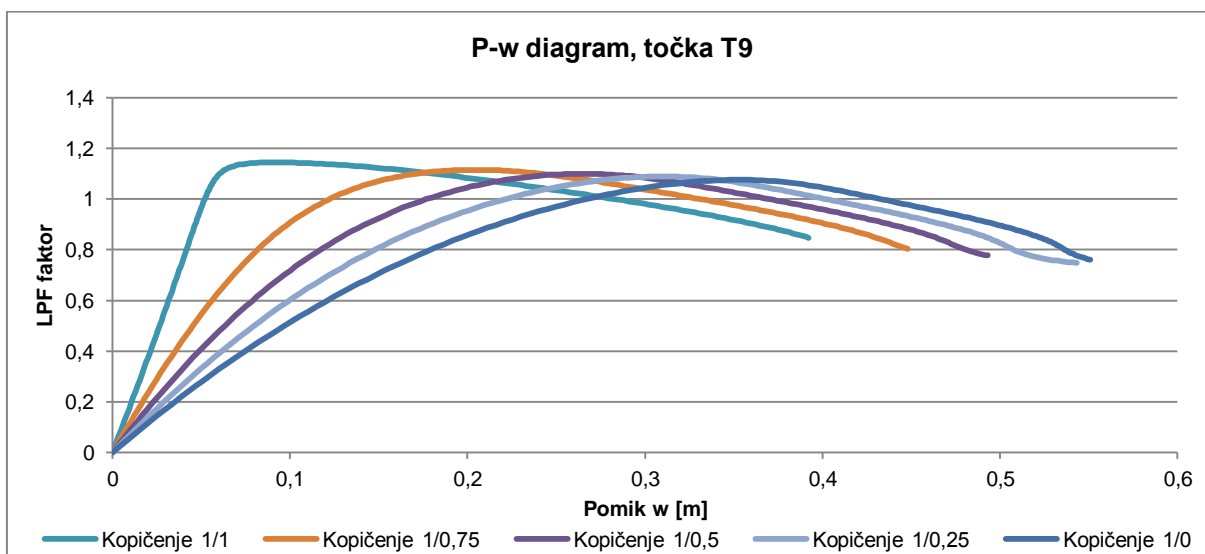
strani strehe, kjer je pri obtežbi 1/0 dvig, imam sedaj povese, velikost povesa pa je manjša, kot na levi strani strehe.

Točke, v katerih so prikazani P-w diagrami, so razporejene po loku na sredini strehe s krajšim razponom. Te točke so T1, T9, T10, T12 in T13.

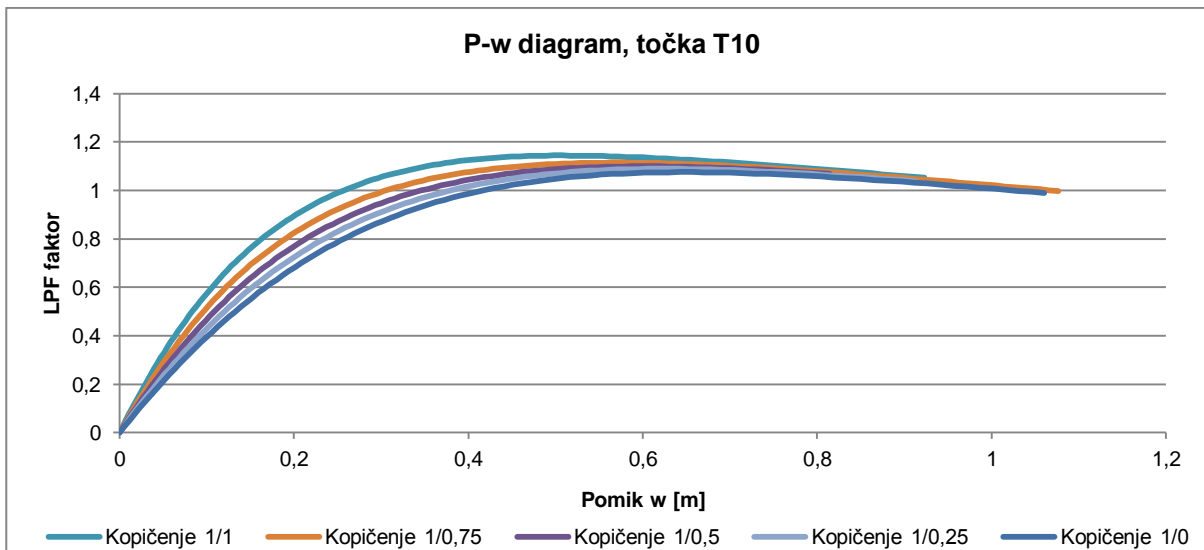
Prvi trije diagrami (točke T1, T9 in T10) so si v vseh primerih nakopičenja podobni, saj so na strani, kjer je obtežba enaka. Pri točki T1 je razlika v tem, da se pri manjšem nakopičenju na desni strani (1/0 in 1/0,25) teme najprej nekoliko povese, nato pa se začne dvigovati. To lahko vidimo tudi na sliki 71, kjer so prikazani pomiki pri kopičenju snega 1/0. Vidi se, da je jedro dvigovanja pomaknjeno bolj levo od temena, medtem ko je pri kopičenju 1/1 (slika 75), jedro dvigovanja ravno v temenu. Pri nakopičenju z večjo obtežbo se teme že takoj dviga. Vidimo tudi, da je pomik točke večji pri višjem faktorju kopičenja.



Graf 46: P-w diagram v točki T1 strehe brez nepopolnosti z različnimi nivoji kopičenja snega

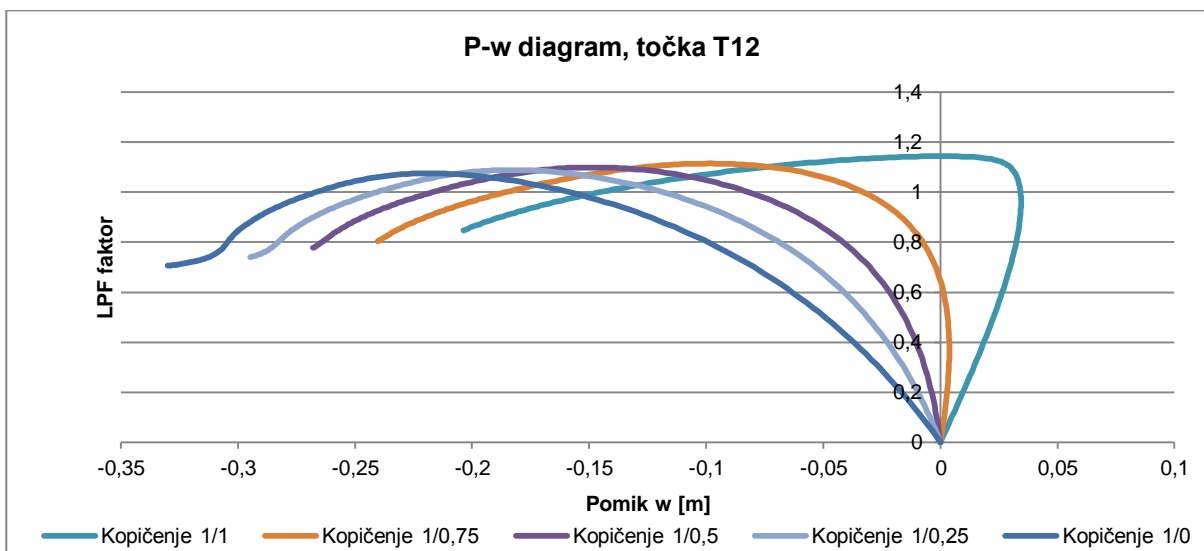


Graf 47: P-w diagram v točki T9 strehe brez nepopolnosti z različnimi nivoji kopičenja snega

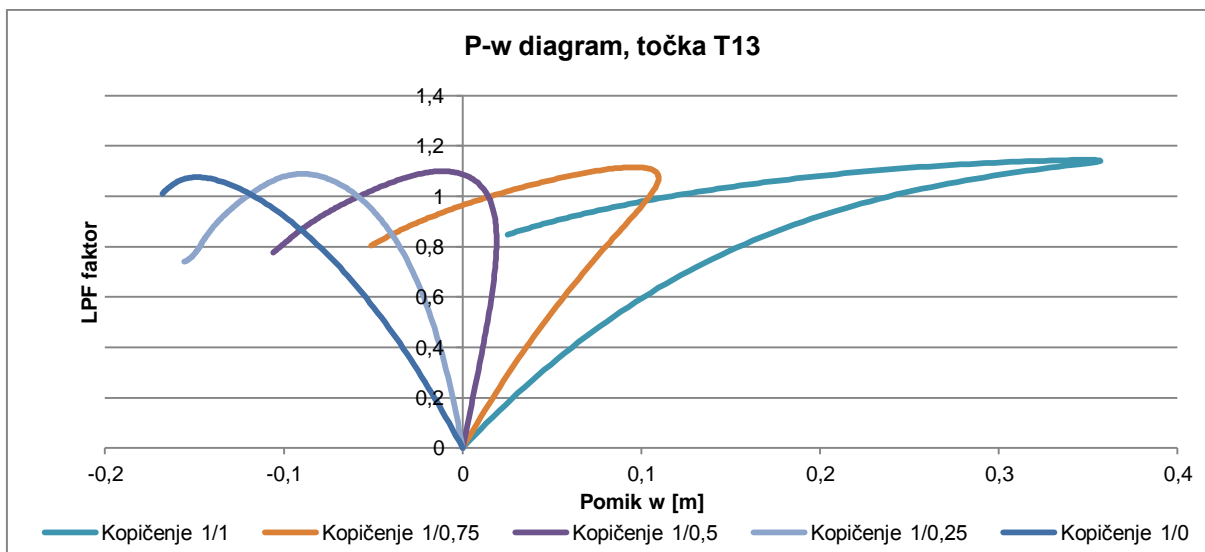


Graf 48: P-w diagram v točki T10 strehe brez nepopolnosti z različnimi nivoji kopičenja snega

Točki T9 in T10 se v vseh primerih povesta, največji povos pa je pri nižjem faktorju kopičenja. Razlog za največje pomike pri nižjem faktorju nakopičene obtežbe je v samem deformiranju. Deformacija strehe ima obliko enako prvi nihajni obliki, tj. na levi strani je povos, na desni strani je dvig. Pri obtežbi z višjim faktorjem kopičenja obtežbe pa je na levi in desni strani povos, v temenskem delu pa dvig. Celoten možen povos se tako razdeli na dva dela, zato je povos na levi strani nižji, kot v primeru, ko imamo nizek faktor kopičenja.



Graf 49: P-w diagram v točki T12 strehe brez nepopolnosti z različnimi nivoji kopičenja snega



Graf 50: P-w diagram v točki T13 strehe brez nepopolnosti z različnimi nivoji kopičenja snega

Točki T12 in T13 se nahajata na desnem delu strehe, tj. na delu, kjer se obtežba med primeri razlikuje, zato je tudi razlika v P-w diagramih večja. Vidi se, da se pri nižjem faktorju obtežbe ta del strehe začne takoj dvigovati (faktor 1/0, 1/0,25 in 1/0,5 pri T12), pri višjih vrednostih obtežbe pa se streha najprej povesi, ko pa dosežemo mejni faktor nosilnosti oziroma se mu približamo, pa se začne hitro dvigovati (pri majhni spremembi sile je sprememba pomika velika). Razlog za to je povečevanje pomikov na nasprotni strani strehe, ki za seboj potegne obnašanje celotne konstrukcije.

Zaključim lahko, da simetrično nakopičenje, tj. enak nivo obtežbe na obeh straneh strehe, ugodno vpliva na mejno nosilnost strehe. Razlike v mejni nosilnosti niso velike, najbolj vidne so pri popolni konstrukciji, kjer je razlika v mejnem faktorju 0,07. Pri strehi z nepopolnostjo je razlika v mejnem faktorju še nižja – samo 0,02.

#### 4.6 Vpliv amplitude nepopolnosti

Nepopolnost v vseh izračunanih primerih zmanjša mejno nosilnost celotne strehe, v večini primerov se mejni faktor obtežbe spusti pod vrednost 1. Zanimalo me je, kako sama amplituda nepopolnosti vpliva na velikost kritične obtežbe – če je amplituda višja ali nižja od predpisane vrednosti v standardu. Izračuni so narejeni na primeru obtežbe z enakomerno porazdeljenim snegom ter z nakopičenim snegom v krajši smeri strehe.

Osnovna velikost amplitude je  $L/600$ , tj. 0,162 m, kar predstavlja 100 % nivo nepopolnosti. Pogledala sem, kakšen je odziv konstrukcije pri nivoju 25 %, 50 %, 75 %, 125 % in 150 % osnovnega nivoja nepopolnosti. V preglednici 21 so zapisane vrednosti amplitude nepopolnosti pri različnih nivojih nepopolnosti.

Preglednica 21: Amplitude nepopolnosti pri različnem nivoju nepopolnosti

Oznaka nepopolnosti (na grafu)	Nivo nepopolnosti	Amplituda nepopolnosti [m]
IMP0	0 – popolna k.	0
IMP25	25%	0,041
IMP50	50%	0,0811
IMP75	75%	0,122
IMP100	100%	0,162
IMP125	125%	0,203
IMP150	150%	0,243

#### 4.6.1 Obtežna kombinacija z enakomernim snegom (ES)

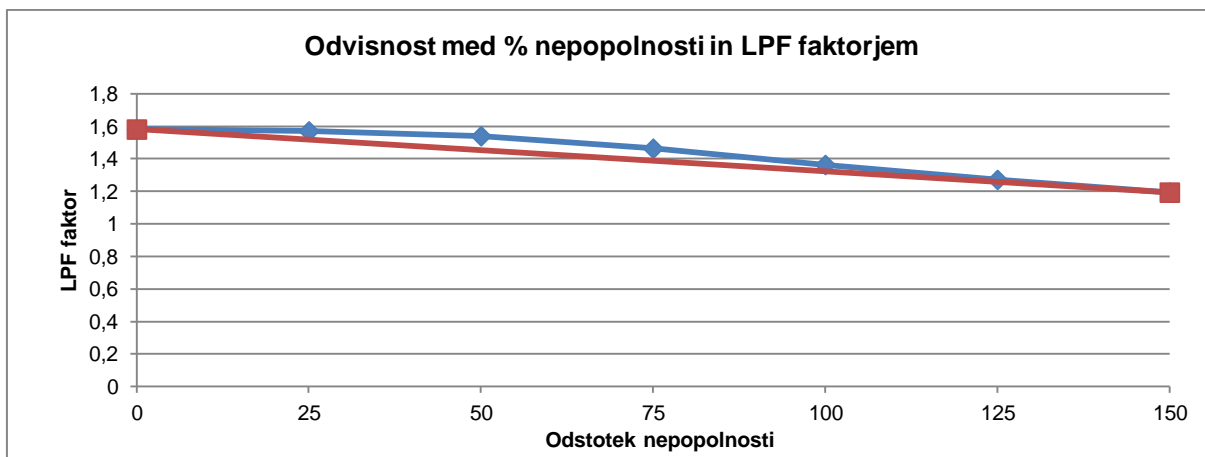
Rezultate izračunov bom predstavila v preglednici, kjer so zbrane mejne nosilnosti pri posamezni nepopolnosti, za tipične točke bom prikazala P-w diagrame, kjer se bo videlo obnašanje konstrukcije.

Preglednica 22: Faktorji mejne nosilnosti pri različnem nivoju nepopolnosti in enakomerni obtežbi s snegom

Nepopolnost	LPF <sub>mejni</sub>	Poves w [m]
IMP0	1,581	0,7811
IMP25	1,570	0,7895
IMP50	1,539	0,8155
IMP75	1,463	0,774
IMP100	1,363	0,7623
IMP125	1,271	0,7882
IMP150	1,193	0,824

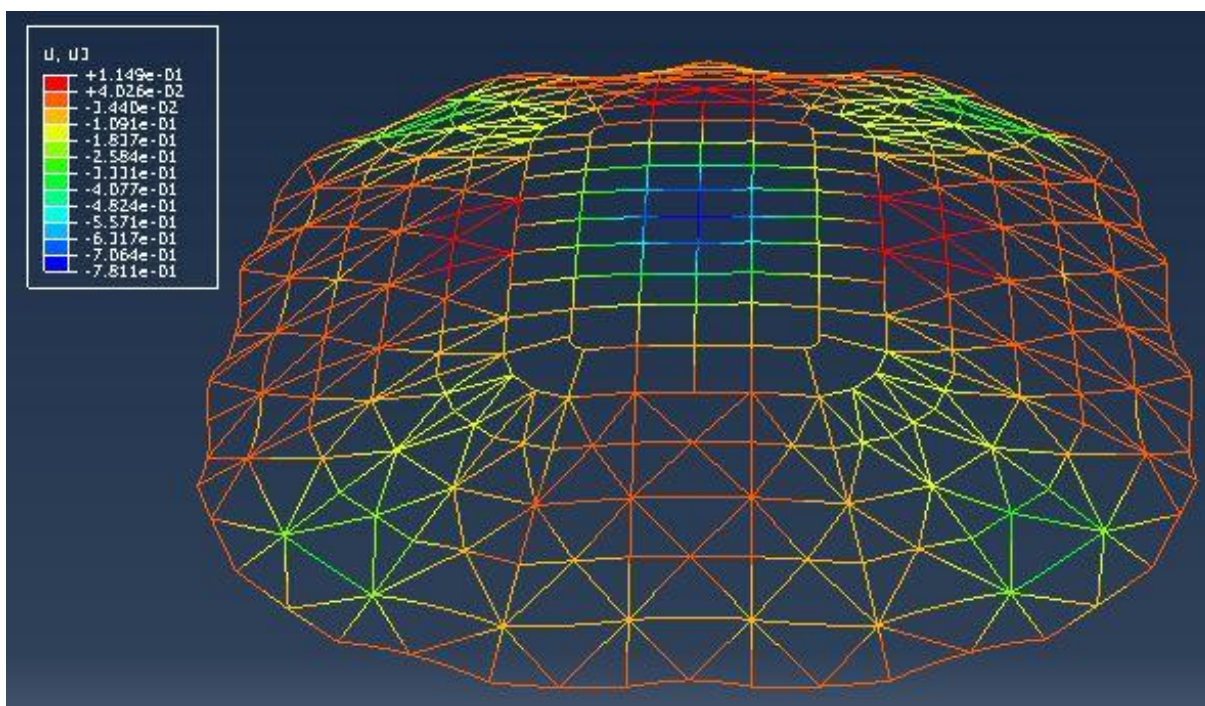
Nosilnost konstrukcije se pri večanju amplitude nepopolnosti manjša. Na grafu 51 lahko vidimo, da padec obtežbe ni linearen. Rdeča črta na grafu prikazuje linearen padec med najvišjo in najnižjo vrednostjo mejnega faktorja, modra črta pa dejansko padanje glede na rezultate izračunov. Pri manjši vneseni amplitudi vrednost mejnega faktorja nosilnosti namreč manj pade kot kasneje, ko vnesemo večjo nepopolnost. V vseh primerih je vrednost kritičnega faktorja nad 1.



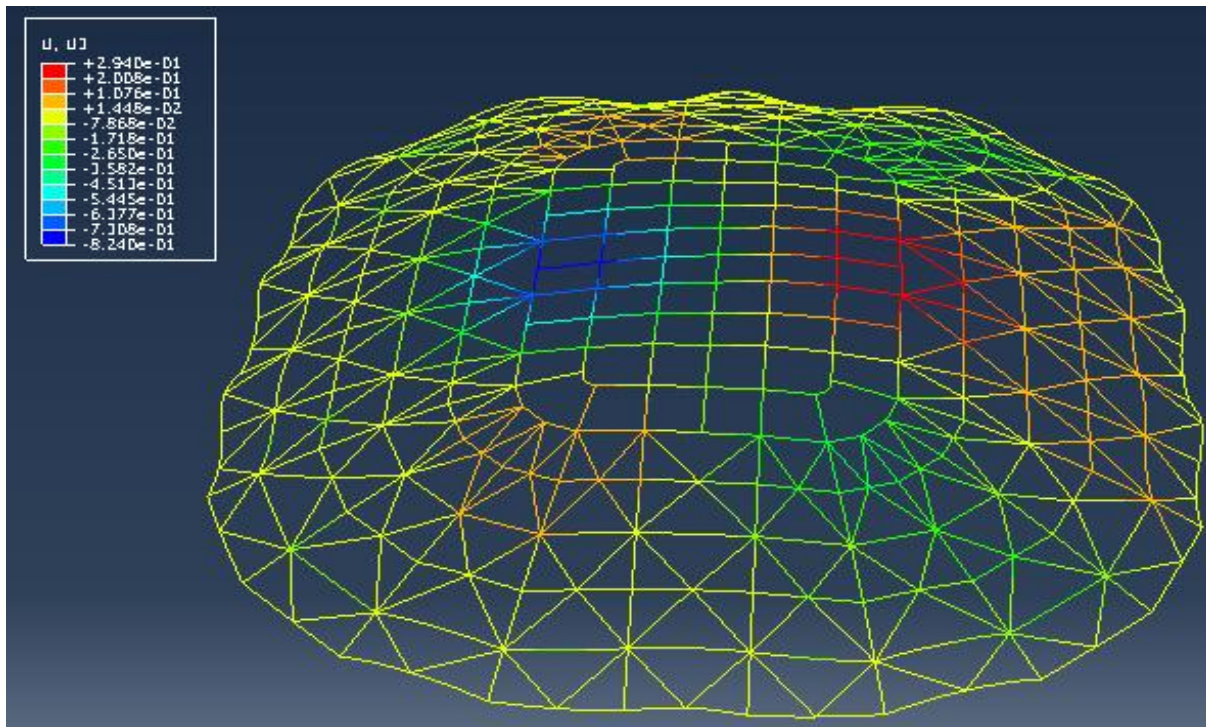


Graf 51: Odvisnost med nosilnostjo in nivojem nepopolnosti pri enakomernem snegu

Obnašanje konstrukcije bom prikazala na P-w diagramih istih točk, kot jih prikazujem že večino časa – točke T1, T9, T10, T12 in T13. Za lažjo interpretacijo rezultatov sem dodala še slike povosov popolne konstrukcije in povese pri nivoju popolnosti 150 %.

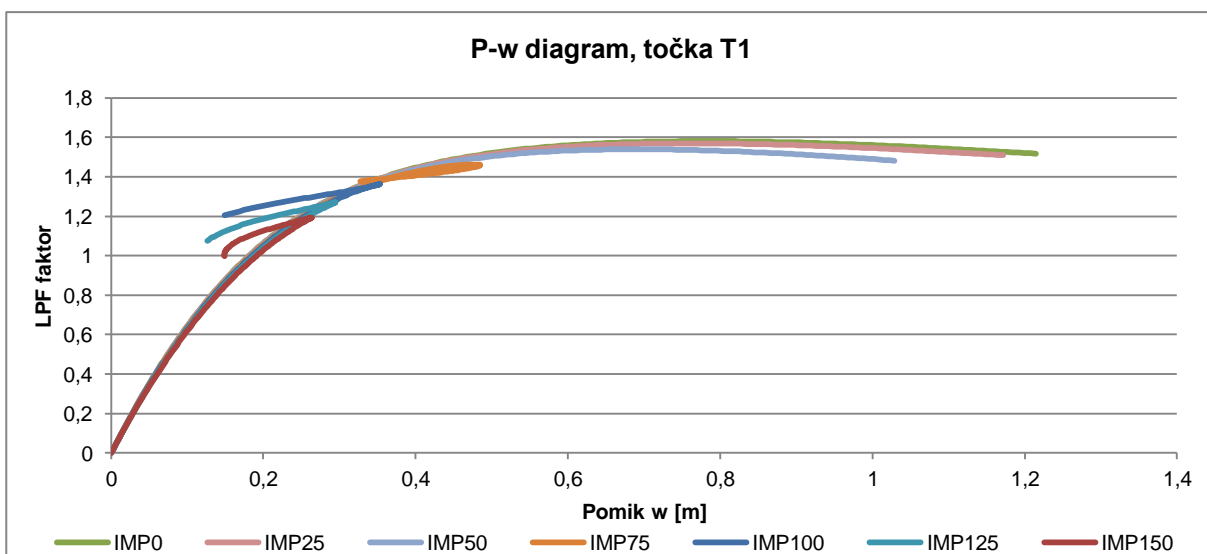


Slika 76: Povos strehe brez nepopolnosti pri enakomerni obtežbi s snegom

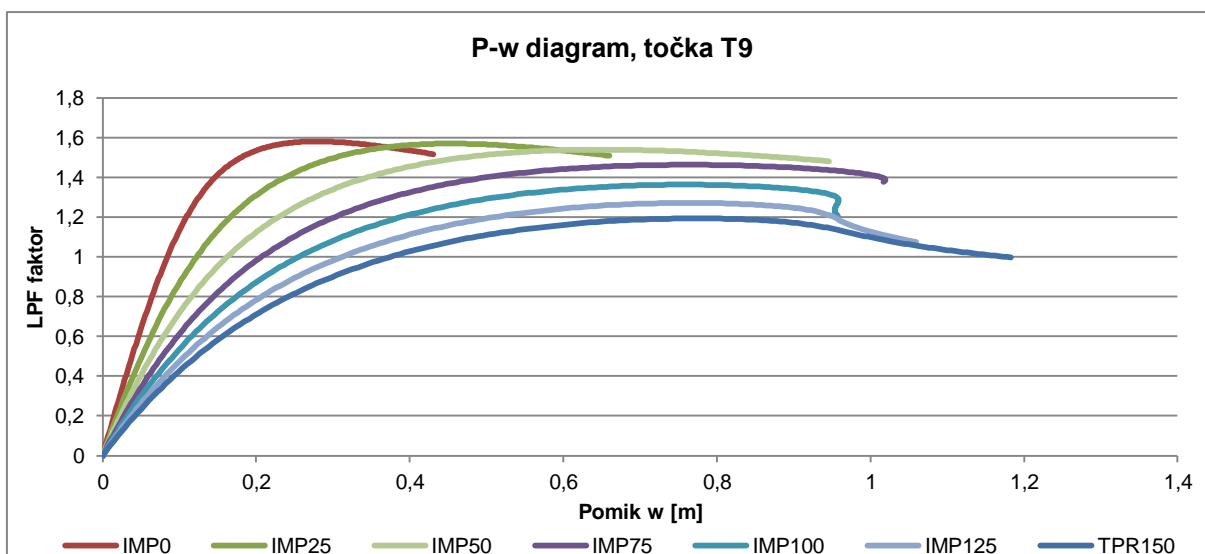


Slika 77: Povos strehe z nivojem nepopolnosti 150 % in enakomerno obtežbo s snegom

Vidimo, da se zaradi nepopolnosti spremeni deformiranje strehe. Pri popolni konstrukciji je maksimalni povos v temenu, levo in desno od temena je dvig konstrukcije. Pri strehi z nivojem nepopolnosti 150 % pa je največji povos premaknjen bolj levo od temena, dvig konstrukcije je samo na desni strani. Deformacija konstrukcije je enaka kot oblika nepopolnosti. Prehod med obema deformiranimi oblikama ni hipen, kar se lepo vidi na P-w diagramih. V točki T1 vidimo, da je oblika diagrama pri nepopolnosti 50 % enaka kot pri popolni konstrukciji, pomik pa je že manjši. Še vedno se maksimalni povos nahaja v bližini te točke in je večji kot povos pri popolni konstrukciji. Pri večjih nivojih nepopolnosti se maksimalni pomik premakne stran od točke T1, kar se lepo vidi z lomom diagrama pri mejni vrednosti – pomik se takrat začne manjšati.

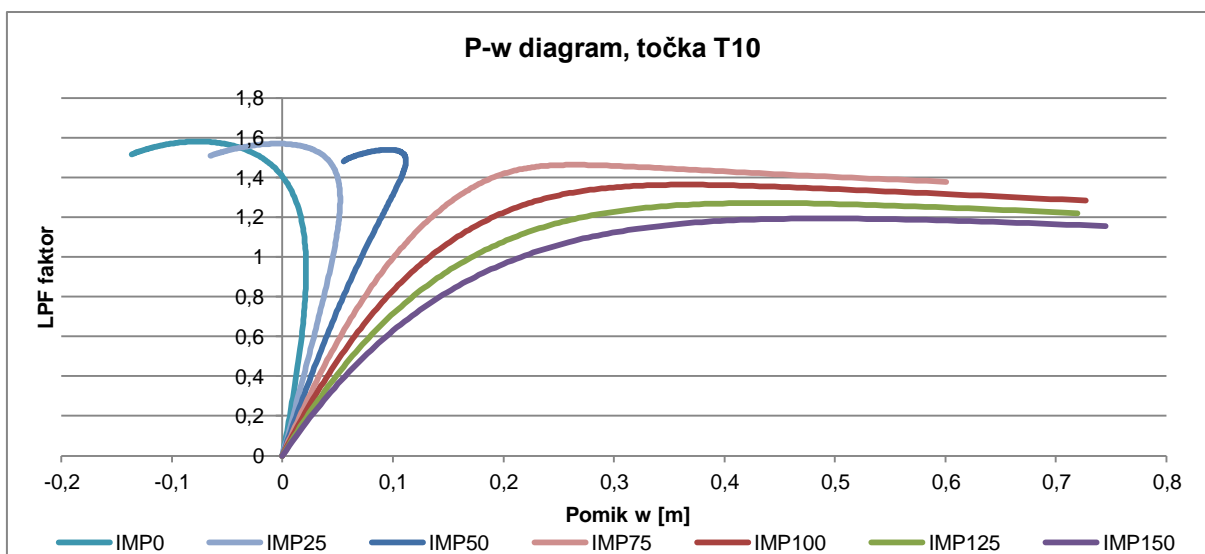


Graf 52: P-w diagram točke T1 pri različnem nivoju nepopolnosti in enakomerni obtežbi s snegom



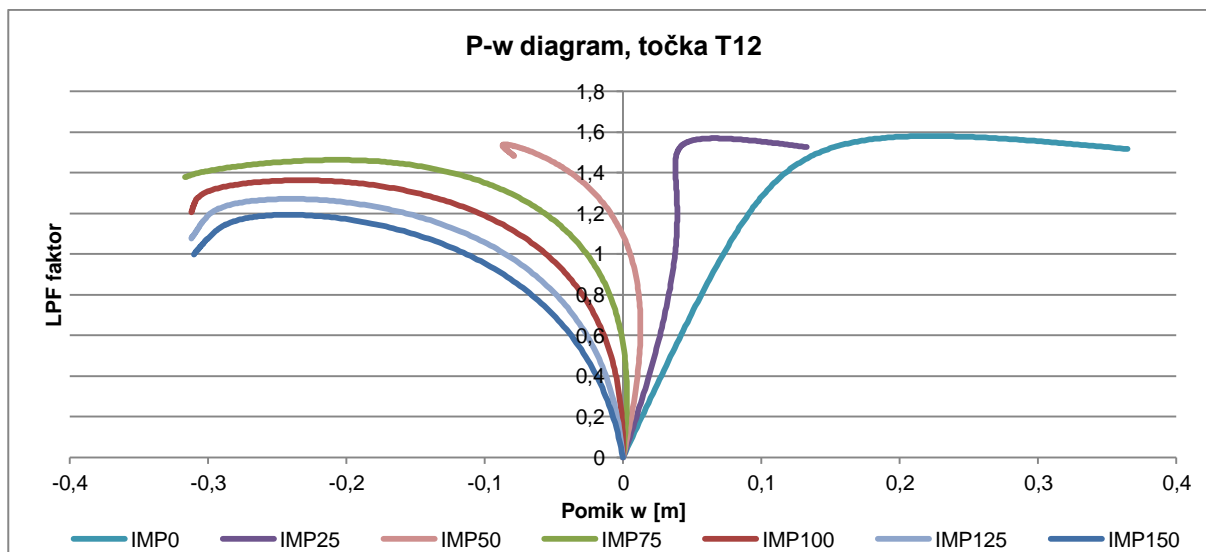
Graf 53: P-w diagram točke T1 pri različnem nivoju nepopolnosti in enakomerni obtežbi s snegom

V točki T9 imamo pri vseh nivojih nepopolnosti enako obnašanje, razlika je le v velikosti povesa. Pri nivojih nepopolnosti nad 75 % vidimo, da je poves skoraj enak, različen je le nivo mejne obtežbe, pri katerem je ta poves dosežen.



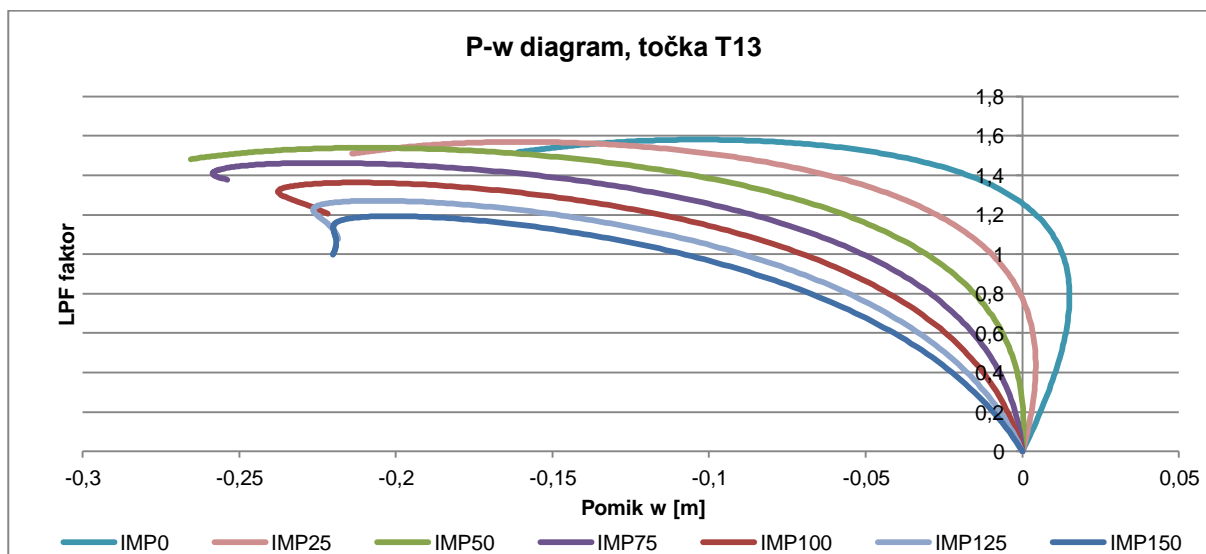
Graf 54: P-w diagram točke T1 pri različnem nivoju nepopolnosti in enakomerni obtežbi s snegom

Pri popolni konstrukciji in nizkem nivoju nepopolnosti se točka T10 dvigne, kasneje (pri nivoju nepopolnosti nad 75 %) pa se poves zelo hitro večja. Nekje pri nepopolnosti 50 % je torej meja med deformiranjem z dvema področjema dviga strehe in enim področjem.



Graf 55: P-w diagram točke T1 pri različnem nivoju nepopolnosti in enakomerni obtežbi s snegom

Točka T12 je pri popolni konstrukciji in majhni nepopolnosti na robu območja, ki se povesi, pri večjih nepopolnostih pa je del področja, ki se pri deformiranju dvigne.



Graf 56: P-w diagram točke T13 pri različnem nivoju nepopolnosti in enakomerni obtežbi s snegom

Točka T13 je v vseh primerih na območju, kjer se konstrukcija dvigne. Lepo se vidi, kako se pri nepopolnostih do 75 % pomik v tej točki večja pri mejni obtežbi večja, nato pa se manjša. Razlog za manjšanje dviga je večanje povesa na nasprotni strani strehe.

Nivo nepopolnosti kar precej vpliva na mejno nosilnost konstrukcije, predvsem pa oblika nepopolnosti vpliva na deformiranje strehe. Pri nižjih nivojih nepopolnosti ta oblika še ne pride do izraza, saj prevlada obtežba in njen vpliv na deformiranje. Pri višjih nivojih nepopolnosti se njena oblika zelo pozna, kar je vidno na slikah deformacijske oblike in grafih obnašanja tipičnih točk strehe.

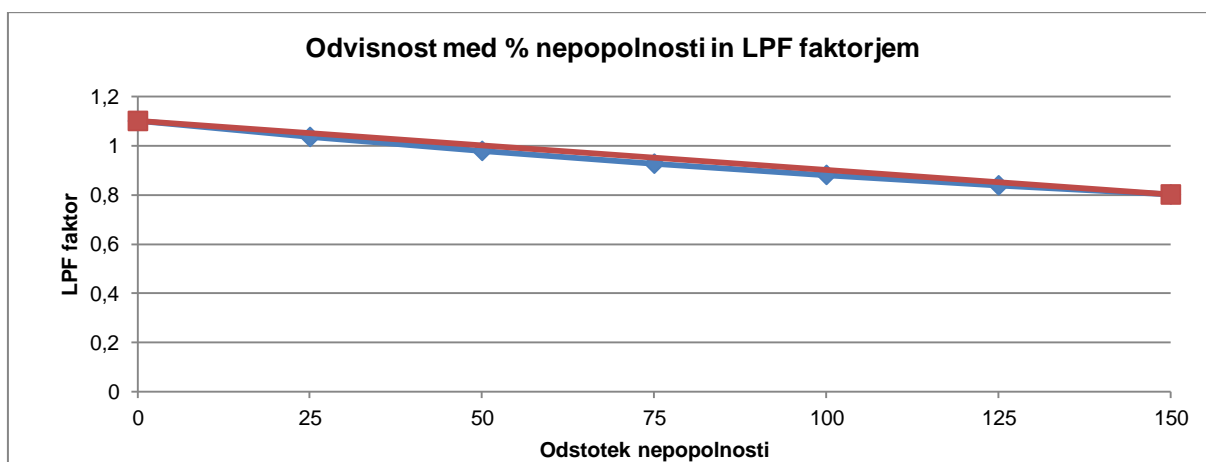
#### 4.6.2 Obtežna kombinacija z nakopičenim snegom (KS1)

Rezultate izračunov bom predstavila v preglednici, kjer so zbrane mejne nosilnosti pri posamezni nepopolnosti, za tipične točke pa sem prikazala P-w diagrame, kjer se vidi obnašanje konstrukcije.

Preglednica 23: Mejni faktorji pri strehi z različnimi nivoji nepopolnosti in nakopičenim snegom

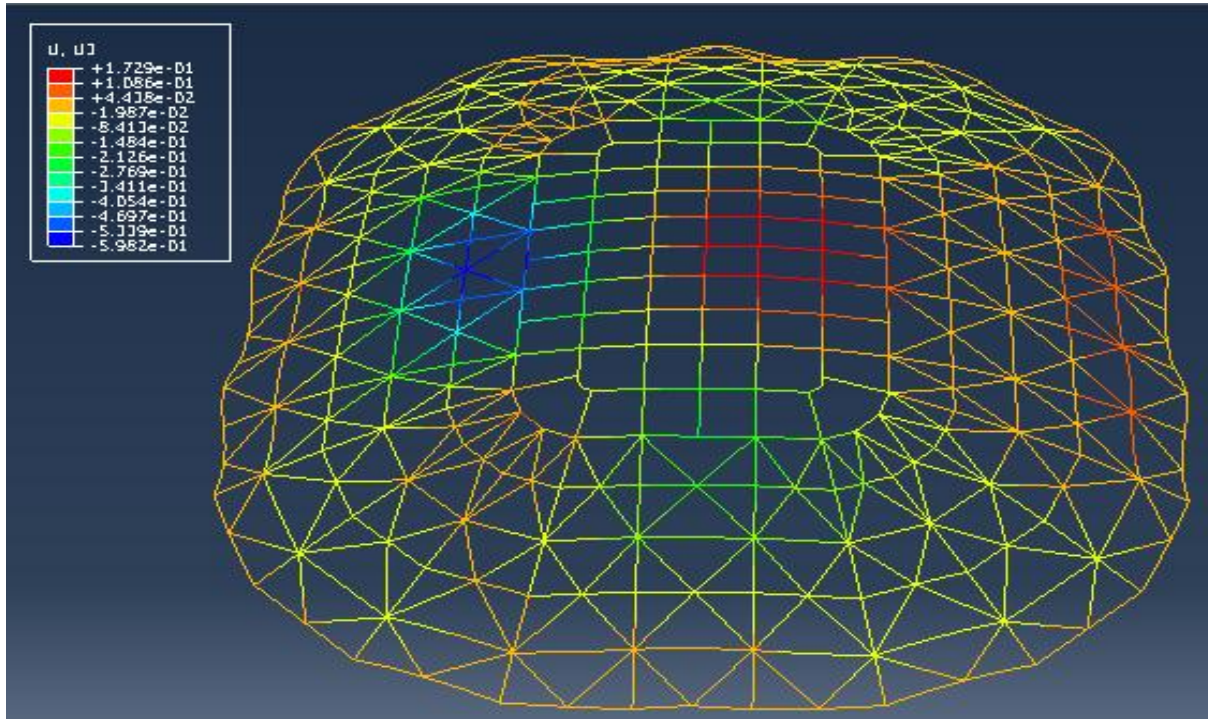
Nepopolnost	LPF <sub>mejni</sub>	Poves w [m]
IMP0	1,0996	0,5982
IMP25	1,035	0,6321
IMP50	0,978	0,6584
IMP75	0,926	0,6897
IMP100	0,880	0,7228
IMP125	0,838	0,7603
IMP150	0,801	0,8029

Mejni faktor obtežbe je pri popolni konstrukciji ter pri amplitudi nepopolnosti 0,041 m (25 %) večji od vrednosti 1, kar pomeni, da že zelo majhna nepopolnost zniža mejno nosilnost strehe pod vrednost projektne obtežbe. Na grafu 57 vidimo, da je padec mejne nosilnosti v odvisnosti od nivoja nepopolnosti skoraj linearen. Rdeča črta na grafu prikazuje linearno povezavo med minimalno in maksimalno vrednostjo mejne nosilnosti, modra pa izračunano obtežbo – razlika med obema črtama je zanemarljivo majhna.

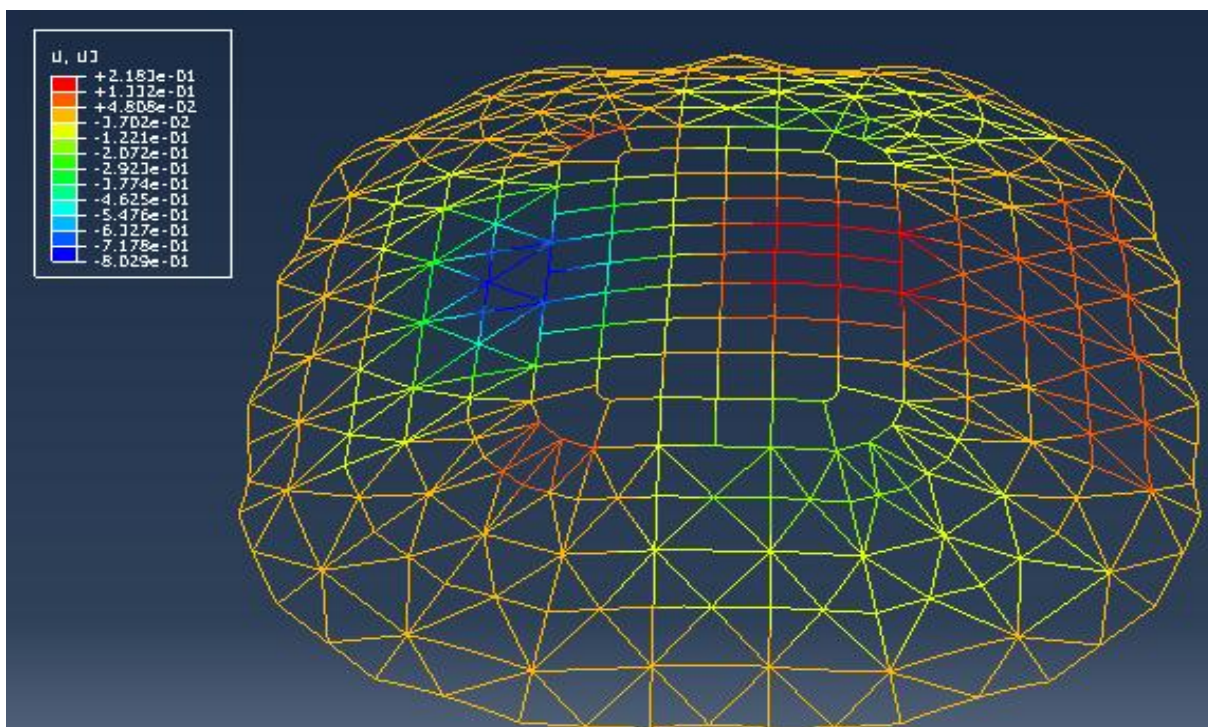


Graf 57: Odvisnost med nosilnostjo in nivojem nepopolnosti pri nakopičenem snegu

Na slikah 78 in 79, ki prikazujeta deformiranje popolne konstrukcije in konstrukcije z nepopolnostjo 150 % vidimo, da je oblika deformiranja popolnoma enaka, razlika je le v velikosti pomikov. Nepopolnost je torej enake oblike kot deformiranje popolne konstrukcije, zato se maksimalni pomiki le povečajo, točke pa imajo, kot je vidno na P-w diagramih, enako pot obnašanja, le velikosti so različne.



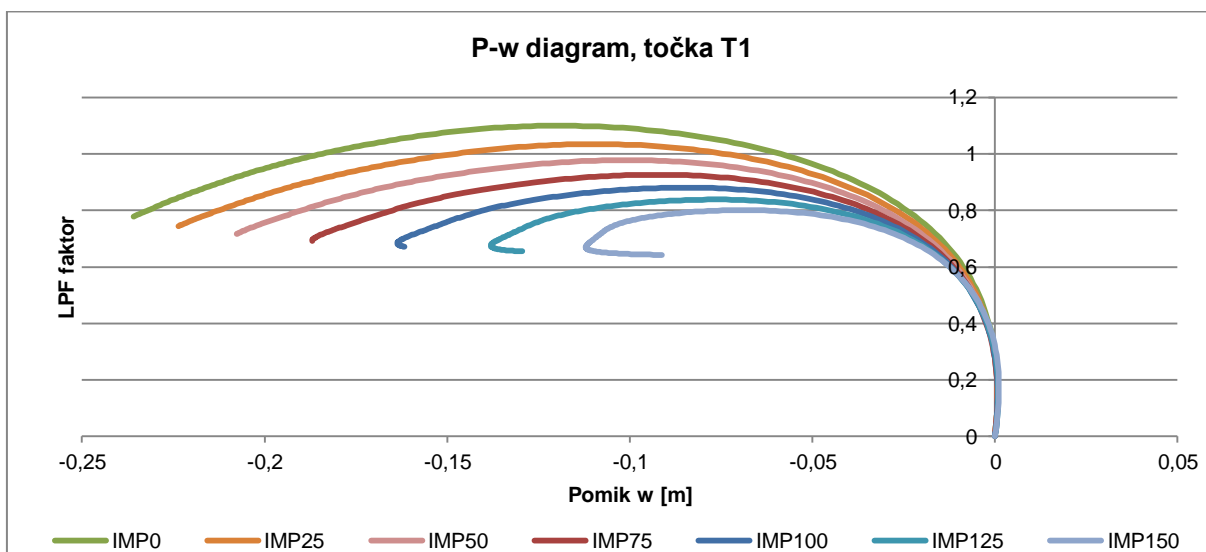
Slika 78: Poves strehe brez nepopolnosti pri obtežbi z nakopičenim snegom



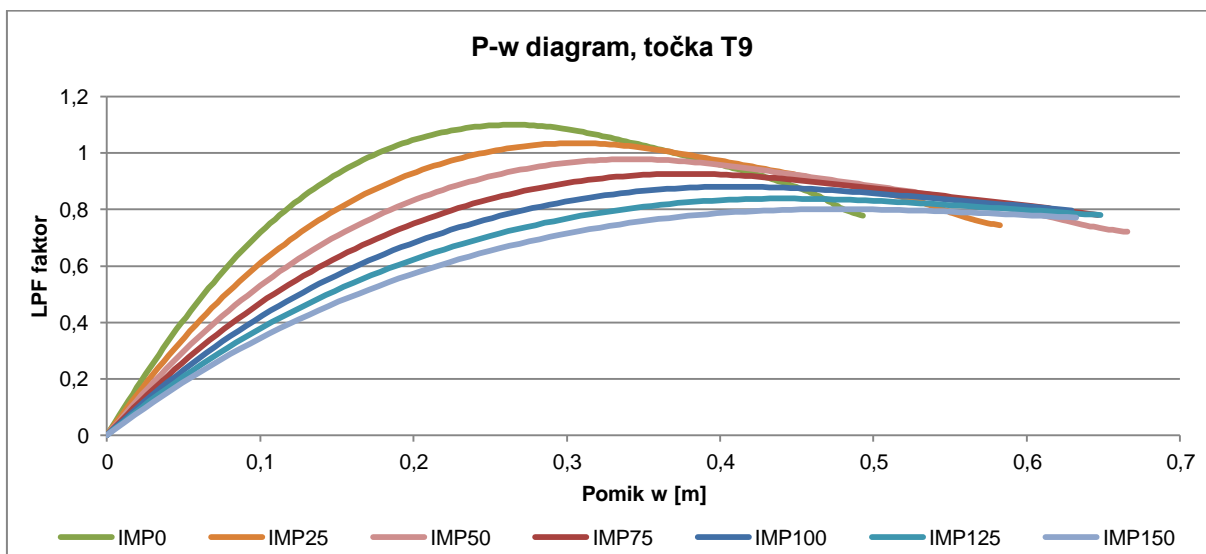
Slika 79: Poves strehe z nivojem nepopolnosti 150% pri obtežbi z nakopičenim snegom

Pri vseh diagramih je najvišje narisana graf za popolno konstrukcijo, najnižje pa graf za nepopolnostjo 150 %, ostale vrednosti so po vrsti razporejene med minimalno in maksimalno vrednostjo. Oblika vseh grafov je enaka, različen je pomik, ki ga točka doseže pri posameznem nivoju nepopolnosti. Pri temenski točki je največji pomik pri popolni konstrukciji, saj nimamo nobene vsiljene oblike in se lahko temenska točka najbolj dvigne. V vseh ostalih primerih je največji pomik pri konstrukciji z nivojem nepopolnosti 150 %, kar je

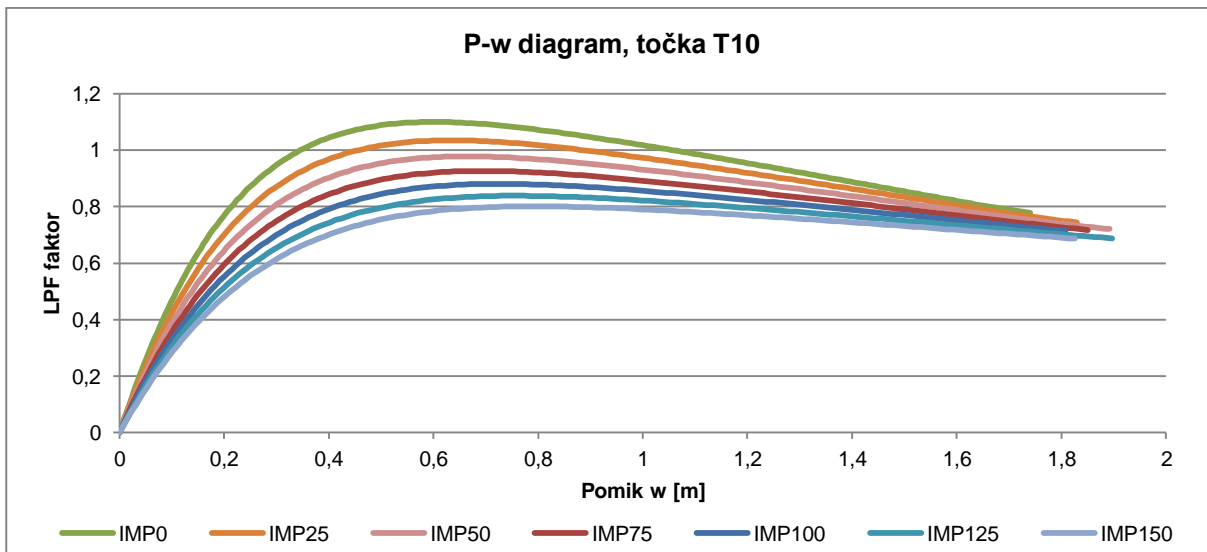
pričakovano, saj je že začetni pomik največji, nato se pa konstrukcija še sama bolj deformira, kot v primeru, ko nepopolnosti ni.



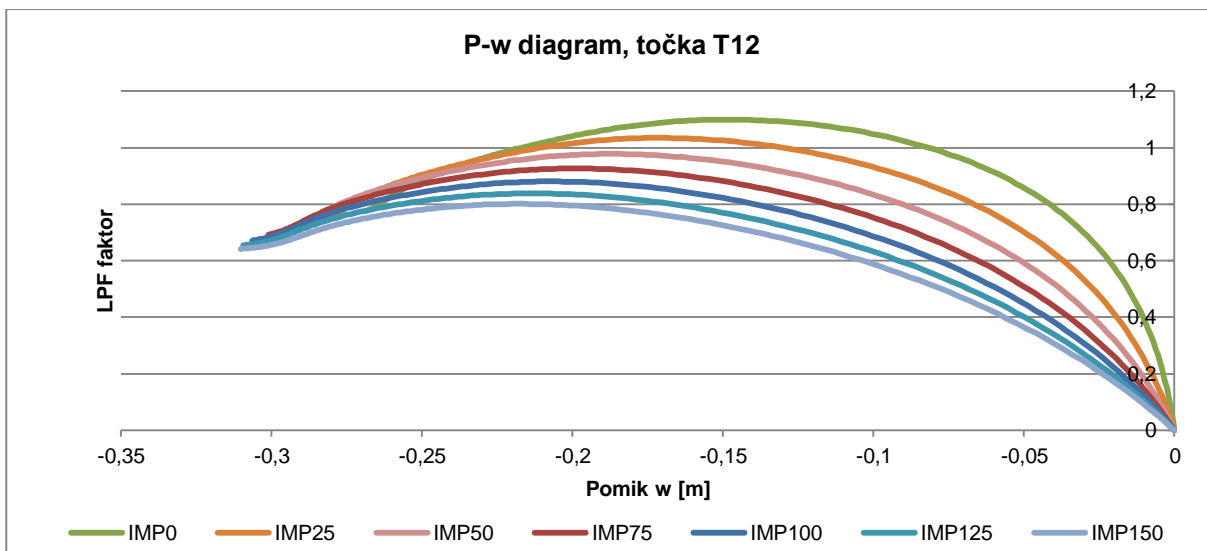
Graf 58: P-w diagram točke T1 na strehi z različnimi nivoji nepopolnosti in nakopičeno obtežbo snega



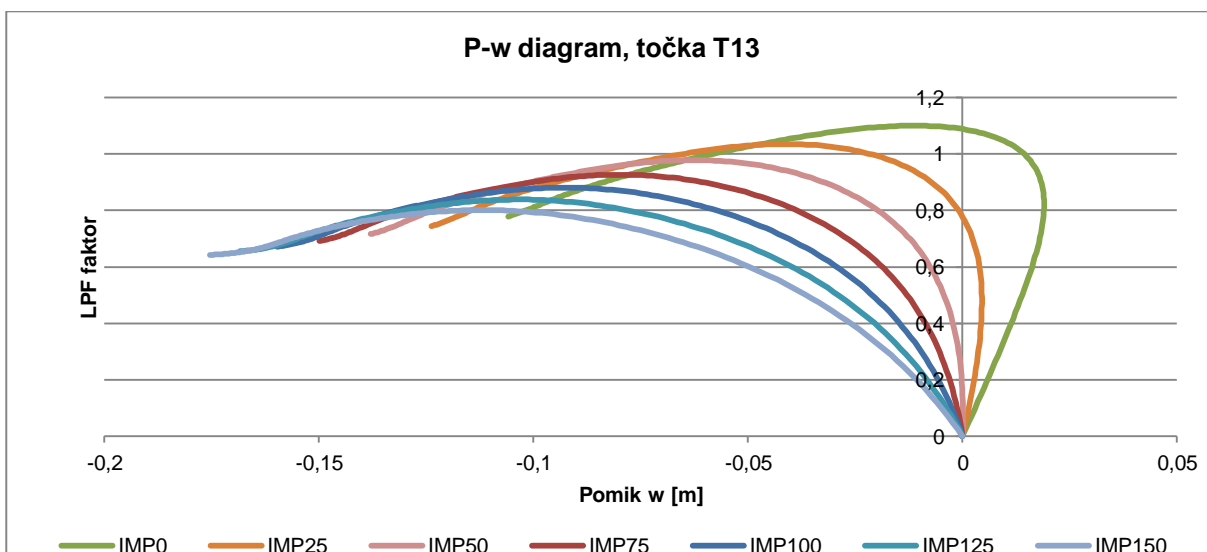
Graf 59: P-w diagram točke T9 na strehi z različnimi nivoji nepopolnosti in nakopičeno obtežbo snega



Graf 60: P-w diagram točke T10 na strehi z različnimi nivoji nepopolnosti in nakopičenim snegom



Graf 61: P-w diagram točke T11 na strehi z različnimi nivoji nepopolnosti in nakopičenim snegom



Graf 62: P-w diagram točke T13 na strehi z različnimi nivoji nepopolnosti in nakopičenim snegom



Nepopolnost na streho z nakopičenim snegom zelo vpliva. Njen mejni faktor povečanja obtežbe že pri popolni konstrukciji ni velik (malo večjo kot je vrednost projektne obtežbe), pri nepopolnosti pa se vrednost zmanjša celo na 0,8 pri amplitudi nepopolnosti 15 %. Vprašanje seveda je, kako velike nepopolnosti so se izoblikovale pri strehi v Stožicah in kakšna je njena realna oblika – je enaka modelirani ali je drugačne oblike, ki je bolj ugodna za samo mejno nosilnost.

#### 4.7 Izračun v programu Scia Engineer in primerjava rezultatov

S programom Scia Engineer sem določila mejno obtežbo in lastne vrednosti za primer strehe z enakomerno obtežbo snega in primer z nakopičeno obtežbo snega v smeri krajšega razpona. Račun je izveden po teoriji drugega reda, po metodi Timoshenka ter modificirani Newton-Raphsonovi metodi. Upoštevala sem tudi nepopolnost, ki je enaka prvi lastni obliki vsake od konstrukcij, njena velikost je  $L/600$ .

Rezultate, ki sem jih dobila, sem primerjala z rezultati po metodi dolžine loka iz programa Abaqus. Primerjala sem mejne obtežne faktorje, velikost lastne vrednosti ter P-w diagrame za nekaj značilnih točk.

##### 4.7.1 Streha z enakomerno obtežbo snega

V preglednici sem najprej zbrala mejne vrednosti ter velikost prve lastne vrednosti za popolno in nepopolno konstrukcijo.

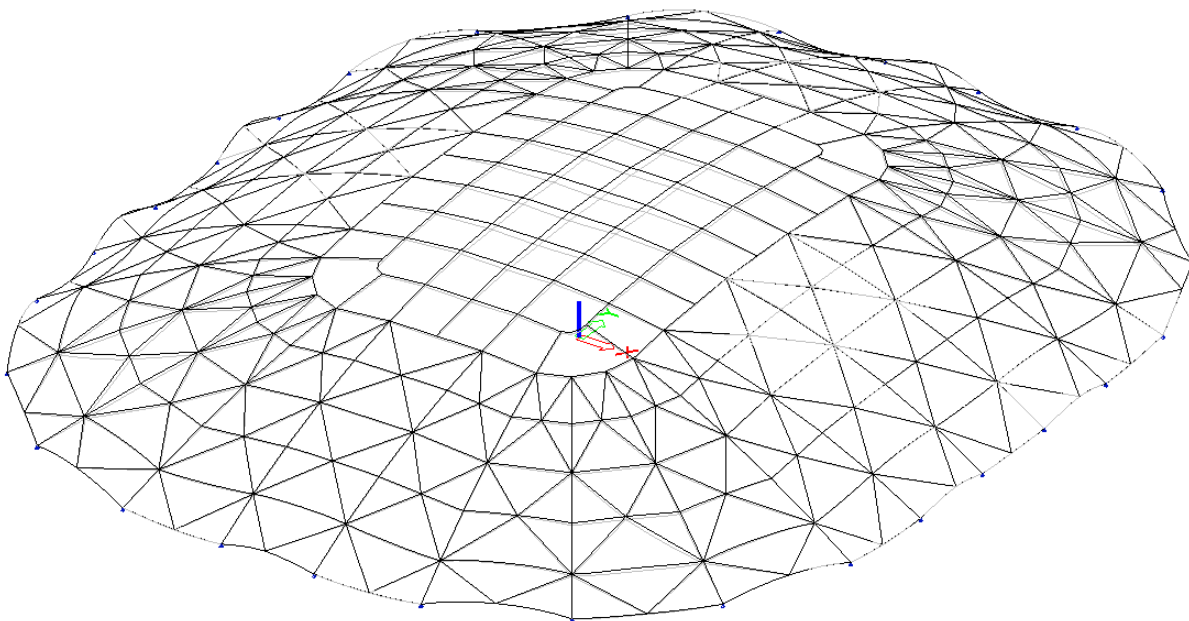
Preglednica 24: Kritični faktorji povečanja enakomerne obtežbe s snegom izračunane v programu Abaqus in Scia Engineer

	POPOLNA K.		NEPOPOLNA K.
	Prva lastna vrednost	$LPF_{\text{mejni}}$	$LPF_{\text{mejni}}$
SCIA – Timoshenko	2,28	2,22	1,72
SCIA – modificiran Newton-Raphson		2,3	1,79
Abaqus – metoda dolžine loka	1,959	1,581	1,363

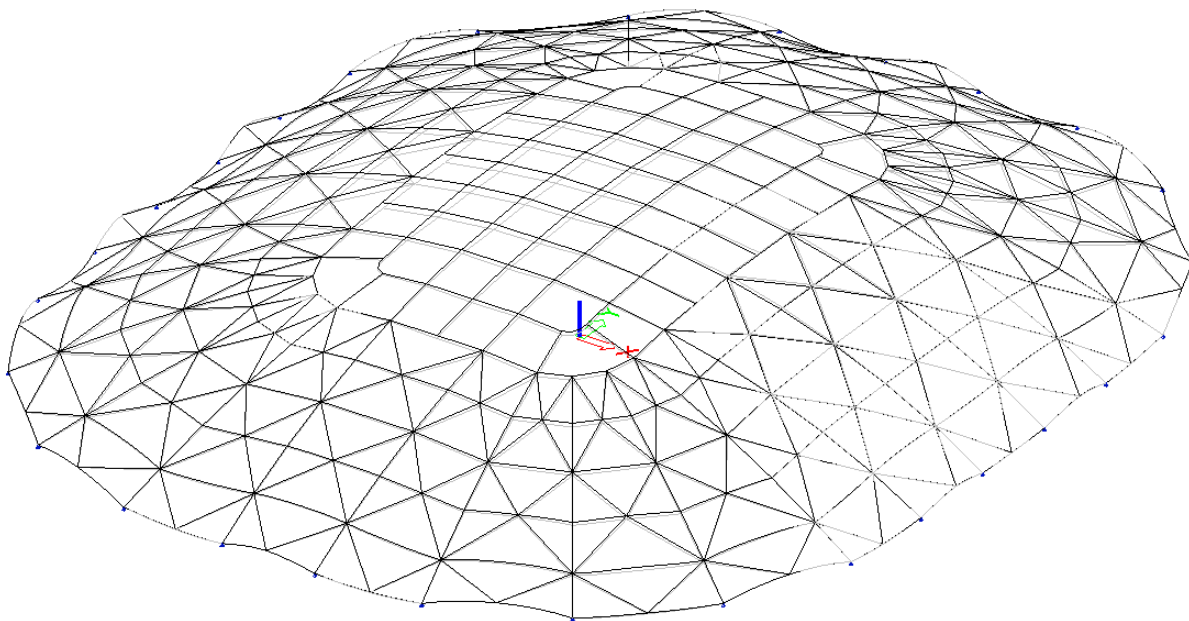
Rezultat po teoriji drugega reda je višji, kot po metodi lokov. Razlog je v sami metodi računanja, kar sem ugotovila že v uvodnih primerih. Mejni obtežni faktor, izračunan po teoriji drugega reda, je pri popolni konstrukciji višji za 41 % (Timoshenko) oziroma 45 % (modificiran Newton – Raphson), pri strehi z nepopolnostjo pa za 26 % (Timoshenko) oziroma 31 % (modificiran Newton – Raphson) odstotkov.

Na slikah 80 in 81 sta prikazani deformirani obliki strehe pri mejni vrednosti obtežnega faktorja. Obliki sta enaki kot pri računu v programu Abaqus. Pri strehi brez nepopolnosti je opazen povos temena strehe in rahel dvig levo in desno od temena, pri strehi z

nepopolnostjo pa je viden povos na levem delu strehe, tj. na delu kjer oblika nepopolnosti povzroči povos strehe.

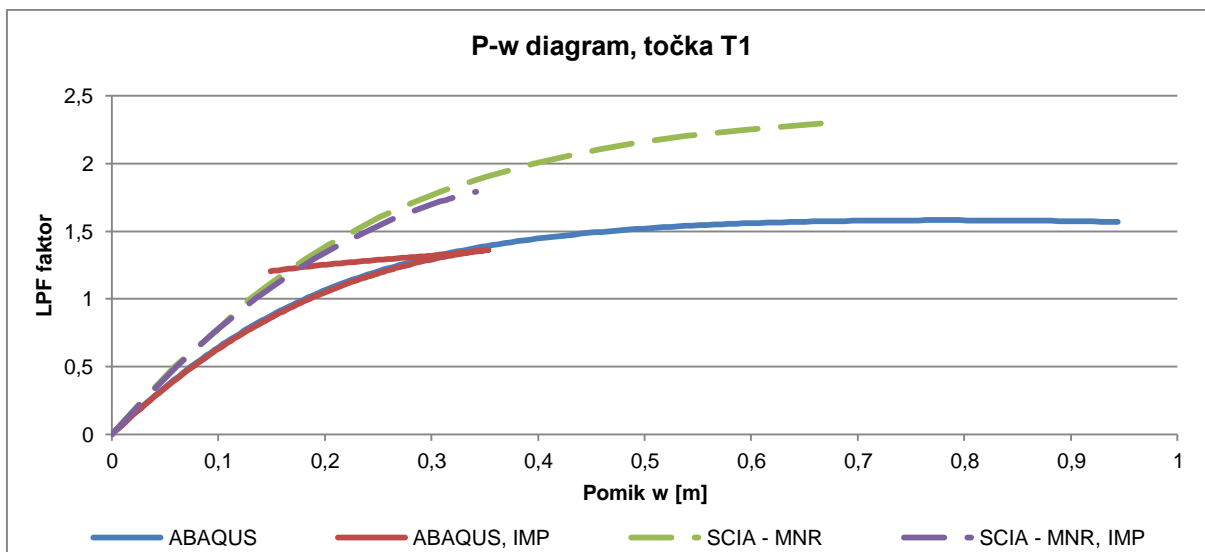


Slika 80: Deformirana oblika strehe brez nepopolnosti z enakomerno obtežbo snega, Timoshenkova metoda

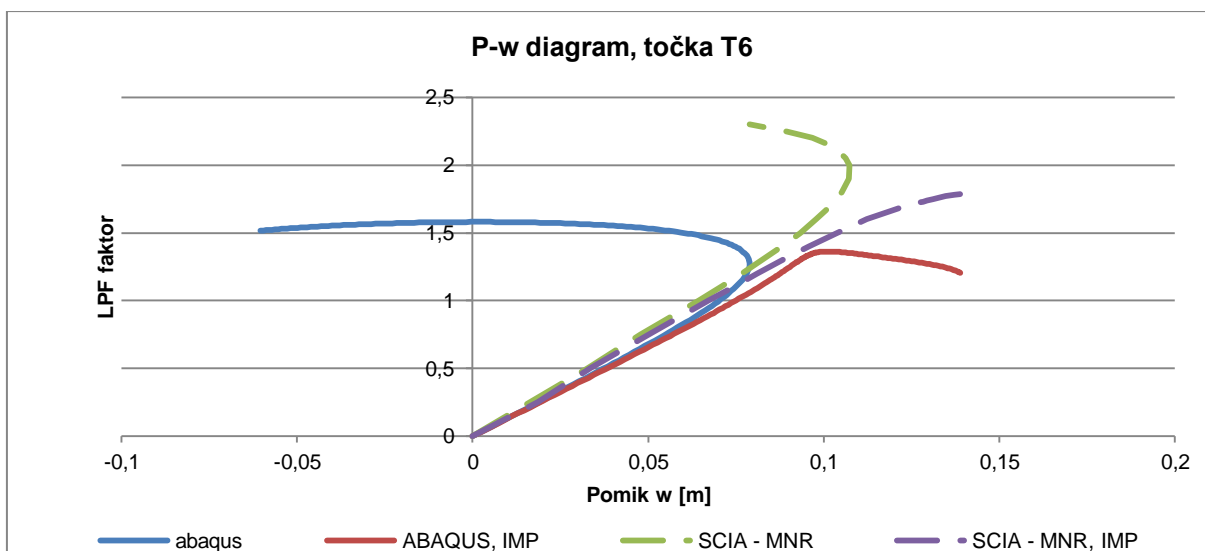


Slika 81: Deformirana oblika strehe z nepopolnostjo in enakomerno obtežbo snega, Timoshenkova metoda

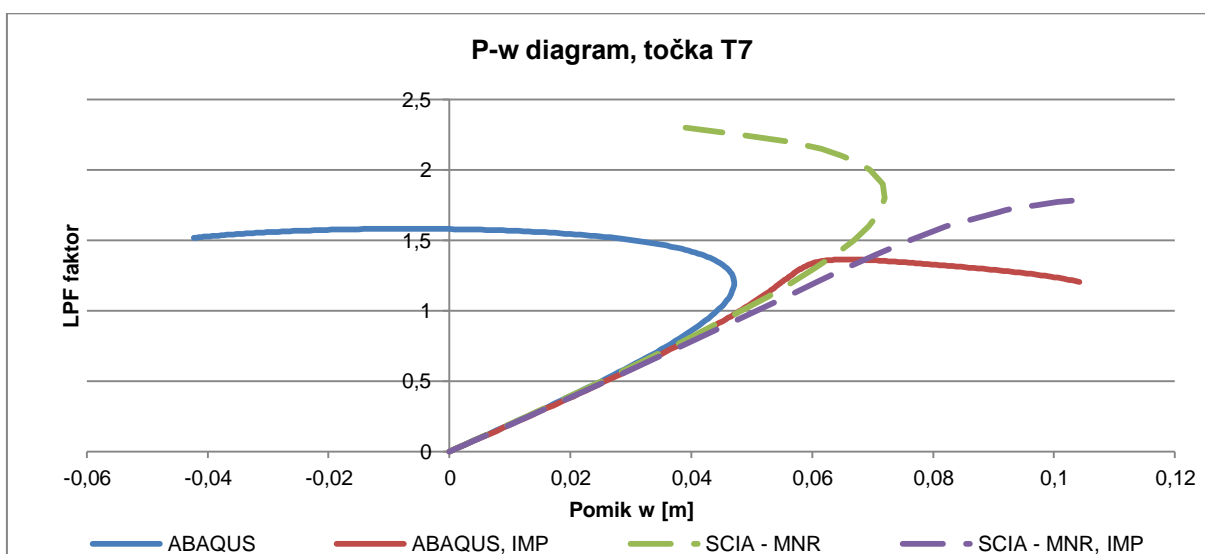
Primerjava deformiranja konstrukcije je prikazana tudi na P-w diagramih izbranih točk. Izbrala sem točke T1, T6, T7, T9, T10, T12, T13. Na posameznem grafu so narisani rezultati izračuna v Scii (modificirana Newton-Raphsonova metoda) ter Abaqusa za popolno konstrukcijo in konstrukcijo z nepopolnostjo.



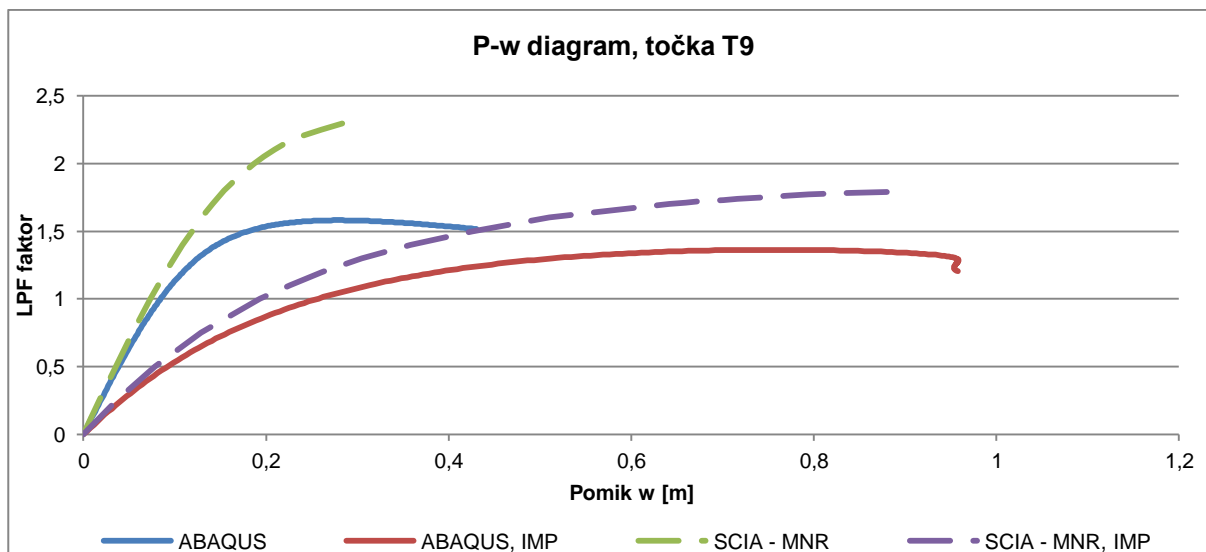
Graf 63: P-w diagram točke T1 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (ES)



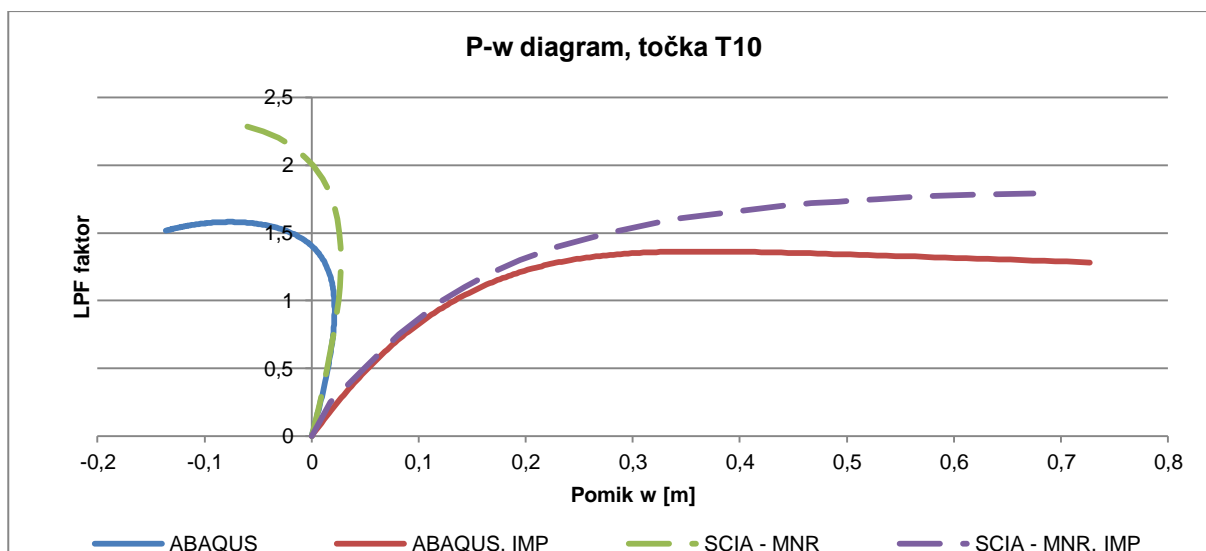
Graf 64: P-w diagram točke T6 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (ES)



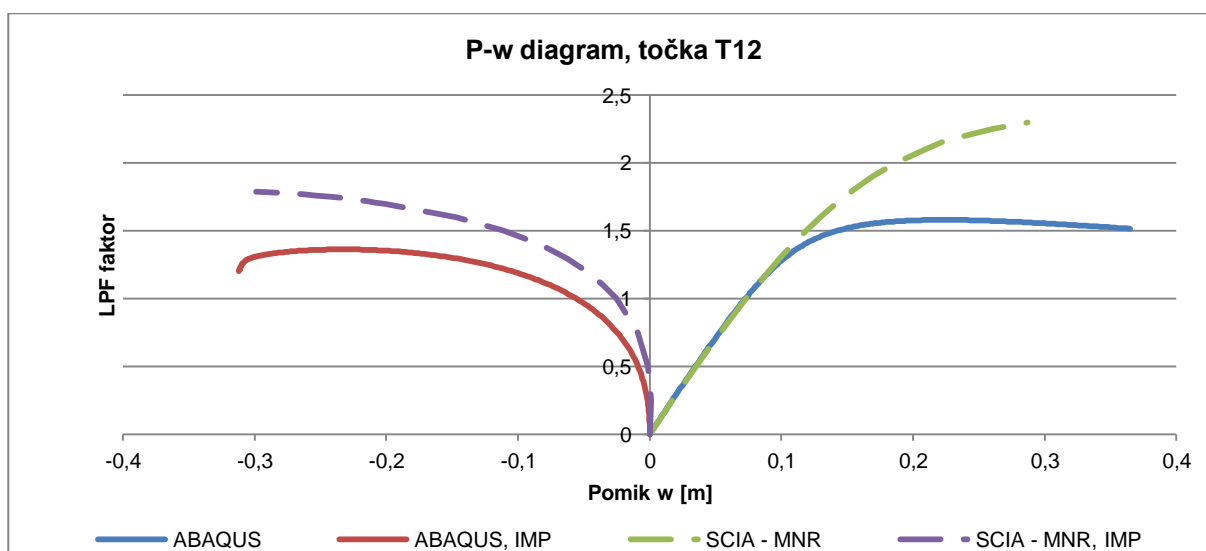
Graf 65: P-w diagram točke T7 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (ES)



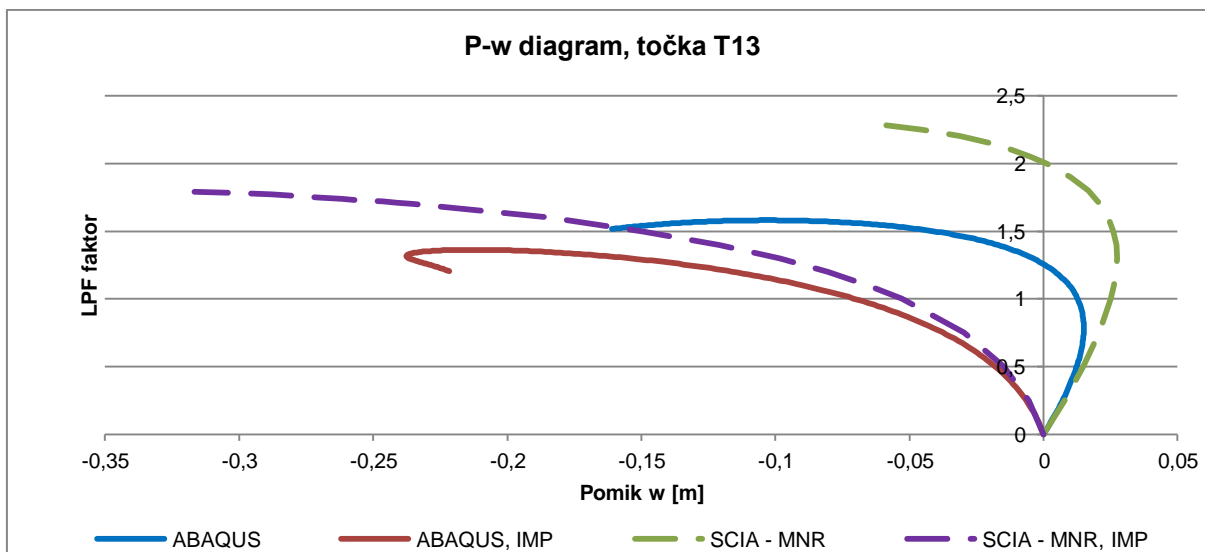
Graf 66: P-w diagram točke T9 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (ES)



Graf 67: P-w diagram točke T10 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (ES)



Graf 68: P-w diagram točke T12 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (ES)



Graf 69: P-w diagram točke T13 – primerjava izračuna v SCII Engineer in Abaqusu (ES)

Razlike in enakosti, ki jih vidimo opazim so enake na vseh grafih, zato je komentar na koncu vseh grafov.

Ko primerjamo rezultate iz Abaqusa in Scie lahko opazimo, da so v linearnem delu grafi pokriti, tj. enake rezultate dobimo po obeh metodah v začetnem obnašanju konstrukcije. Ko pa se začenja nelinearno obnašanje, se začnejo tvoriti razlike. Abaqus nelinearno obnašanje zazna prej, zato je njegov graf nižje kot graf iz Scie. Oblika grafov je v vseh primerih zelo podobna, pri popolni in nepopolni konstrukciji.

Oblika obnašanja konstrukcije in njen odziv na obtežbo je pri rezultatih, dobljenih po teoriji drugega reda, enaka kot pri rezultatih, dobljenih po metodi dolžine lokov. Razlika je v velikosti deformacij in mejne obtežbe, ki nam jo program vrne. V Scii dobimo namreč kar precej višje vrednosti, kot pa so izračunane po metodi dolžine lokov, ki pa je za obnašanje v nelinearnem območju bolj natančna in se bolj približa realnemu obnašanju konstrukcije. Pri rezultatih, dobljenih po teoriji drugega reda, je dobro imeti v mislih, da bodo realne vrednosti mejne obtežbe verjetno nižje.

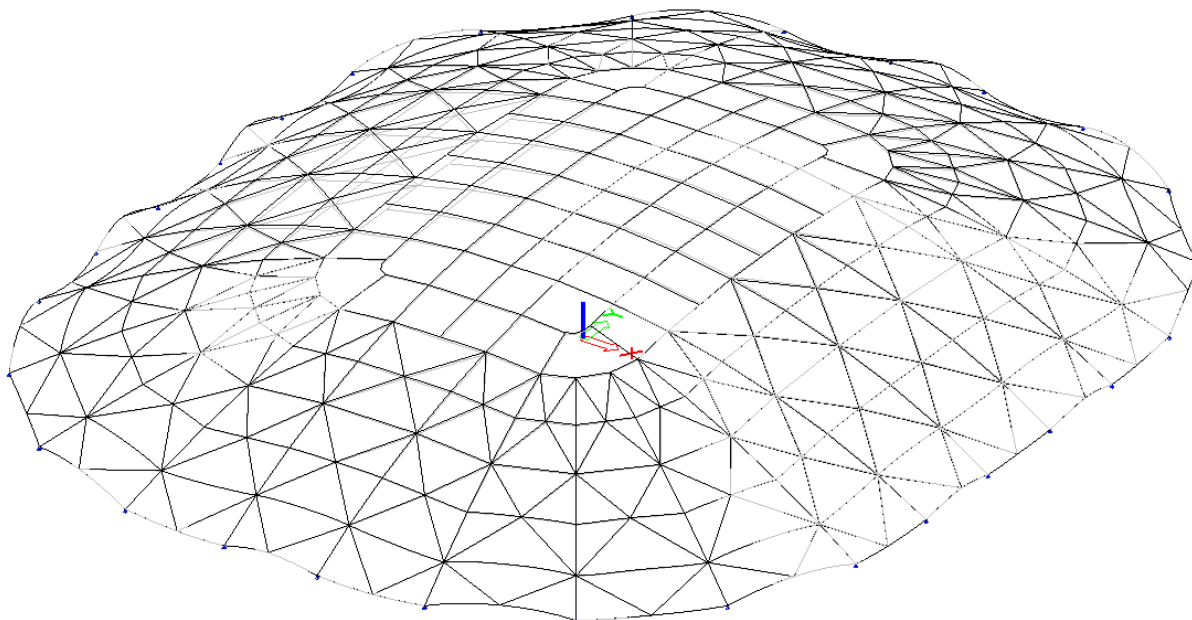
#### 4.7.2 Streha z nakopičenim snegom v smeri krajšega razpona

Glede na to, da so rezultati pri enakomerno porazdeljeni obtežbi, izračunani s programom Scia Engineer višji, kot tisti iz Abaqusa, lahko podoben rezultat pričakujemo tudi pri nakopičenem snegu. Pri nakopičenju snega sem upoštevala dve velikosti obtežbe. Prva velikost obtežbe je določena v točki 4.2.2.2 diplomske naloge, z upoštevanjo višino strehe za določitev obtežbe s snegom  $h=15$  m. Druga velikost obtežbe je vzeta iz projektne dokumentacije, kjer je upoštevana višina strehe za določitev obtežbe s snegom  $h=18$  m.

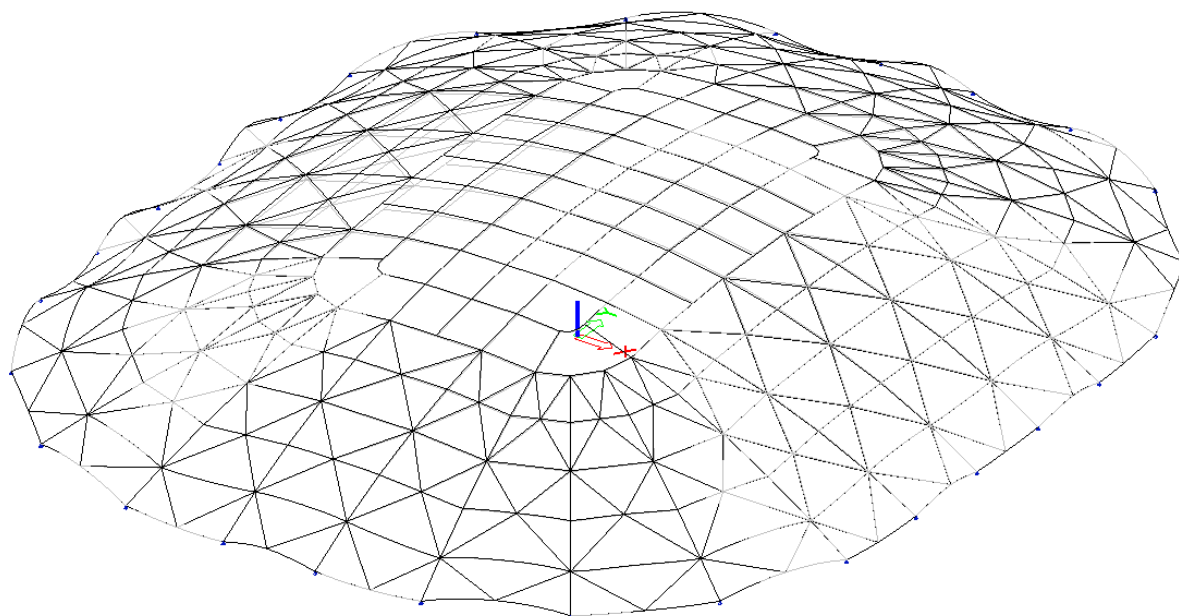
Preglednica 25: Mejni faktorji povečanja obtežbe z nakopičenim snegom (obtežba pri upoštevanju višini strehe  $h=15$  m in  $h=18$  m) izračunane v Abaqusu in Scii Engineer

	Obtežba snega pri upoštevanju višini strehe $h=15$ m			Obtežba snega pri upoštevanju višini strehe $h=18$ m		
	POPOLNA K.		NEPOPOLNA K.	POPOLNA K.		NEPOPOLNA K.
	Prva lastna vrednost	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>	Prva lastna vrednost	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>
SCIA – Timoshenko	2,15	1,5	1,23	2,01	1,33	1,09
SCIA – modificiran Newton-Raphson		1,45	1,23		1,32	1,11
Abaqus – metoda dolžine loka	1,8	1,099	0,88	1,71	1,009	0,758

Mejni faktor povečanja obtežbe je pri rezultatih po teoriji drugega reda in obtežbi z upoštevanju višino strehe 15 m višji od tistih po metodi dolžine loka za nekaj več kot 30 % pri popolni konstrukciji in 40 % pri konstrukciji z vneseno nepopolnostjo. Razlika je pri popolni konstrukciji nižja kot pri enakomerni obtežbi s snegom, pri strehi z vneseno nepopolnostjo pa celo višja. Prva lastna vrednost je višja kot tista iz Abaqusa. Mejni faktor povečanja obtežbe pri obtežbi snega z upoštevanju višino strehe 18 m je pri nepopolni konstrukciji po teoriji drugega reda malenkost nad 1. Lastna vrednost izračunana v Scii znaša 2,01, v projektni dokumentaciji pa so izračunali nekoliko manjšo vrednost, in sicer 1,94. V tem primeru se lepo vidi, kako je mejna nosilnost, izračunana po teoriji drugega reda nižja od lastne vrednosti. To je razlog, da je pri neobičajnih konstrukcijah pametno dimenzionirati na način, da bo lastna vrednost konstrukcije (elastični kritični faktor obtežbe) višja od 3, saj imamo s tem dovolj rezerve, da mejna obtežba ne pade pod vrednost 1.

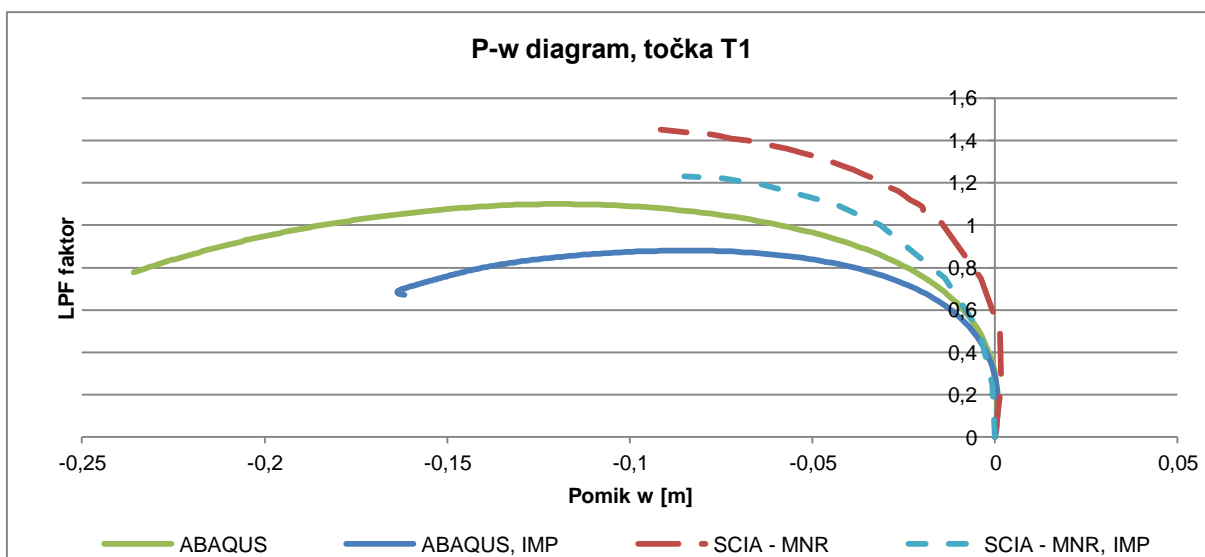


Slika 82: Deformirana oblika strehe brez nepopolnosti in obtežbo nakopičenega snega, modificirana Newton-Raphsonova metoda

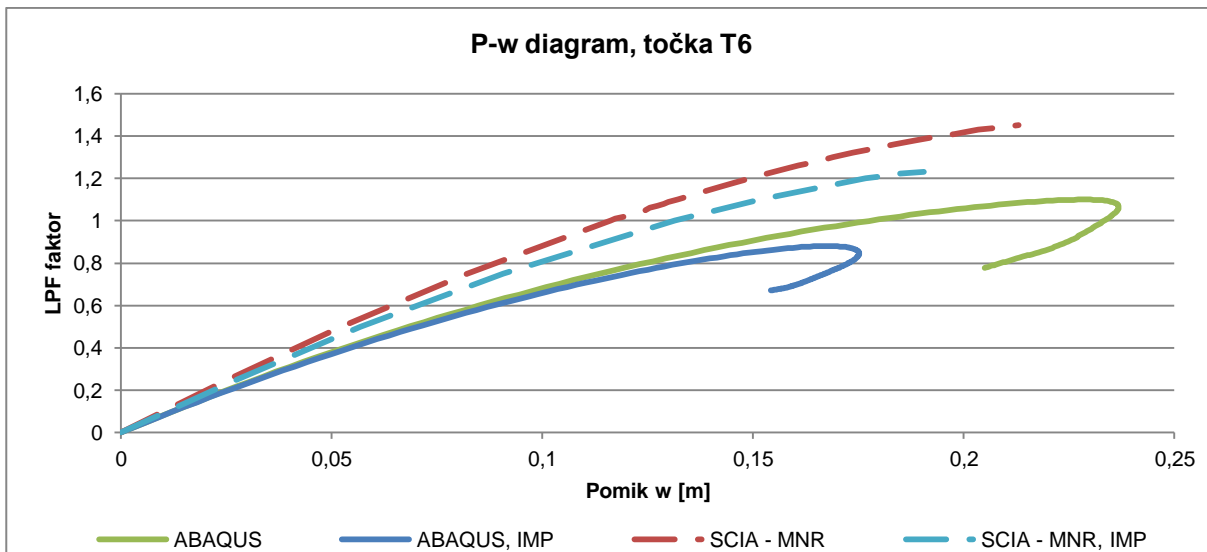


Slika 83: Deformirana oblika strehe z vneseno nepopolnostjo in obtežbo nakopičenega snega, modificirana Newton-Raphsonova metoda

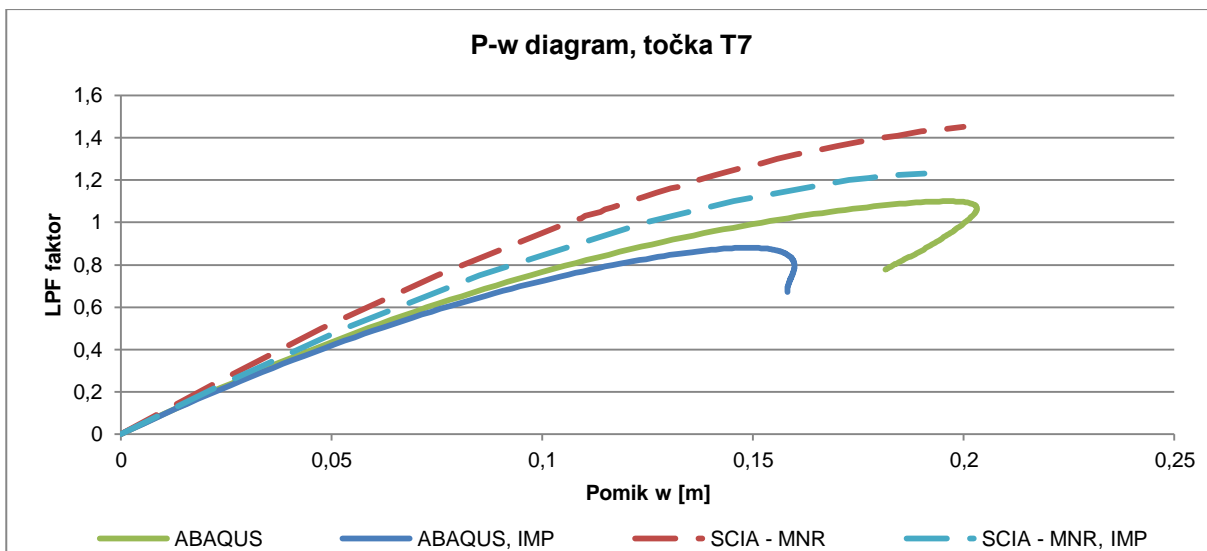
Deformiranje pri strehi brez nepopolnosti in tisti z vneseno nepopolnostjo je enako, kot pri rezultatih v Abaqusu. V obeh primerih (pri popolni strehi in nepopolni strehi) se bolj obtežena polovica strehe povesi, nasprotni del pa se nekoliko dvigne. Dvig na slikah (82 in 83) ni dobro viden, se pa bolje vidi pri P-w diagramih. Ti so zrisani v istih točkah kot pri enakomerni obtežbi s snegom, tj. T1, T6, T7, T9, T10, T12 in T13. Na grafih so narisani rezultati iz Abaqusa in Scie Engineer (modificirana Newton-Raphsonova metoda) za primer obtežbe s snegom, ki je določen v diplomski nalogi (upoštevana višina strehe je 15 m).



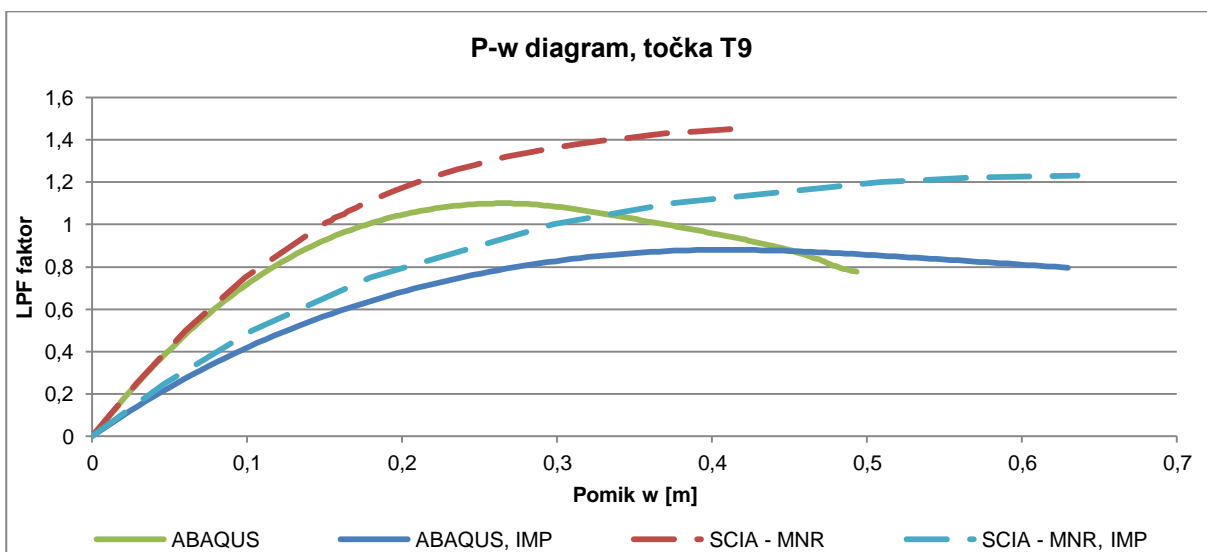
Graf 70: P-w diagram točke T1 – primerjava izračuna v Scie Engineer in Abaqusu (KS1)



Graf 71: P-w diagram točke T6 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (KS1)

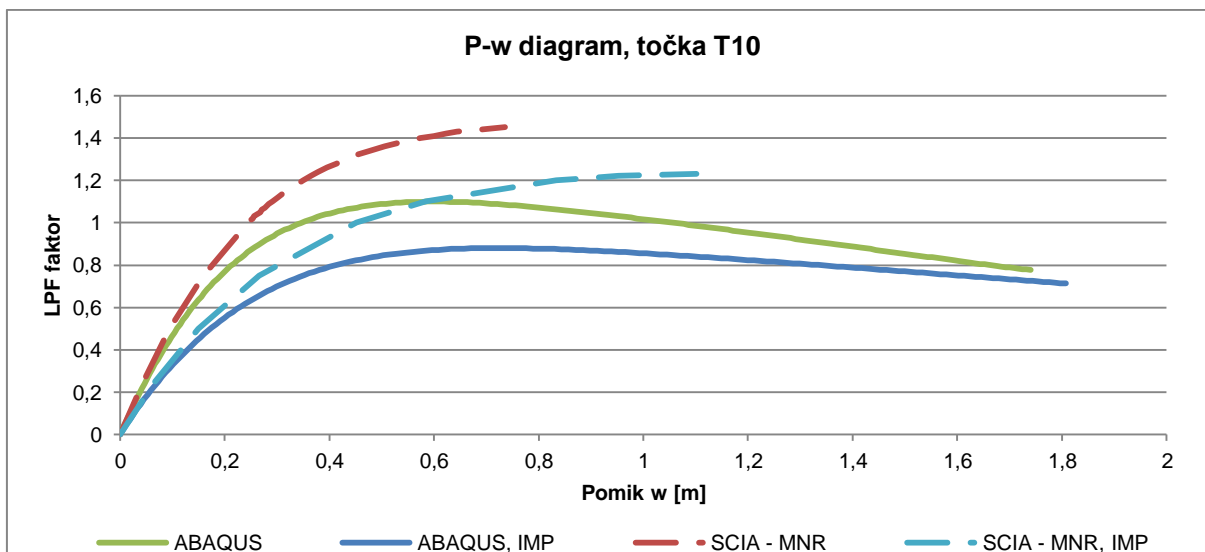


Graf 72: P-w diagram točke T7 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (KS1)

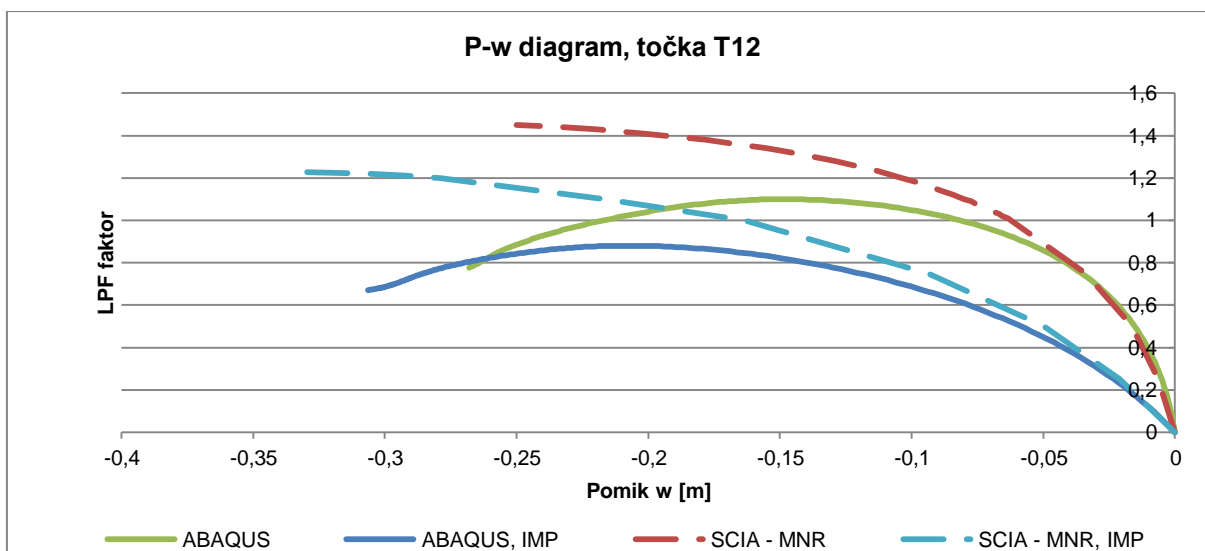


Graf 73: P-w diagram točke T9 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (KS1)

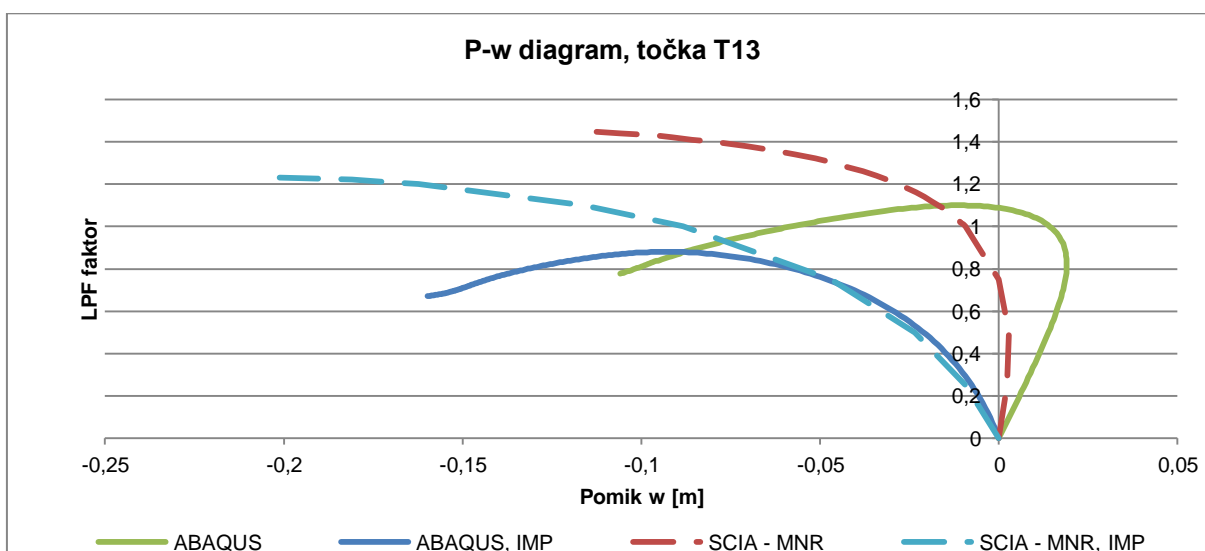




Graf 74: P-w diagram točke T10 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (KS1)



Graf 75: P-w diagram točke T12 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (KS1)



Graf 76: P-w diagram točke T13 – primerjava izračuna v Scii Engineer in Abaqusu (KS1)

Lastnosti, ki sem jih opisala pri enakomerni obtežbi s snegom, najdemo tudi pri obtežbi z nakopičenim snegom. Timoshenkova metoda in modificirana Newton-Raphsonova metoda dajeta zelo podobne rezultate.

Oblika grafa je pri računu v Scii podobna tistemu iz Abaqusa, razlika je predvsem v nivoju mejnega obtežnega faktorja ter obnašanja v nelinearnem območju. Abaqus to obnašanje prej zazna, zato je tudi mejna obtežba manjša. V večini primerov dobimo pri računu po teoriji drugega reda višje končne pomike. Razlog je višji mejni obtežbi. Če gledamo pomik pri istem faktorju obtežbe (npr. pri faktorju 1) vidimo, da se streha iz Abaqusa bolj deformira oziroma ima večji pomik.

#### **4.8 Primerjava in kontrola osnih sil**

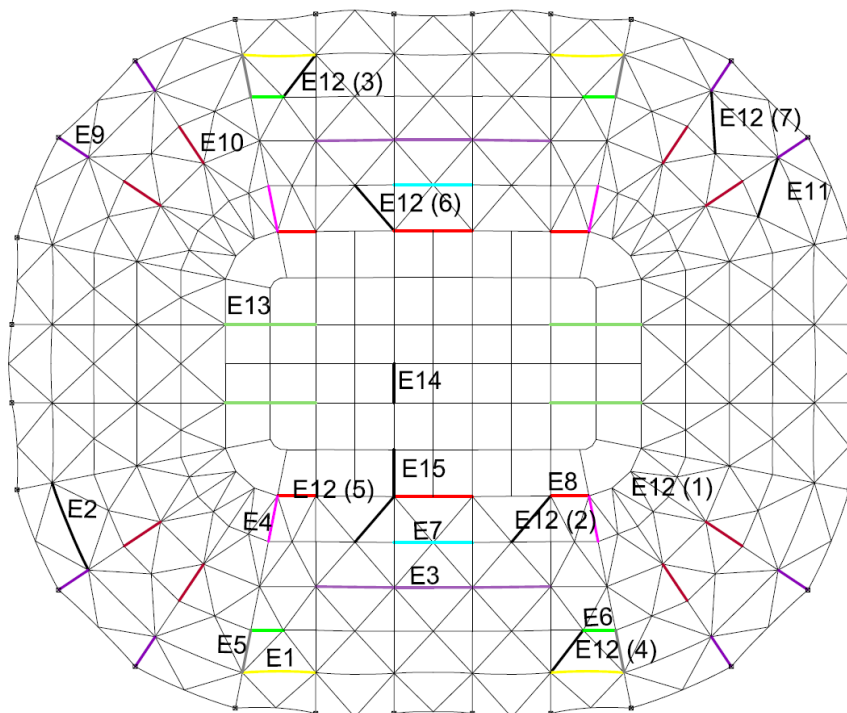
Do sedaj sem se ukvarjala samo z globalno analizo stabilnosti strehe. Potrebno je še preveriti, če je kje na lokalnem področju prekoračena osna sila, kar bi povzročilo lokalni uklon nosilca, loka ali diagonale.

Osne sile sem izračunala po teoriji drugega reda v Scii ter po metodi dolžine lokov v Abaqusu. Upoštevala sem enakomerno obtežbo ter nakopičeno obtežbo s snegom, popolno konstrukcijo ter vpliv nepopolnosti. Osne sile sem določila na različnih nivojih obtežbe – pri faktorju 0,25, 0,5, 0,75, 1 in mejnem faktorju. Pri vsakem primeru sem pri kritičnih elementih naredila kontrolo uklona.

Ker so kritični elementi za uklon v vseh primerih enaki, bom najprej predstavila položaj kritičnih elementov ter določila njihovo uklonsko nosilnost.

##### **4.8.1 Kritični elementi strehe ter njihova nosilnost**

Kritični elementi strehe so izbrani glede na njihovo dolžino ter obtežbo. Elementi E1-E5 so najdaljši glede na svoj prerez, pri ostalih elementih pa je kritična velikost osne sile glede na dolžino elementa.



Slika 84: Kritični elementi za kontrolo osnih sil

V spodnji preglednici so zapisane lastnosti posameznih kritičnih elementov in njihova projektna uklonska nosilnost. Uklonska nosilnost je določena skladno z Evrokodom 3. Pri računu sem upoštevala, da je uklonska dolžina elementa enaka sistemski dolžini.

Preglednica 26: Projektna uklonska nosilnost kritičnih elementov

Element	Profil	Dolžina [m]	$\lambda$	$\chi$	Nb,Rd [kN]
E1	RHS500/300/8	10,28	0,73	0,83	3711,4
E2	RHS500/300/12,5	13,24	0,95	0,70	4810,5
E3	RHS500/300/16	10,90	0,79	0,80	6984,7
E4	RHS500/300/12,5	6,68	0,48	0,93	6398,9
E5	RHS500/300/16	6,57	0,48	0,93	8124,8
E6	RHS500/300/8	9,09	0,65	0,87	3883,4
E7	RHS500/300/16	5,45	0,40	0,95	8322,4
E8a	RHS500/300/16	10,90	0,79	0,80	6984,7
E8b	RHS500/300/16	5,37	0,39	0,96	8335,6
E9	RHS500/300/16	5,45	0,40	0,95	8322,4
E10	RHS500/300/12,5	6,52	0,47	0,93	6422,3
E11	CHS323,9/6,3	9,16	1,08	0,61	1360,2
E12 (1)	CHS323,9/6,3	6,83	0,81	0,79	1768,5
E12 (2)	CHS323,9/6,3	8,50	1,00	0,66	1481,4
E12 (3)	CHS323,9/6,3	7,79	0,92	0,72	1610,0
E12 (7)	CHS323,9/6,3	9,13	1,08	0,61	1365,6
E13	RHS500/300/16	6,38	0,46	0,94	8160,2
E14	RHS500/300/16	5,45	0,40	0,95	8322,4
E15	RHS500/300/16	6,58	0,48	0,93	8122,9

Elementa E8 sta dva, ker je krajši (E8b) kritičen pri kombinaciji z nakopičeno obtežbo, daljši (E8c) pa pri obtežbi z enakomerno porazdeljenim snegom.

Štiri diagonale E12 so kritične pri nivoju, kjer kontroliram notranje sile. Diagonala E12 (1) je kritična pri nakopičenem snegu in popolni konstrukciji, diagonala E12 (2) pri nakopičenem snegu in nepopolni konstrukciji, diagonala E12 (3) pri enakomernem snegu in popolni konstrukciji ter diagonala E12 (7) pri enakomernem snegu in nepopolni konstrukciji.

#### 4.8.2 Kontrola osnih sil pri strehi brez nepopolnosti z enakomerno obtežbo s snegom

Primerjava osnih sil je prikazana v dveh tabelah. Najprej za nivoje pod 1, nato pa še za nivo 1 ter mejne nivoje obtežbe (Abaqus in Scia).

Preglednica 27: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za popolno streho z enakomerno obtežbo pri nivojih 0,25, 0,5 in 0,75 projektne obtežbe

EL.	NIVO 0,25*P			NIVO 0,5*P			NIVO 0,75*P		
	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS
1	43,2	43,16	41,89	87,81	87,58	87,32	135,13	134,4	135,68
2	112,48	112,82	126,14	226,14	227,5	263,48	343,16	346,36	409,14
3	310,26	310,51	295,99	577,18	578,17	605,51	937,84	940,34	917,11
4	168,05	167,92	168,32	333,91	333,33	340,57	499,3	497,81	510,24
5	467,47	466,96	434,52	928,3	926,04	876,86	1387,06	1381,41	1307,25
6	219,08	219,27	233,26	441,7	442,49	484,94	671,76	673,66	748,22
7	310,86	310,97	305,25	619	595,39	623,76	937,84	886,65	945,18
8	350,7	350,93	338,69	739,54	739,99	680,61	1101,39	1102,39	1008,17
9	748,18	749,4	754,9	1496,11	1501,31	1550,36	2252,78	2265,44	2360,33
10	393,25	394,03	387,4	784,41	787,75	790,44	1177,33	1185,48	1194,24
11	120,57	120,93	112,69	238,91	241,15	227,38	357,51	361,32	338
12	184,26****	184,25****	191,78	367,86****	367,87****	393,19	553,45****	553,52****	598,94
13	517,23	517,29	504,28	1033,52	1013,48	1033,8	1553,19	1553,89	1569,72
14	528,65	528,81	496,17	1054,83	1055,53	1015,54	1585,23	1586,93	1540,55
15	551,74	551,84	527,2	1099,92	1100,37	1076,11	1651,39	1652,48	1626,58

Preglednica 28: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za popolno streho z enakomerno obtežbo pri nivoju projektne obtežbe in mejnem nivoju obtežbe

EL.	NIVO 1,0*P			NIVO MEJNEGA OBTEŽNEGA FAKTORJA				
	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS	SCIA - MNR (2,3)	SCIA - MNR (1,58)	SCIA - T (2,22)	SCIA - T (1,58)	ABAQUS (1,58)
1	185,81	184	189,47	642,51	328,2	547,85	320,06	490,29
2	463,47	469,43	568,1	1185,98	759,31	1161,91	776,38	1046,76
3	1261,77	1266,55	1235,25	3277,59	2051,15	2668,74	2065,49	2117,6
4	666,05	662,99	679,8	1662,12	1062,19	1522,92	1050,72	1080,6
5	1846,14	1834,85	1726,9	4327,57	2909,32	3977,02	2870,3	2616,4
6	909,86	913,47	1028,93	2389,88	1501,26	2269	1511,78	1773,89

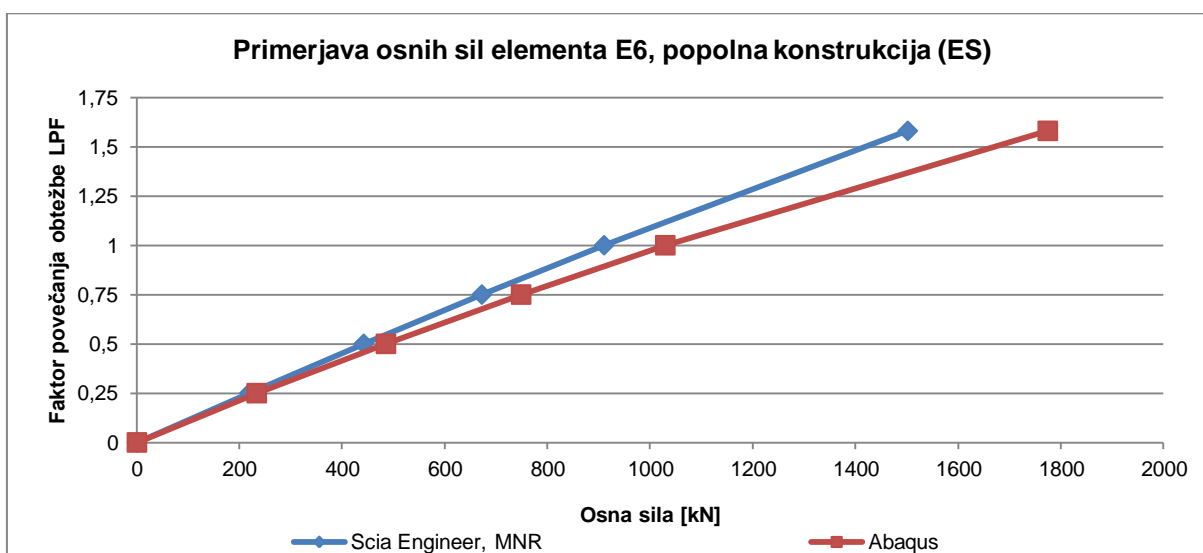
se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 28

7	1240,16	1242,94	1277,14	3041,36	1984,22	2987,85	1996,42	2248,42
8	1460,24	1461,95	1316,77	3713,88	2264,67	3449,78	2271,72	1994,36
9	3024,07	3048,64	3201	7552,04	4882,63	7405,5	4960,69	5422
10	1575,8	1591,59	1604,68	3981,32	2525,86	3841,32	2575,46	2654,21
11	474,94	482,46	442,38	977,78	736,22	1033,82	761,64	508,37
12	741,7***	741,57***	811,86	2059,47*****	1204,95***	1908,11*****	1205,51***	1992,78
13	2081,25	2082,73	2119,89	4992,61	3333,94	4829,34	3340,34	3525,6
14	2122,39	2125,71	2082,23	5223,6	3402,31	4999	3412,85	3832,66
15	2208,45	2210,59	2187,19	5341,66	3527,49	5120,72	3534,26	3791,25

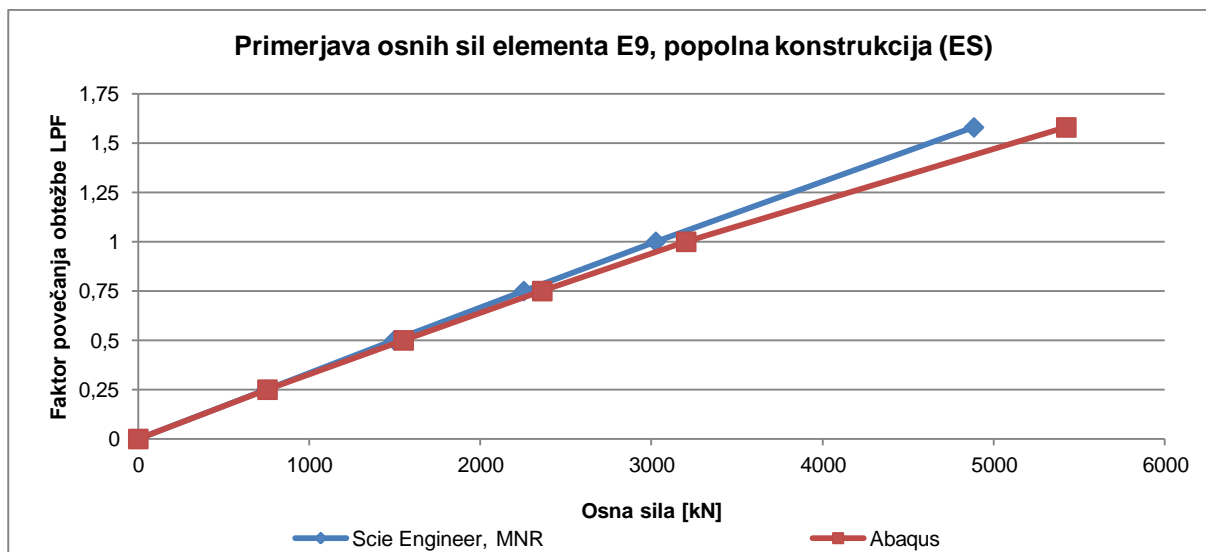
Pri pregledovanju osnih sil opazimo, da so si vrednosti v vseh nivojih obtežbe zelo podobne. Največje razlike nastanejo pri obtežnem faktorju 1,58, ki je mejni po metodi dolžine lokov.

Primerjava osnih sil je na grafih prikazana za elemente E6, E9 in E13. Te elemente sem izbrala, ker se razlika med osnimi silami najlepše vidi.



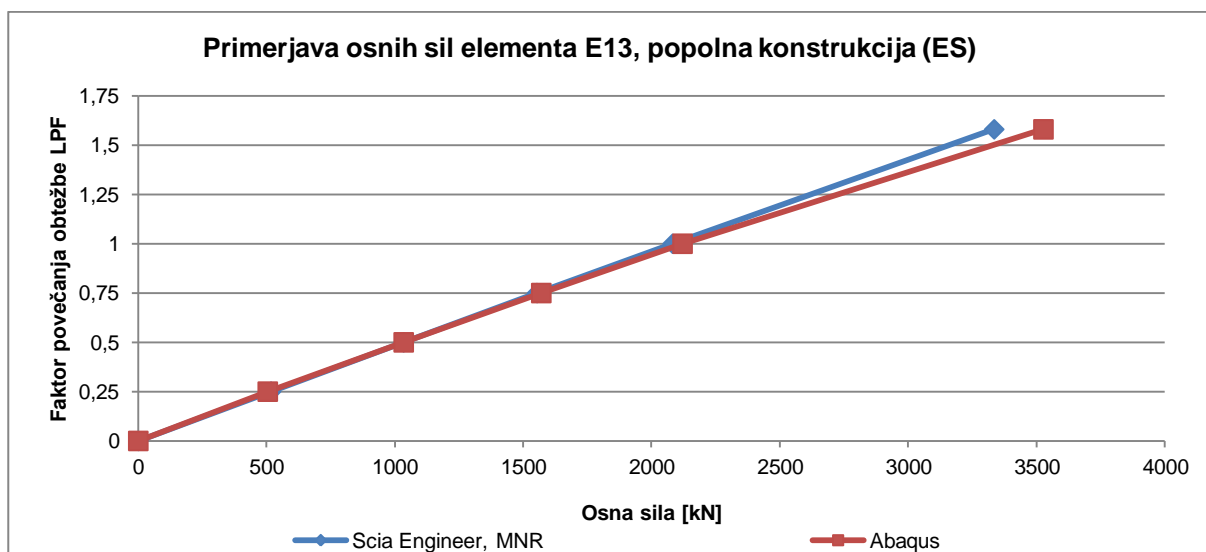
Graf 77: Primerjava osnih sil elementa E6 pri obtežbi z enakomernim snegom in popolni konstrukciji

Osní sili sta pri nižji obtežbi zelo podobni, nato pa se pri vsakem povečanju obtežbe že vidi razlika. Osne sile iz Abaqusa začnejo naraščati in so višje, kot nam jih izračuna Scia Engineer po modificirani Newton-Raphsonovi metodi. Pri mejnem obtežnem faktorju 1,58 znaša razlika med osnima silama nekaj več kot 250 kN.



Graf 78: Primerjava osnih sil elementa E9 pri obtežbi z enakomernim snegom in popolni konstrukciji

Osna sila, izračunana po teoriji dolžine lokov v Abaqusu je višja od tiste v Scie Engineer. Do faktorja 0,5 sta osni sili skoraj enaki, nato pa se lahko opazi razlika v njuni velikosti. Razlika med osnima silama pri mejnem obtežnem faktorju znaša 550 kN.



Graf 79: Primerjava osnih sil elementa E13 pri obtežbi z enakomernim snegom in popolni konstrukciji

Osna sila iz Abaqusa je višja od osne sile iz Sciee Engineer. Razlika je vidna šele po faktorju 1 ter pri mejnem obtežnem faktorju. Razlika med osnima silama znaša 200 kN.

Preglednica 29: Izkoriščenost prereza kritičnih elementov pri nivoju projektne obtežbe – enakomeren sneg brez nepopolnosti

Element	$N_{ed}$ [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]	$N_{p,Rd}/N_{Ed}$
E1	189,47	3711,4	0,05
E2	568,1	4810,5	0,12
E3	1235,25	6984,7	0,18

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 29

<b>E4</b>	679,8	6398,9	0,11
<b>E5</b>	1726,9	8124,8	0,21
<b>E6</b>	1028,93	3883,4	0,26
<b>E7</b>	1277,14	8322,4	0,15
<b>E8a</b>	1316,77	6984,7	0,19
<b>E9</b>	3201	8322,4	0,38
<b>E10</b>	1604,68	6422,3	0,25
<b>E11</b>	442,38	1360,2	0,33
<b>E12 (3)</b>	811,86	1610,0	0,50
<b>E13</b>	2119,89	8160,2	0,26
<b>E14</b>	2082,23	8322,4	0,25
<b>E15</b>	2187,19	8122,9	0,27

Vidimo, da noben element nima zelo velike izkoriščenosti na osno silo z upoštevanim vplivom lokalnega uklona. Najbolj je izkoriščena diagonala (50 %), ostali elementi pa imajo izkoriščene manj kot 40 % svoje uklonske nosilnosti. Osne sile so rezultat izračuna v Abaqusu.

#### 4.8.3 Kontrola osnih sil pri strehi z nepopolnostjo in enakomerno obtežbo s snegom

Enako kot pri popolni konstrukciji, je tudi v tem primeru primerjava osnih sil prikazana v dveh tabelah. Najprej za nivoje pod 1, nato pa še za nivo 1 ter mejne nivoje obtežbe (Abaqus in Scia).

Preglednica 30: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za streho z nepopolnostjo in enakomerno obtežbo pri nivojih 0,25, 0,5 in 0,75 projektne obtežbe

EL.	NIVO 0,25*P			NIVO 0,5*P			NIVO 0,75XP		
	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS
<b>1</b>	46,57	46,49	41,88	95,41	94,98	88,51	148,23	147,03	143,6
<b>2</b>	113,7	113,99	124,69	228,97	230,12	265,29	348,24	350,85	422,6
<b>3</b>	321,51	321,63	297,46	646,19	646,75	618,19	978,55	980,09	953,99
<b>4</b>	168,44	168,35	164,32	334,22	333,91	337,11	498,53	497,98	513,56
<b>5</b>	475,38	474,75	426,23	946,18	943,39	873,57	1417,98	1411,03	1328,91
<b>6</b>	233,23	233,53	244,99	472,76	474,16	521,34	723,51	727,43	829,7
<b>7</b>	315,64	315,13	321,35	637,06	635,45	676,33	974,76	970,11	1068,59
<b>8</b>	401,13	401,61	343,1	803	805,19	709,65	1212,31	1218,28	1095,63
<b>9</b>	764,47	765,68	762,93	1533,97	1538,95	1600,66	2320,74	2332,4	2509,85
<b>10</b>	405,55	405,36	397,95	813,01	816,41	832,07	1228,7	1236,69	1300,37
<b>11</b>	124,85	125,14	114,74	249,68	250,86	237,44	375,83	378,6	365,66
<b>12-7</b>	194,24	194,07	190,4	398,58	397,8	411,06	619,02	616,98	669,49
<b>13</b>	531,7	531,24	504,75	1066,83	1064,3	1053,14	1611,68	1604,53	1636,42
<b>14</b>	523,53	529,64	491,93	1056,73	1058,3	1026,04	1589,4	1593,4	1597,69
<b>15</b>	559,91	560,22	542,78	1118,84	1120,25	1136,12	1658,15	1688,91	1778,78

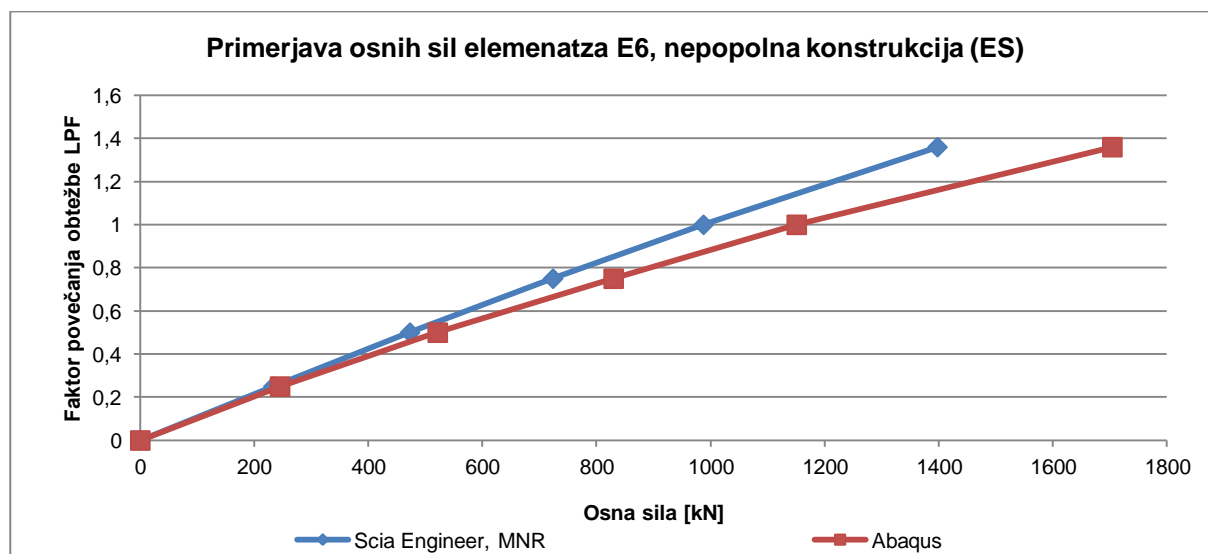
Osne sile so si pri vseh treh izračunih zelo podobne. Nikjer ni razlika med osnimi silami večja kot 10 %, ampak le za nekaj kN.

Preglednica 31: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za streho z nepopolnostjo in enakomerno obtežbo pri nivoju projektne obtežbe in mejnem nivoju obtežbe

EL.	NIVO 1*P			MEJNI NIVO OBTEŽNEGA FAKTORJA				
	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS	SCIA - MNR (1,79)	SCIA - MNR (1,36)	SCIA - T (1,72)	SCIA-T (1,36)	ABAQUS (1,36)
1	206,27	203,59	216,59	439,43	304,71	418,09	298,06	397,74
2	471,82	476,49	587,28	922,08	661,9	884,54	670,5	875,97
3	1322,36	1326	1270,7	2577,78	1845,7	2453,03	1857,64	1568,9
4	662,04	661,61	677,17	1051,29	891,71	1100,65	894,75	877,04
5	1894,98	1881	1753,55	3183,15	2601,55	3288,18	2569,35	2407,42
6	987,33	996,56	1150,59	1829,29	1397,35	1946,79	1428,07	1703,84
7	1342,59	1330,89	1485,5	4156,33	2001,76	3126,53	1963,11	2447
8	1637,53	1651,16	1479,5	3472,69	2306,39	3371,74	2350,6	2578
9	3136,76	3157,83	3434,7	6352,55	4404,33	6055,86	4439,52	5125,3
10	1997,8	1675,55	1775,6	3741,9	2340,34	3200,3	2364,53	2682,3
11	505,71	510,82	489,59	1052,6	705,86	972,48	715,5	724
12 (7)	865,32	860,85	962,34	1890,82	1301,18	1955,62	1289,91	1700
13	2175,45	2158,76	2206,38	4221,46	3039,34	3775,04	2989,27	3001,66
14	2130,9	2103,6	2171,63	3843,42	2938,43	3731,64	2960,77	3303,93
15	2263,91	2272,17	2438,39	4411,14	3139,27	4213,92	3126,83	3919,19

Pri nekaterih elementih se pri projektnem obtežnem stanju začnejo delati večje razlike v velikosti osnih sil, ki se do mejnega faktorja obteže le še povečajo.

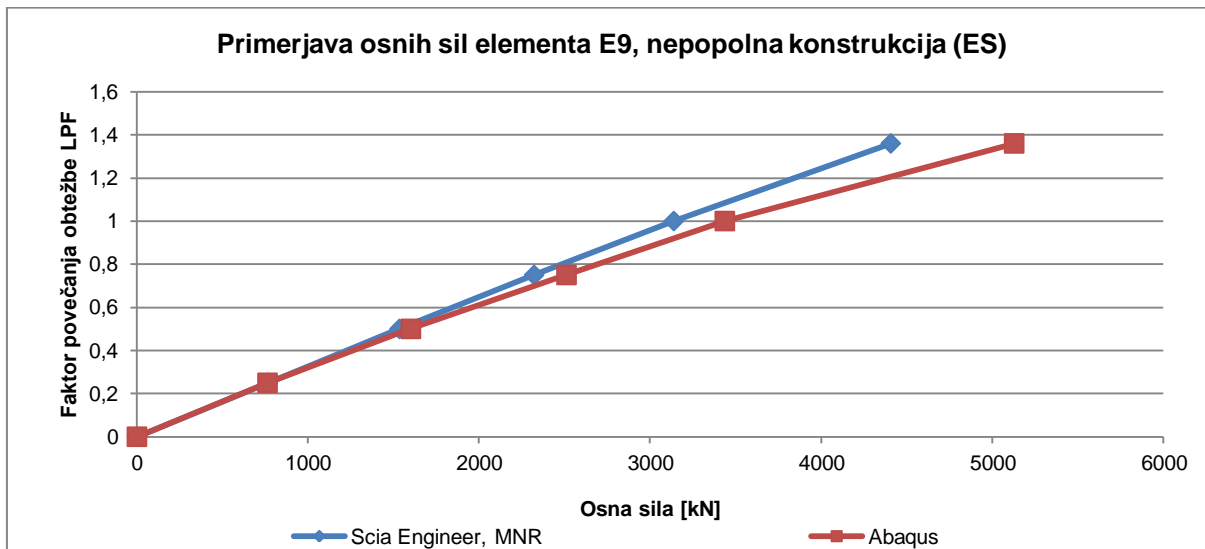
Primerjava osnih sil je na grafih prikazana za elemente E6, E9 in E15. Te elemente sem izbrala, ker se razlika med osnimi silami najlepše vidi.



Graf 80: Primerjava osnih sil elementa E6 pri obtežbi z enakomernim snegom in konstrukciji z nepopolnostjo

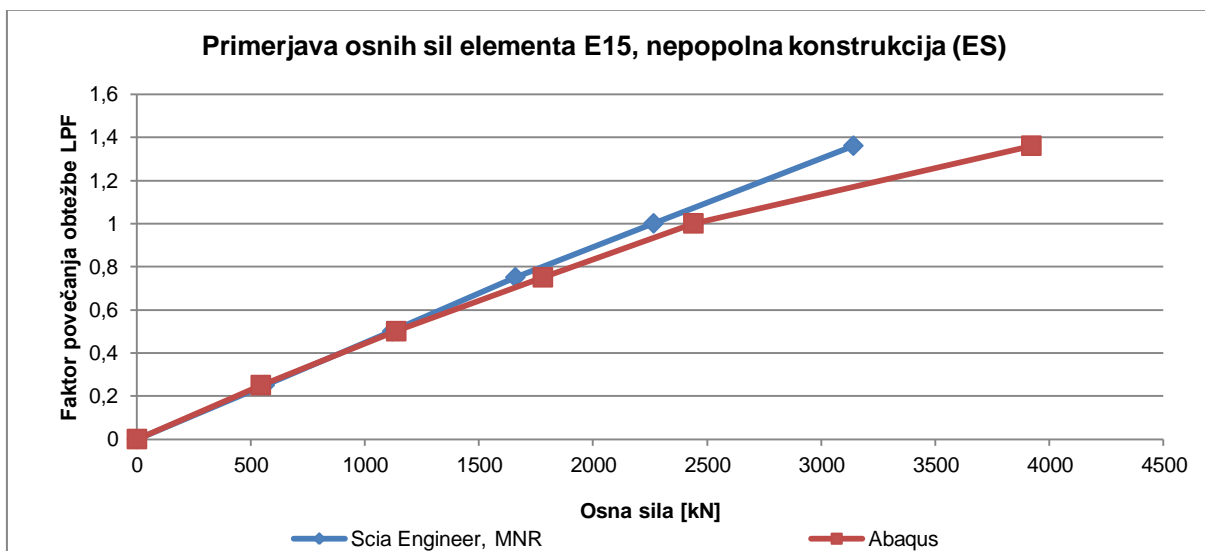


Osnii sili sta enaki pri majhni obtežbi (0,25\*projektna obtežba), nato pa se osna sila iz Abaqusa začne večati. Razlika med osnima silama pri mejnem obtežnem faktorju znaša nekaj več kot 300 kN.



Graf 81: Primerjava osnih sil elementa E9 pri obtežbi z enakomernim snegom in konstrukciji z nepopolnostjo

Pri nivoju obtežbe 0,25 sta osni sili enaki, podobni vrednosti imata tudi pri nivoju obtežbe 0,5, večja razlika je pri višjih faktorjih obtežbe. Pri mejnem obtežnem faktorju znaša razlika kar 720 kN. Osna sila iz Abaqusa je višja kot osna sila iz Scie Engineer.



Graf 82: Primerjava osnih sil elementa E15 pri obtežbi z enakomernim snegom in konstrukciji z nepopolnostjo

Pri nivoju obtežbe 0,25 in 0,5 sta osni sili enaki, nekaj razlike je že pri nivoju obtežbe 0,75 in 1, pri mejnem obtežnem faktorju pa je razlika v velikosti osnih sil nekaj manj kot 800 kN. Osna sila izračunana v Abaqusu je višja od osne sile izračunane v Scie Engineer.

Preglednica 32: Izkoriščenost prereza kritičnih elementov pri nivoju projektne obtežbe – enakomeren sneg z nepopolnostmi

Element	$N_{Ed}$ [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]	$N_{p,Rd}/N_{Ed}$
E1	216,59	3711,4	0,06
E2	587,28	4810,5	0,12
E3	1270,7	6984,7	0,18
E4	677,17	6398,9	0,11
E5	1753,55	8124,8	0,22
E6	1150,59	3883,4	0,30
E7	1485,5	8322,4	0,18
E8a	1479,5	6984,7	0,21
E9	3434,7	8322,4	0,41
E10	1775,6	6422,3	0,28
E11	489,59	1360,2	0,36
E12 (7)	962,34	1365,6	0,70
E13	2206,38	8160,2	0,27
E14	2171,63	8322,4	0,26
E15	2438,39	8122,9	0,30

Izkoriščenost prereza je kontrolirana pri nivoju projektne obtežbe, rezultati osnih sil pa so iz Abaqusa. Največjo stopnjo izkoriščenosti ima ponovno najbolj obremenjena diagonala – 70 %, ostali elementi pa imajo samo za 1 % povečano izkoriščenost kot pri popolni konstrukciji, tako da je maksimalni nivo izkoriščenosti še vedno pri 40 %.

#### 4.8.4 Kontrola osnih sil pri strehi brez nepopolnosti z obtežbo nakopičenega snega

Pri strehi, obremenjeni z obtežbo nakopičenega snega, kontrole izkoriščenosti temenskih nosilcev nisem delala, saj se je izkazalo, da so osne sile manjše kot pri strehi z enakomerno porazdeljeno snežno obtežbo.

Preglednica 33: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za streho brez nepopolnostjo z obtežbo nakopičenega snega pri nivojih 0,25, 0,5 in 0,75 projektne obtežbe

EL.	NIVO 0,25*P			NIVO 0,5*P			NIVO 0,75*P		
	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS
1	18,22	18,12	5,96	35,46	35,05	12,05	50,47	49,37	17,96
2	56,08	56,14	59,84	113,08	113,3	126,47	170,1	170,57	192,74
3	467,53	466,16	459,28	942,29	941,89	985,25	1455,11	1445,66	1532,71
4	166,89	166,86	161	329,98	329,8	330,36	490,25	489,7	487,11
5	518,4	518,23	502,12	1025,43	1024,72	1041,13	1528,7	1523,07	1548,73
6	170,37	170,42	150,6	343	343,28	316,41	520,49	521,4	482,5
7	663,63	664,44	679,09	1355,02	1358,74	1485,06	2112,81	2123,22	2378,62
8	695,75	619,28	646,16	1401,11	1405,21	1365,56	2142,58	2154,77	2085,68
9	847,85	848,22	848,44	1704,8	1706,4	1798,3	2592,88	2596,84	2754,78
10	539,36	539,55	530,94	1081,3	1082,15	1120,68	1639,99	1642,22	1705,02

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 33

11	171,48	171,56	156,54	343,34	343,65	329,08	519,6	520,12	498,89
12	261,04*	261,14*	243,91	526,57*	527,03*	517,01	809,6*	810,92*	794,08

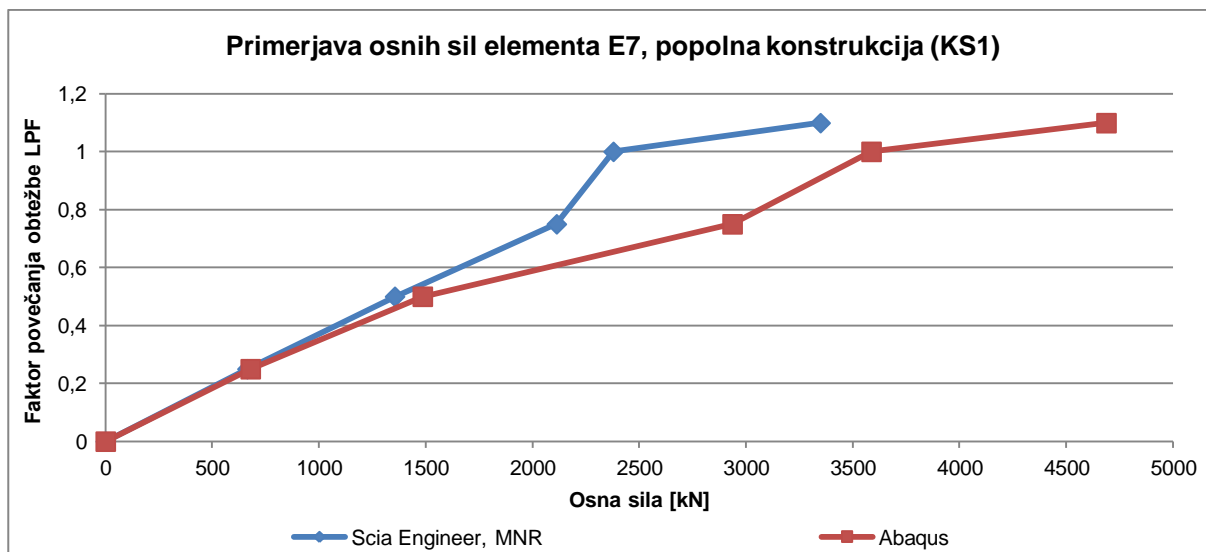
Osne sile so v večini primerov enake, velika razlika je le pri elementu E1 – tu se sile kar precej razlikujejo. Razlog je verjetno v tem, ker osne sile, ki jih dobim, niso povprečene na celoten element, ampak so rezultat posameznega končnega elementa. Kot kaže, je končni element pri Sc tako oblikovan, da se v njem pojavi precej višja osna sila kot pri računu v Abaqusu.

Preglednica 34: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za streho brez nepopolnostjo z obtežbo nakopičenega snega pri nivoju projektne obtežbe in kritičnem nivoju obtežbe

EL.	NIVO 1,0*P			MEJNI NIVO OBTEŽNEGA FAKTORJA				
	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS	SCIA - MNR (1,45)	SCIA-MNR (1,099)	SCIA - T (1,5)	SCIA-T (1,099)	ABAQUS (1,099)
1	63,03	60,91	24,58	60,59	66,07	68,94	63,53	28,39
2	230,23	230,83	262,77	352,92	254,08	361,84	254,85	294,5
3	2004,12	1977,73	2171,3	3745,49	2243,23	3350,52	2195,53	2631
4	648,5	647,17	637,89	914,27	709,61	935,9	707,75	698,02
5	2008,61	2005,99	2029,41	2779,13	2191,38	2838,93	2188,65	2162,78
6	708,76	711,5	668,02	1091,38	786,53	1194,01	790,8	759,95
7	2936,01	2986,81	3586,9	5461	3348,46	6010,18	3378,26	4687,4
8	2916,08	2601,88	2879,7	4589,97	3239,27	5064,98	3282,33	3367,5
9	3235,52	3527,79	3800	5523,02	3903,98	5799,85	3913,8	4340,2
10	2033,95	2216,83	2321,2	3345,1	2444,75	3519,91	2451,49	2615,4
11	698,9	699,72	677,08	1048	771,37	1080,25	772,49	757,32
12	1109,39*	1112,26*	1107,81	2119,23**	1238,46*	2259,35**	1242,19*	1498,99

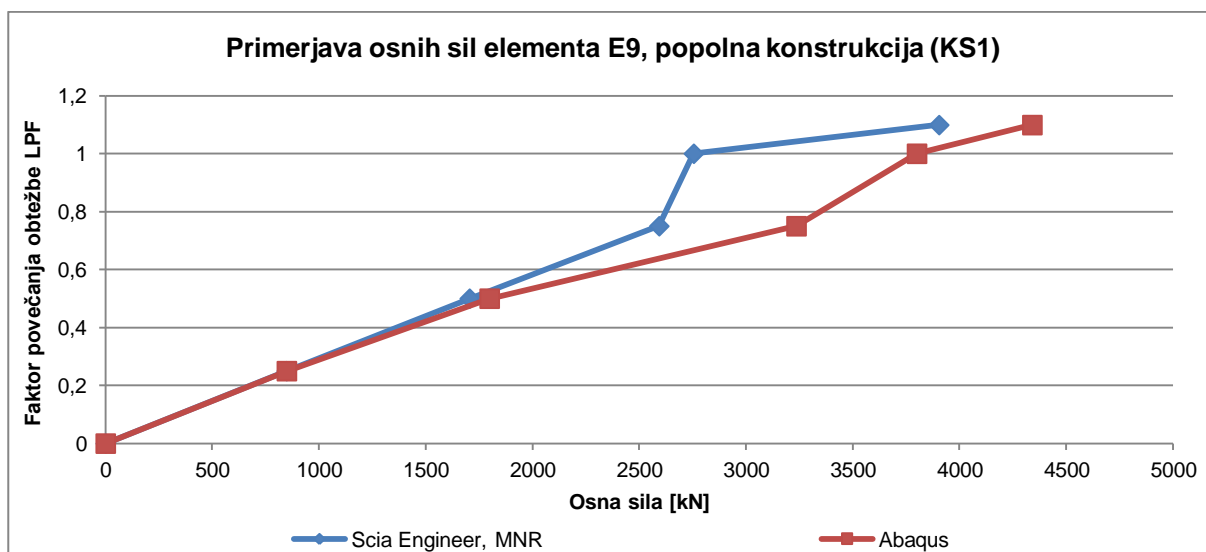
Osne sile se tudi pri teh dveh faktorjih ne razlikujejo veliko, najbolj se vidi razlika pri element E1 in pa E7. Element E7 se nahaja na delu, kjer je povese pri nakopičenem snegu največji, zato se tudi pojavi razlika v osni sili.

Primerjava osnih sil je na grafih prikazana za elementa E7 in E9. Ta dva elementa sem izbrala, ker se razlika med osnimi silami najlepše vidi.



Graf 83: Primerjava osnih sil elementa E7 pri obtežbi z nakopičenim snegom in popolni konstrukciji

Osne sile so enake pri nivoju obtežbe 0,25 in se malo razlikujejo pri nivoju obtežbe 0,5. Pri višjem nivoju je razlika med osnima silama iz Abaqusa in Scie Engineer večja. Pri mejni obtežbi je osna sila v Abaqusu za 1300 kN višja od osne sile iz Scie Engineer.



Graf 84: Primerjava osnih sil elementa E9 pri obtežbi z nakopičenim snegom in popolni konstrukciji

Podobno kot pri elementu E7 sta tudi pri elementu E9 osni sili pri nivoju 0,25 enaki, manjša razlika pa je pri nivoju 0,5. Osna sila iz Abagusa je pri mejnem nivoju obtežbe za 450 kN višja od izračunane v programu Scia Engineer.

Preglednica 35: Izkoriščenost prereza kritičnih elementov pri nivoju projektne obtežbe – nakopičen sneg brez nepopolnosti

Element	$N_{Ed}$ [kN]	$N_{b,Rd}$ [kN]	$N_{p,Rd}/N_{Ed}$
E1	24,58	3711,4	0,01
E2	262,77	4810,5	0,05

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 35

<b>E3</b>	2171,3	6984,7	0,31
<b>E4</b>	637,89	6398,9	0,10
<b>E5</b>	2029,41	8124,8	0,25
<b>E6</b>	668,02	3883,4	0,17
<b>E7</b>	3586,9	8322,4	0,43
<b>E8b</b>	2879,7	8335,6	0,35
<b>E9</b>	3800	8322,4	0,46
<b>E10</b>	2321,2	6422,3	0,36
<b>E11</b>	677,08	1360,2	0,50
<b>E12 (1)</b>	1107,81	1768,5	0,63

Najbolj izkoriščen prerez imata ponovno diagonali (E11 in E12), sledi pa jima element E9 z 46 % izkoriščenim prerezom. Element se nahaja na vogalnem delu strehe v prvem pasu (tj. med obročema 1 in 2).

#### 4.8.5 Kontrola osnih sil pri strehi z nepopolnostjo in obtežbo nakopičenega snegom

Enako, kot pri strehi brez nepopolnosti, tudi v tem primeru nisem upoštevala temenskih nosilcev, saj osne sile niso tako velike kot v primeru enakomernega snega.

Preglednica 36: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za streho z nepopolnostjo in obtežbo nakopičenega snega pri nivojih 0,25, 0,5 in 0,75 projektne obtežbe

EL.	NIVO 0,25*P			NIVO 0,5*P			NIVO 0,75*P		
	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS
1	13,97	13,88	0,74	25,39	24,99	n. sila	32,68	33,56	n. sila
2	56,14	56,85	61,85	114,92	114,93	125,96	173,84	173,55	191,07
3	496,86	494,97	494,71	1019,21	1008,8	1025,64	1607,11	1569	1596,9
4	166,05	166	172,01	327,6	327,38	341,34	484,77	484,11	501,35
5	506,09	505,71	521,7	996,34	994,51	1040,27	1470,2	1464,91	1524,65
6	185,13	185,32	176,89	374,27	375,57	360,75	569,02	574,33	544,75
7	732,74	735,4	788,16	1520,67	1534,19	1712,46	2431,2	2474,55	2917,71
8	701,52	705,19	679,89	1412,26	1430,98	1391,77	2156,49	2215,06	2143,08
9	873,05	874,06	914,66	1762,57	1767,62	1878,95	2695,59	2710,97	2890,43
10	537,67	538,4	554,97	1077,77	1081,5	1130,44	1635,43	1646,15	1717,1
11	170,82	170,85	162,57	342,37	342,38	330,39	519,36	518,87	501,59
12	272,94*	273,63*	245,82	553,88*	557,28*	523,31	886,39**	891,35**	840,53

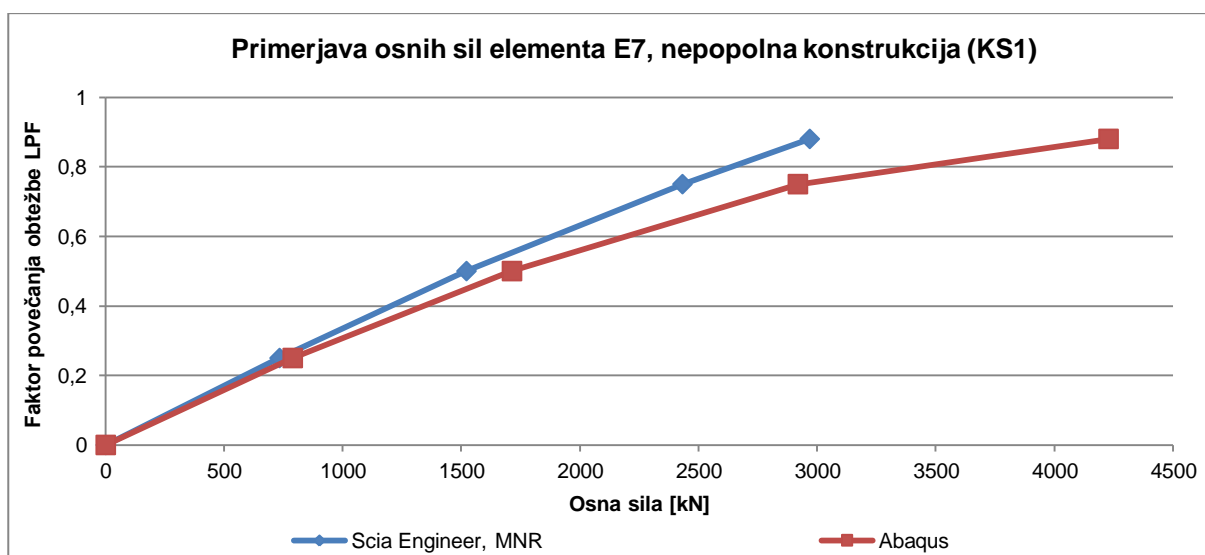
Največja razlika med osnimi silami je zopet vidna pri elementu E1, kjer rezultati iz Abaqusa pokažejo natezno osno silo, pri rezultatih iz Scie pa je prisotna majhna tlačna sila. Začnejo se tudi delati razlike v osni sili pri elementu E7 pri nivoju obtežbe 0,75, saj se bližamo kritičnemu nivoju obtežbe izračunanemu v Abaqusu (0,88).

Preglednica 37: Osne sile, določene v Scii in Abaqusu, za streho z nepopolnostjo in obtežbo nakopičenega snega pri nivoju projektne obtežbe in mejnem nivoju obtežbe

EL.	NIVO 1,0*P			MEJNI NIVO OBTEŽNEGA FAKTORJA				
	SCIA - MNR	SCIA - T	ABAQUS	SCIA - MNR (1,23)	SCIA-MNR (0,88)	SCIA - T (1,23)	SCIA-T (0,88)	ABAQUS (0,88)
1	42,61	45,53	/	37,98	38,42	54,64	40,05	n.sila
2	237,82	236,12	/	317,36	206,82	299,9	206,07	229,76
3	2354,39	2196,41	/	4339,89	1961,35	2987,42	1881,54	2216,76
4	635,76	634,08	/	751,51	584,91	749,51	563,86	579,75
5	1916,14	1903,82	/	2485,71	1672,94	2399,65	1697,22	1708,08
6	768,57	788,46	/	876,59	673,64	1003,14	684,13	610,94
7	3539,15	3668,06	/	4982,49	2967,71	5673,6	3042,71	4227,27
8	2929,86	3089,69	/	3688,46	2552,2	4209,85	2650,82	2598,08
9	3693,29	3734,46	/	4824,86	3203,52	4899,44	3229,24	3537,03
10	2207,43	2239,19	/	2790,56	1929,16	2883,52	1948,72	2075,77
11	703,72	700,55	/	918,3	613,7	882,58	612,37	604,82
12	1354,25**	1363,34**	/	2195,58**	1105,08**	2222,4**	1112,16**	1338,61

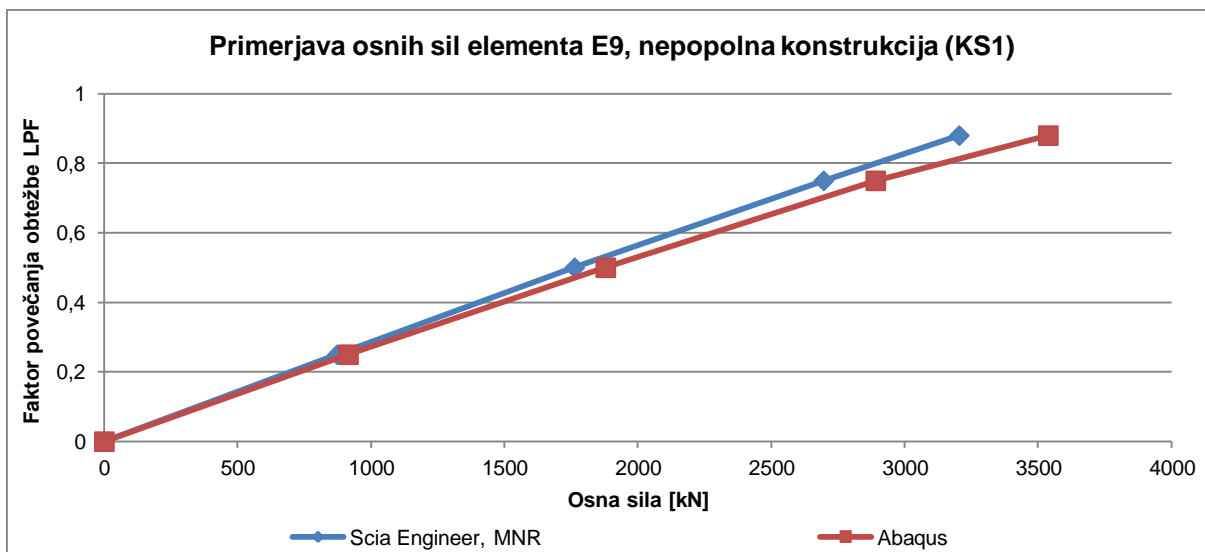
Pri projektne nivoju obtežbe v Abaqusu nimam določenih osnih sil, saj konstrukcija do tega nivoja ne pride, ampak se poruši pri nivoju 0,88. Razlike pri nivoju obtežbe 0,88 so najbolj vidne pri elementu E7, kjer je osna sila iz Abaqusa precej večja kot tista iz Scie. Razlog je seveda bližina porušitve konstrukcije na tem mestu.

Primerjava osnih sil je na grafih prikazana za elementa E7 in E9. Ta dva elementa sem izbrala, ker se razlika med osnimi silami najlepše vidi.



Graf 85: Primerjava osnih sil elementa E7 pri obtežbi z nakopičenim snegom in konstrukciji z nepopolnostjo

Osne sile so podobne pri faktorju obtežbe 0,25, nato pa se začne delati razlika. Vrednosti iz Abaqusa so višje od tistih iz Scie, pri mejni obtežbi je razlika v velikosti osnih sil 1250 kN.



Graf 86: Primerjava osnih sil elementa E9 pri obtežbi z nakopičenim snegom in konstrukciji z nepopolnostjo

Osne sile so pri nivoju 0,25 podobne, nato pa se počasi veča razlika. Ta na koncu ni tako velika kot pri elementu E7. Osna sila iz Abaqusa je za 350 kN višja od osne sile določene v Scii Engineer.

Preglednica 38: Izkoriščenost prereзов kritičnih elementov pri nivoju kritične obtežbe – nakopičen sneg z nepopolnostmi

Element	$N_{ed}$ [Kn]	$N_{b,Rd}$ [kN]	$N_{p,Rd}/N_{Ed}$
<b>E1</b>	n.sila	3711,4	/
<b>E2</b>	229,76	4810,5	0,05
<b>E3</b>	2216,76	6984,7	0,32
<b>E4</b>	579,75	6398,9	0,09
<b>E5</b>	1708,08	8124,8	0,21
<b>E6</b>	610,94	3883,4	0,16
<b>E7</b>	4227,27	8322,4	0,51
<b>E8b</b>	2598,08	8335,6	0,31
<b>E9</b>	3537,03	8322,4	0,43
<b>E10</b>	2075,77	6422,3	0,32
<b>E11</b>	604,82	1360,2	0,44
<b>E12 (2)</b>	1338,61	1481,4	0,90

Izkoriščenost prereza je tokrat preverjena pri nivoju mejne obtežbe, osne sile pa so, enako kot v prejšnjih primerih, rezultat izračuna v Abaqusu. Vidimo, da je izkoriščenost najbolj obremenjene diagonale precej velika (90 %), razlog za tako veliko izkoriščenost pa je bližina porušitve. Ostali elementi niso tako močno izkoriščeni, najbolj (50 %) je izkoriščen element E7, pri ostalih pa je vrednost nižja od 45 %.

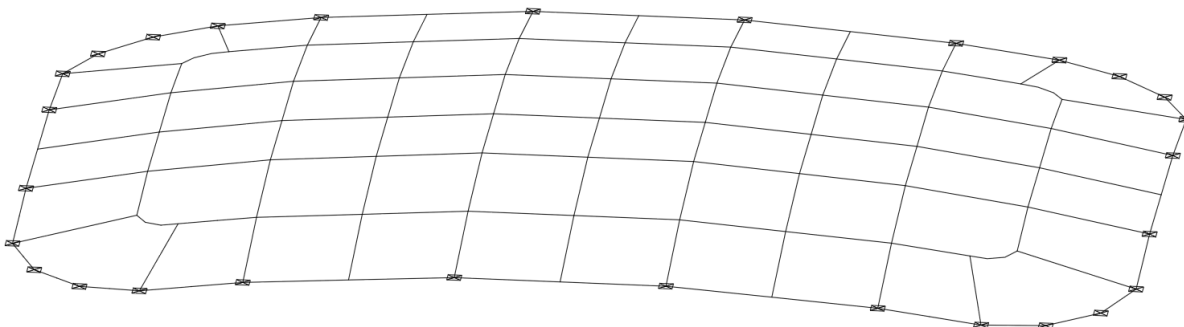
## 4.9 Pokrov – temenski del strehe

Za analizo samega pokrova strehe sem se odločila, ker je brez dodatnih diagonal, ki bi povečevale togost konstrukcije, ter ker je zelo plitek. Pričakovala sem, da bodo rezultati vsaj tako kritični kot pri celotni strehi, kar pa ne drži.

### 4.9.1 Geometrijski podatki, obtežba in nepopolnosti

#### 4.9.1.1 Geometrija in določitev togosti podpore

Pokrov je del strehe, ki se nahaja v temenu. Je del, kjer ni diagonal, ampak imamo samo temenske nosilce v obeh smereh. Njegov razpon je 37 m v krajši smeri in 58 m v daljši smeri, višina je 3 m.



Slika 85: Pokrov (temenski del strehe) s prikazanimi pozicijami podpor

Pokrov sem modelirala v Abaqusu s tremi različnimi podporami – toge podpore, vrtljive podpore, ter z vzmetmi v x in y smeri, ki so ponazarjale ostali del strehe. Togost vzmeti sem določila tako, da sem pri celotni strehi, obteženi z enakomerno obtežbo s snegom, izmerila pomike v x in y smeri. Nato sem vrtljivo podprtemu pokrovu naložila enako obtežbo in izračunala reakcije v podporah. Po enačbi

$$k = \frac{0,8P}{w} \quad (5)$$

sem določila prva približka za koeficient vzmeti. Vnesla sem ga v program in izmerila pomike, ki pri tem nastanejo na mestu podpor. Ponavljala sem toliko časa, dokler nista bila povprečna pomika pri pokrovu in celotni strehi približno enaka. Vrednosti k faktorja pri podpori z vzmetmi znašata:

$$k_1 = 6,3 \cdot 10^8 \text{ N/m}$$

$$k_2 = 3,3 \cdot 10^8 \text{ N/m}$$

#### 4.9.1.2 Obtežba pokrova

##### 4.9.1.2.1 Lastna teža

Lastne teža pokrova je enaka kot takrat, ko sestavlja del celotne strehe. Ker je ta obtežba že prikazana v točki 4.2.2.1, je ne bom ponovno prikazovala.



#### 4.9.1.2.2 Obtežba snega

Obtežba s snegom je razdeljena na dva dela – enakomerna obtežba s snegom, ki je enaka kot pri celotni strehi in nakopičenje snega. Nakopičenje sem ponovno upoštevala v dveh smereh.

- Nakopičen sneg I – kopičenje v smeri daljšega razpona

$$\frac{h}{b} = \frac{2,98}{57,86} = 0,052 \rightarrow \mu_3 = 0,2 + 10 * 0,052 = 0,72 \quad (6)$$

$$P_5 = 0,72 * 1,51 = \mathbf{1,09 \text{ kN/m}^2}$$

$$P_6 = 0,5 * P_5 = \mathbf{0,54 \text{ kN/m}^2}$$

- Nakopičen sneg II – kopičenje v smeri krajšega razpona

$$\frac{h}{b} = \frac{2,98}{36,97} = 0,081 \rightarrow \mu_3 = 0,2 + 10 * 0,081 = 1,01 \quad (7)$$

$$P_7 = 1,01 * 1,51 = \mathbf{1,53 \text{ kN/m}^2}$$

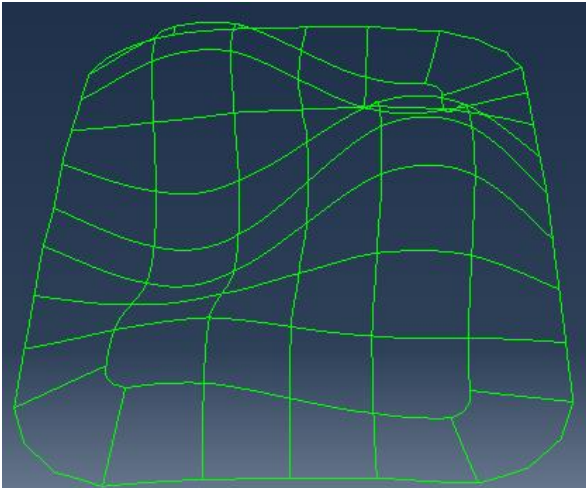
$$P_8 = 0,5 * P_7 = \mathbf{0,76 \text{ kN/m}^2}$$

- Nakopičen sneg III – kopičenje v smeri krajšega razpona

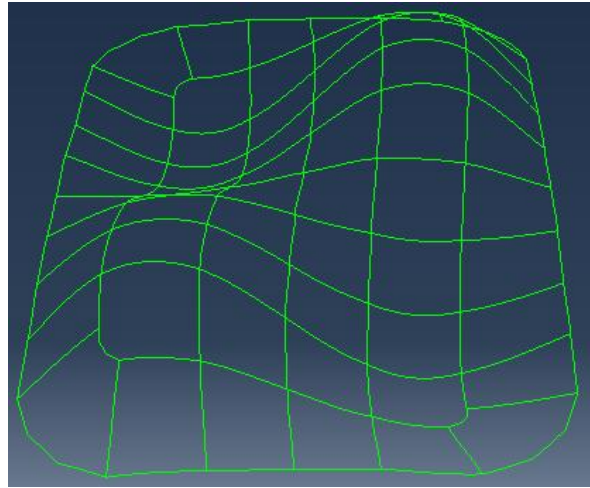
V tem primeru je oblika kopičenja enaka kot pri nakopičenem snegu II, velikost obtežbe s snegom pa je enaka, kot pri celotni strehi, tj. vrednosti  $P_1 = 2,567 \text{ kN/m}^2$  in  $P_2 = 1,284 \text{ kN/m}^2$ .

#### 4.9.1.3 Nepopolnosti pokrova

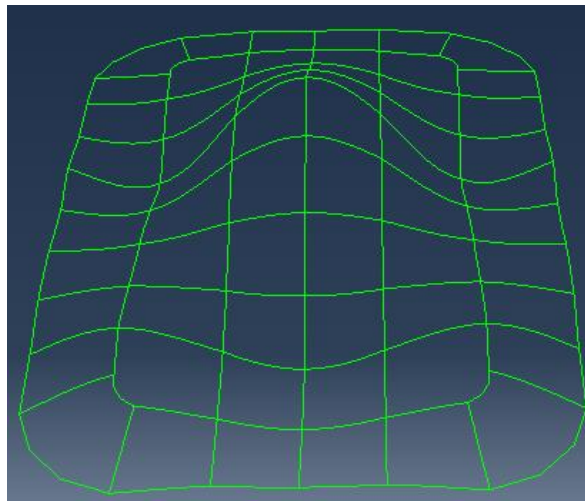
Izračuni na pokrovu so narejeni za popolno konstrukcijo ter za tri oblike nepopolnosti, ki predstavljajo oblike lastnih vrednosti. Amplituda nepopolnosti je v vseh primerih enaka in znaša  $L/600 = 0,0616 \text{ m}$ .



Slika 86: Pokrov, nepopolnost 1



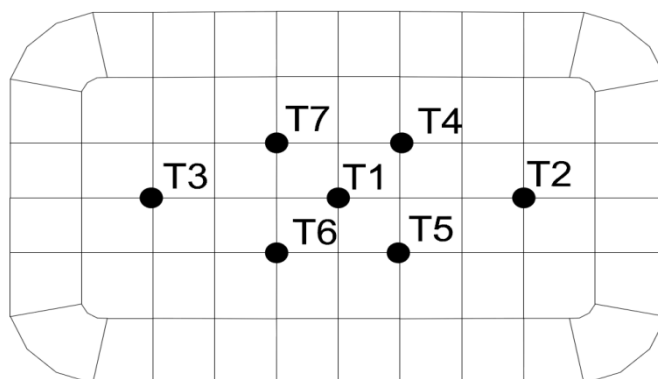
Slika 87: Pokrov, nepopolnost 2



Slika 88: Pokrov, nepopolnost 3

#### 4.9.2 Rezultati obtežnih kombinacij

Pri vseh treh podporah in vseh štirih obtežbah sem določila mejno vrednost povečanja obtežbe pri popolni in nepopolni konstrukciji. Spremljala sem tudi pomike točk v sedmih točkah pokrova.



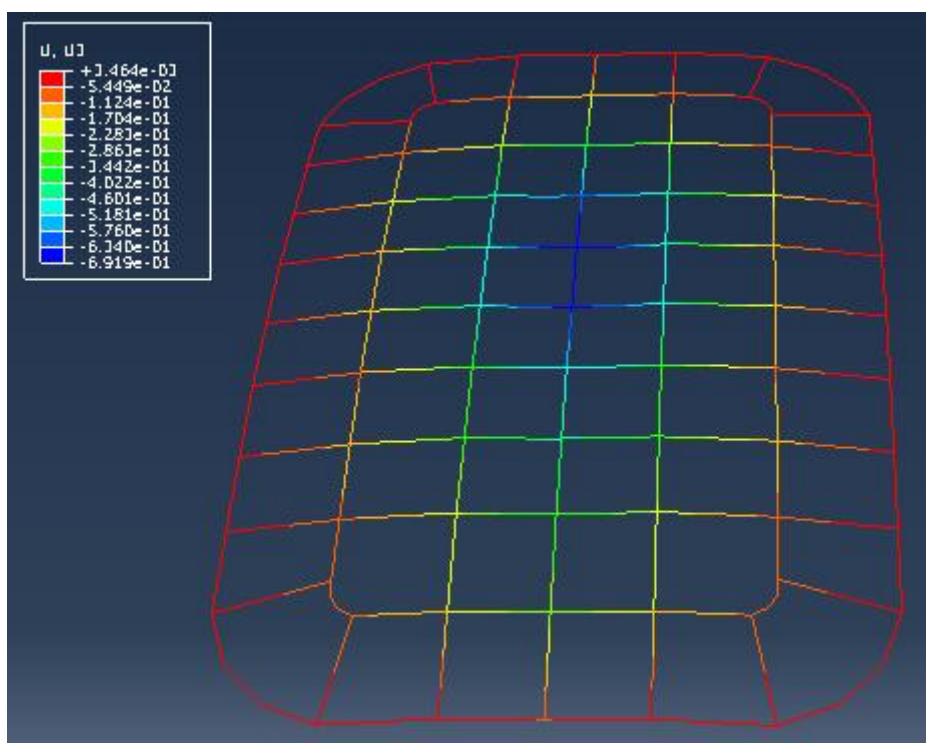
Slika 89: Položaj opazovanih točk pokrova

V naslednjih štirih preglednicah so zbrani rezultati kritičnih vrednosti za posamezno obtežno kombinacijo.

Preglednica 39: Mejne vrednosti pri enakomernem snegu

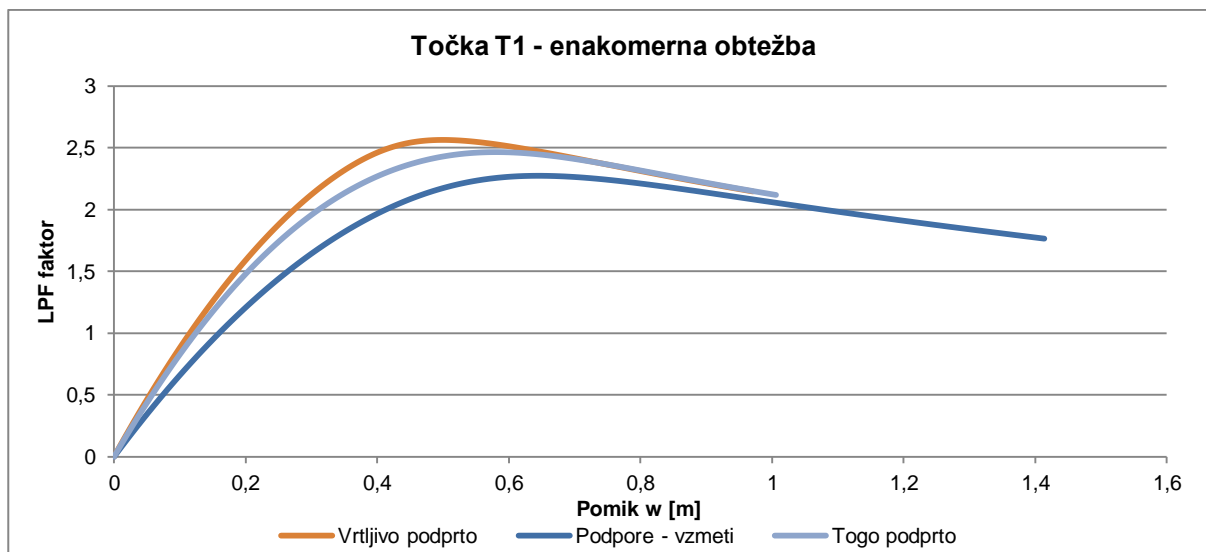
	Popolna konstrukcija	Nepopolnost 1	Nepopolnost 2	Nepopolnost 3
Vrsta podpiranja	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>
Vrtljive p.	2,563	1,952	1,840	2,17
P. z vzmetmi	2,272	1,807	1,782	1,98
Toge p.	2,467	2,282	2,345	2,133

Vrednosti kritičnega faktorja so precej višje kot pri celotni strehi. Razlog je v manjši skupni obtežbi, ki nastopa na konstrukciji ter manjši razpon konstrukcije. Najbolj neugodne podpore so vzmeti, saj so pri tej vrsti podpiranja vsi mejni faktorji obtežbe najnižji.



Slika 90: Poves pokrova brez nepopolnosti pri enakomerni obtežbi s snegom in podporami-vzmetmi

Na sliki 90 se vidi, kako se deformira pokrov pri vzmeteh pri mejnem faktorju obtežbe. Točka, ki se najbolj povese, ni temenska točka, kot bi se pričakovalo, temveč vozlišče nad njo. Razlog je v tem, da je tam obešen semafor, ki s svojo težo vpliva na samo deformiranje. V primeru, da tega semaforja ne bi bilo, bi bil največji poves v temenski točki. Za temensko točko T1 sem narisala in primerjala P-w diagrame za vse tri vrste podpiranja.



Graf 87: P-w diagram v točki T1 pri enakomerni obtežbi s snegom in popolni konstrukciji

Na grafu 134 se vidi, da ima pokrov, ki ima za podpore vzmeti, najmanjšo togost, zato so pomiki v tem primeru največji, faktor mejne nosilnosti pa najnižji. Najvišji faktor mejne nosilnosti ima vrtljivo podprta konstrukcija, ki ima tudi najmanjše pomike, je pa potrebno poudariti, da pomiki toge konstrukcije niso veliko večji kot pri vrtljivi konstrukciji, medtem ko je razlika s pokrovom, podprtim z vzmetmi, večja.

Preglednica 40: Mejne vrednosti pri nakopičenju snega I

	Popolna konstrukcija	Nepopolnost 1	Nepopolnost 2	Nepopolnost 3
Vrsta podpiranja	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>
Vrtljive p.	2,952	2,684	2,206	2,658
P. z vzmetmi	2,733	2,575	2,119	2,506
Toge p.	3,373	3,348	3,151	3,132

Pri nakopičenju snega 1, tj. v smeri daljšega razpona pokrova, je mejni faktor obtežbe višji kot pri enakomerni obtežbi. Razlog je v tem, da imamo nižjo vrednost obtežbe, torej je mejni faktor pričakovano višji. Najnižjo nosilnost imamo zopet pri konstrukciji, podprti z vzmetmi, najvišjo nosilnost pa pri togo podprti konstrukciji. Na nosilnost oziroma padec mejne vrednosti obtežnega faktorja najbolj vpliva nepopolnost 2.

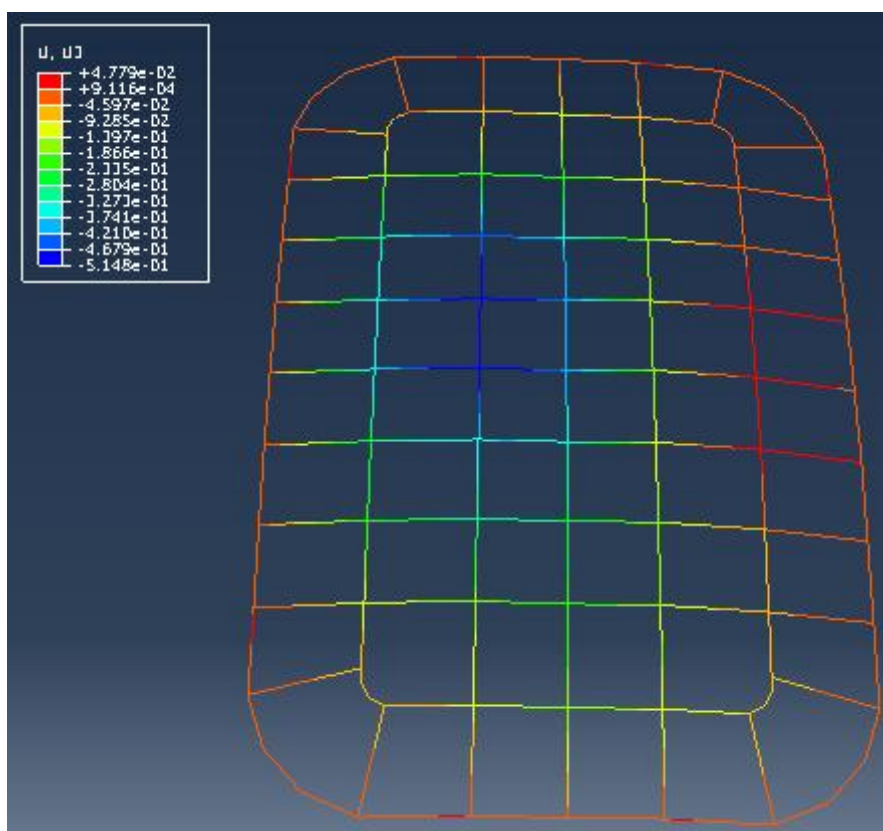
Ker je nakopičenje snega v smeri daljšega razpona manj kritično kot nakopičenje snega v smeri krajšega razpona, tega primera ne bom bolj podrobno analizirala.

Preglednica 41: Mejne vrednosti pri nakopičenju snega II

	Popolna konstrukcija	Nepopolnost 1	Nepopolnost 2	Nepopolnost 3
Vrsta podpiranja	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>
Vrtljive p.	2,593	2,684	2,06	2,658
P. z vzmetmi	2,393	2,011	2,08	2,25
Toge p.	3,079	2,738	2,808	2,746

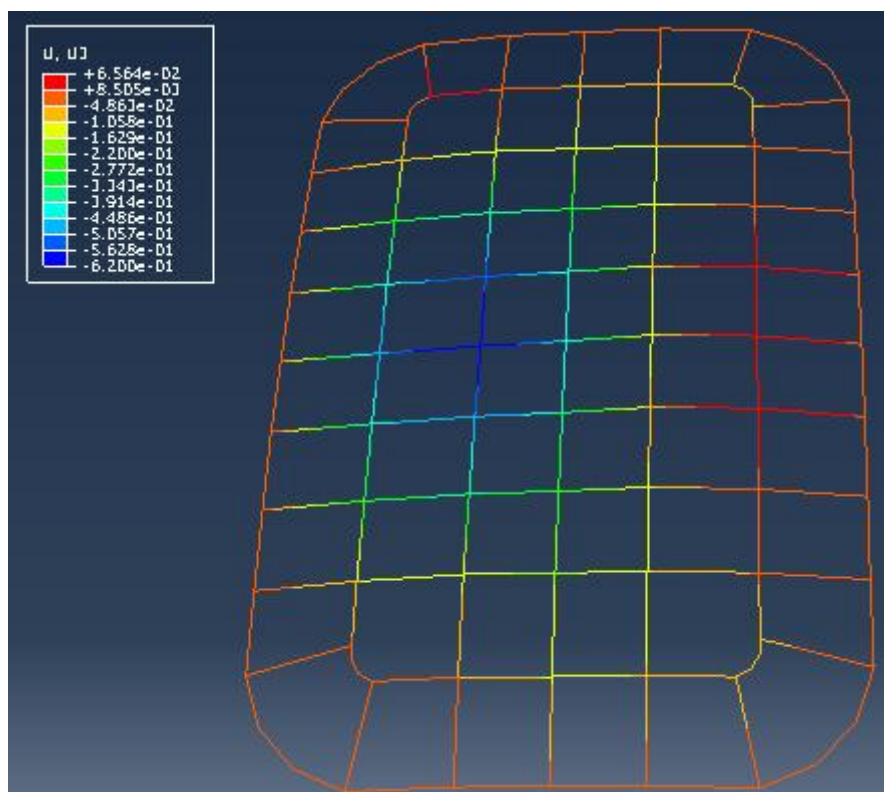
Mejni faktorji nakopičenja obtežbe v krajši smeri so nižji kot pri nakopičenju v daljši smeri, saj imamo v tem primeru višji nivo obtežbe. Poleg tega se je že pri celotni strehi videlo, da je nakopičenje v krajši smeri najbolj neugodno za samo konstrukcijo. Najnižjo mejno nosilnost imamo zopet pri konstrukciji, podprti z vzmetmi, najvišjo pa pri togo podprti konstrukciji. Sama mejna nosilnost je višja kot pri pokrovu z enakomerno obtežbo, ker je pri enakomerni obtežbi celotna obtežba s snegom višja kot pri nakopičenju. Pri celotni strehi pa je bilo ravno obratno – višja obtežba je bila pri nakopičeni obtežbi s snegom.

Na spodnjih slikah je prikazano deformiranje pri popolni konstrukciji in konstrukciji z nepopolnostmi pri mejnem nivoju obtežbe.

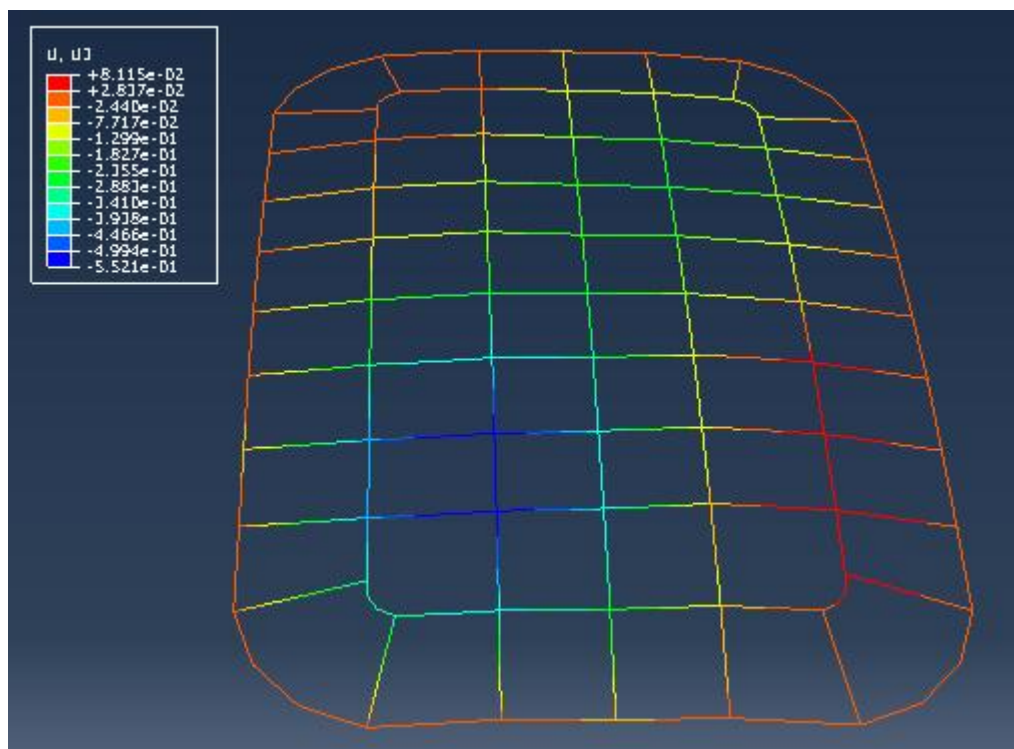


Slika 91: Deformiranje pokrova brez nepopolnosti pri nakopičeni obtežbi II in podporami – vzmetni

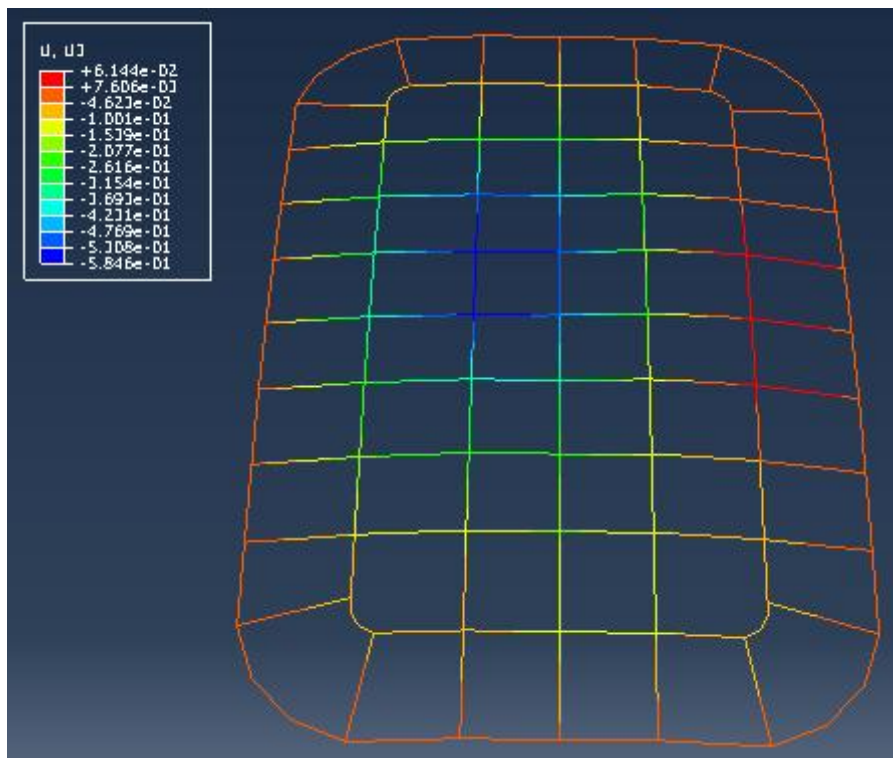
Poves pri popolni konstrukciji je največji na delu konstrukcije, kjer imamo višji nivo kopičenja obtežbe. Maksimalni poves je v točki, ki je levo in nekoliko višje od temenske točke (točka T4). Podobno deformacijsko obliko imamo tudi pri nepopolnosti 3, pri nepopolnosti 1 je maksimalni pomik v isti ravnini kot temenska točka (glede na popolno konstrukcijo se točka z maksimalnim pomikom premakne nižje), deformacijska oblika pri nepopolnosti 2 pa je drugačna – najbolj se povesi sprednji levi del pokrova. Razlog je v tem, da ima že sama nepopolnost tako deformacijsko obliko, ki nato pri deformiranju konstrukcije pride do izraza.



Slika 92: Deformiranje pokrova z nepopolnostjo 1 pri nakopičeni obtežbi II in podporami - vzmetni

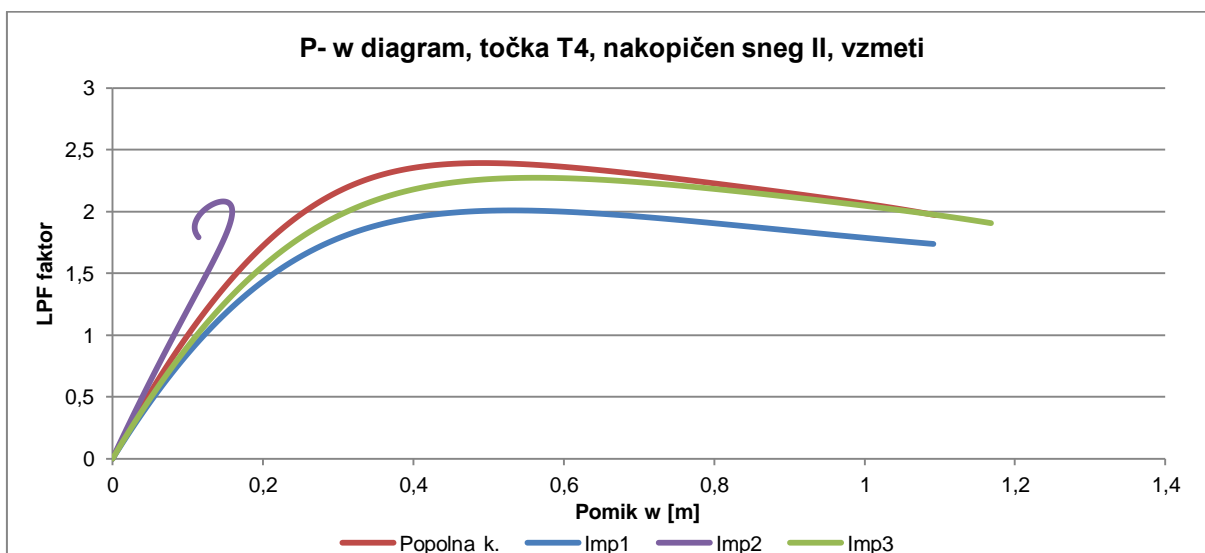


Slika 93: Deformiranje pokrova z nepopolnostjo 2 pri nakopičeni obtežbi II in podporami - vzmetni



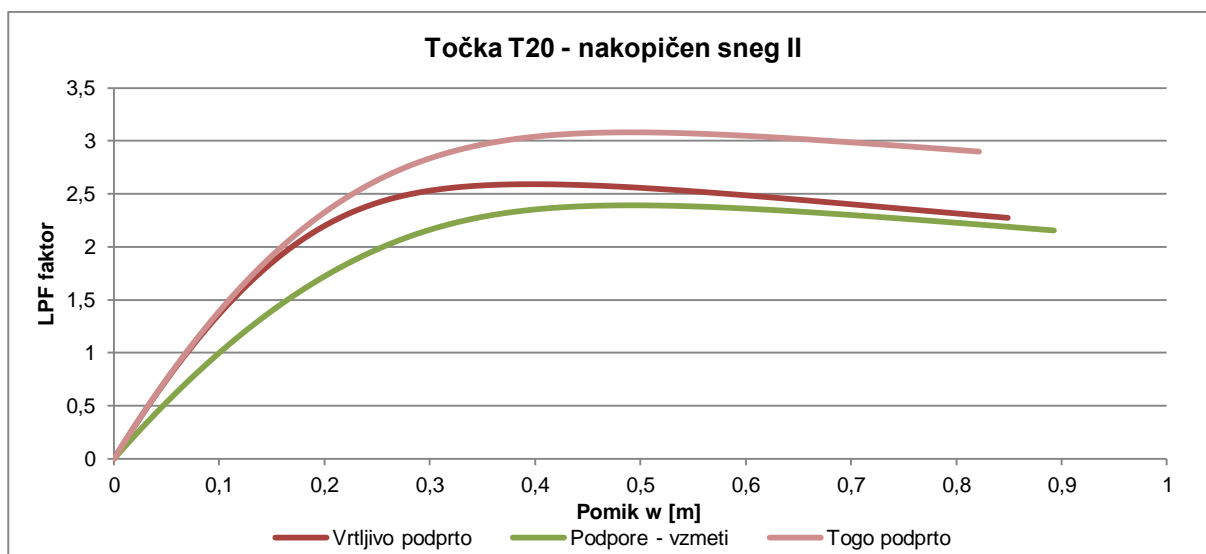
Slika 94: Deformiranje pokrova z nepopolnostjo 3 pri nakopičeni obtežbi II in podporami – vzmetni

Prikazala bom še P-w diagrame za točko T4 pri različnih nepopolnostih pri podpiranju z vzmetmi.



Graf 88: P-w diagram točke T4 pri nakopičeni obtežbi s snegom II ter podporami – vzmetni pri različnih oblikah nepopolnosti

Graf nam pokaže enake rezultate glede obnašanja točke T4, kot sem jih opisala pred slikami deformiranih oblik. Popolna konstrukcija, nepopolnost 1 in 3 imajo enako oblike in različni nivo mejnega faktorja obtežbe, medtem ko je pri nepopolnosti 2 graf drugačen, saj nimamo v tej točki maksimalnih povosov.



Graf 89: P-w diagram točke T4 pri različnih podporah popolnega pokrova in z nakopičeno obtežbo II

Pri pokrovu, podprtemu z različnimi podporami, se lepo vidi, da so največji pomiki prisotni pri podporah z vzmetmi, najmanjši (pri mejni obtežbi) pa pri vrtljivo podprtem pokrovu. Zanimivo je, da je diagram vrtljivo podprtega loka v začetnem delu enak tistemu s togimi podporami, nato pa se približuje tistemu, ki je podprt z vzmetmi. Razlog je v tem, da je začetna togost pokrova z vrtljivimi podporami in togimi podporami podobna, medtem ko je pri podpori z vzmeti togost celotnega pokrova nižja zaradi togosti samih vzmeti.

Preglednica 42: Mejne vrednosti pri nakopičenju snega III

	Popolna konstrukcija	Nepopolnost 1	Nepopolnost 2	Nepopolnost 3
Vrsta podpiranja	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>	LPF <sub>mejni</sub>
Vrtljive p.	1,849	1,537	1,596	1,777
P. z vzmetmi	1,711	1,45	1,52	1,65
Toge p.	2,312	2,039	2,099	2,091

Nakopičenje snega III je enako kot nakopičenje snega II, le da je velikost obtežbe taka, kot je bila izračunana pri celotni strehi. Mejni faktor povečanja obtežbe v tem primeru pade pod vrednost 2, še vedno pa je precej višji kot pri celotni strehi. Ker je deformiranje konstrukcije in potek P-w diagramov enak kot pri nakopičenem snegu II, jih pri tej obtežni kombinaciji ne bom prikazala.

Pri obtežbi pokrova se je pokazalo, da je obnašanje pokrova kot samostojne konstrukcije bolj ugodno, kot obnašanje celotne strehe. Kljub nizki višini so mejni obtežni faktorji v vseh primerih precej višji kot pri sami strehi. Razlog je v velikosti same obtežbe, ki je precej manjša (vsota vse obtežbe je manjša), ter v manjšem razponu konstrukcije.



## 5 ZAKLJUČEK

Stabilnostna analiza konstrukcije je pomemben del celotne analize konstrukcije. V večini primerov je kritična lokalna nestabilnost, npr. ukloni posameznih palic, pri določenih konstrukcijah pa je lahko težava v globalni nestabilnosti. Take konstrukcije so na primer plitvi loki, kupole in lupine, ki so zelo občutljivi na večanje upogibkov..

V uvodnem delu, pri analizi različnih lokov z enakim razponom, sem prišla do zaključkov, da je oblikovni faktor loka tesno povezan s samo mejno nosilnostjo loka. V vseh primerih, pri loku z in brez nepopolnosti, ima najvišjo mejno nosilnost lok z najvišjo puščico  $f$ , najnižjo mejno nosilnost pa tisti z najnižjo puščico. Višje nosilnosti dobimo tudi pri izbiri togih podpor namesto vrtljivih.

Oblika nepopolnosti zelo vpliva na mejno nosilnost loka. Pri simetrični nepopolnosti je bil padec mejne nosilnosti v vseh primerih manjši kot pri vnosu nesimetrične nepopolnosti. Pri nesimetrični nepopolnosti je bil padec mejne nosilnosti tudi za 50 % in več, kar nam pokaže, da ne smemo nikoli zanemariti vpliva nepopolnosti pri analizi konstrukcij.

Simetrična nepopolnost v vseh primerih najbolj prizadene lok, ki je togo podprt, nesimetrična nepopolnost pa bolj neugodno vpliva na vrtljivo podprte sisteme. Pri visokem oblikovnem faktorju  $f/L$  lahko zaključimo, da simetrična nepopolnost na samo velikost mejne nosilnosti nima pomembnega vpliva.

S temi zaključki sem se nato podala k računanju stabilnostne analize jeklene strehe športne dvorane v Stožicah. Že prvi rezultati, ki so vidni, nam pokažejo, da je mejni nivo obtežbe precej nizek, ko pa upoštevamo še nepopolnosti, pridemo do mejnega faktorja 0,88 pri nakopičeni obtežbi s snegom. To seveda ne pomeni, da se bo sedaj streha porušila ob prvem snegu, ki bo nanjo padel, zahteva pa dodatne kontrole dejanskih nepopolnosti in pa skrbno ravnanje pri veliki snežni obtežbi – paziti je potrebno, da do takega kopičenja, kot je obravnavano tukaj, ne bo prišlo.

Projekt jeklene strehe športne dvorane v Stožicah je narejen v skladu z ustaljeno prakso za običajne objekte. Izračun je bil narejen po teorij drugega reda ob upoštevanju začetnih geometrijskih nepopolnosti. Težava je v tem, da jeklena streha ni običajen projekt ampak je palična kupola z velikim razponom in relativno majhno puščico ter nekoliko lomljeno obliko, ki odstopa od parabolične oblike. V takih primerih imamo dve možnosti, kako se problema lotiti. Lahko naredimo podrobno globalno analizo stabilnosti, kot je narejeno v diplomih, ali pa ne dimenzioniramo konstrukcije na polno izkoriščenost temveč tako, da ostane nekaj rezerve. Tudi velikost elastičnega kritičnega faktorja obtežbe bi lahko bila višja od 2 (v projektu 1,94). Tako bomo dosegli, da je togost konstrukcije višja s tem pa dobimo nekaj rezerve pri globalnem obnašanju konstrukcije

Pri obtežbi z nakopičenim snegom sem opazovala, kakšen je vpliv višine nakopičenja na nasprotni strani strehe na velikost mejne nosilnosti. Vpliv je viden pri popolni konstrukciji, kjer

se je nosilnost bolj obremenjene strehe povečala zaradi učinka protiuteži nasprotnega dela strehe, pri nepopolni konstrukciji pa nam višina nakopičenja na nasprotni strani ne pomaga prav dosti. Mejne vrednosti nosilnosti so še vedno okoli 0,88 – med 0,87 in 0,89.

Opazovala sem še vpliv amplitude nepopolnosti na nosilnost, oziroma, kako se manjša mejna nosilnost pri povečevanju nepopolnosti. Pri obeh obtežbah, ki sem jih obravnavala (enakomerna obtežba s snegom in nakopičenje snega v smeri krajšega razpona), se je mejna nosilnost nižala skoraj linearno. Pri nakopičenju snega je bil mejni faktor obtežbe večji od 1 pri nivoju 25 % nepopolnosti od predpisanih, pri ostalih primerih pa je vrednost nižja. Seveda je tu treba poudariti, da ni nujno, da ima streha take nepopolnosti, kot sem jih predpisala pri računanju. Lahko so takšne, ki manj vplivajo na velikost mejne nosilnost, njihova velikost pa tudi ni nujno taka, kot sem jo določila.

Osne sile, določene v Abaqusu in Scii Engineer, so pri nižjih faktorjih obtežbe enake oziroma zelo podobne, pri višjih faktorjih pa se pojavijo razlike. Osna sila določena v Abaqusu je v višja od osne sile izračunane v Scii. Posledica tega je nižji faktor mejne obtežbe določen po metodi dolžine loka v Abaqusu.

Pokrov konstrukcije oziroma temenski del, se kot samostojna konstrukcija bolje obnaša kot celotna streha. Kljub temu, da je njegova višina majhna, in sem pričakovala večje težave glede nosilnosti, pa le-teh ni bilo. Razlog je v tem, da je celotna obtežba na sam pokrov nižja, poleg tega pa je tudi razpon precej manjši, kar vpliva na povečanje kritičnega faktorja nosilnosti.

Iz vsega napisanega je dobro upoštevati dejstvo, da je pri plitkih lokih in kupolah realno obnašanje konstrukcije v nelinearnem območju bolj neugodno, kot ga določimo po teoriji drugega reda.

## VIRI

Chen, J., Lin, J. 2004. Dynamic Snap-Through of a Shallow Arch Under a Moving Point Load. *Journal of Vibration and Acoustics* 126: 514.

[doi:10.1115/1.1804991](https://doi.org/10.1115/1.1804991)

Glenn A. Hrinda. Snap-Through Instability Patterns in Truss Structures. NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia 23831: 1-2.

Lee, K. S., Han, S. E. Semi-Rigid Elasto-Plastic Post Buckling Analysis of a Space Frame with Finite Rotation. *Journal of Constructional Steel Research Manuscript Draft*: 18-25 str.

Wriggers, P. 2008. *Nonlinear Finite Element Methods*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag: 14, 160 str.

Zajc, I. 2010. Začasno podpiranje. *Gradbenik* 3: 24-25.

Završki, M. 2011. Projekt gradbene konstrukcije Športne dvorane Stožice. *Gradbeni vestnik* 60: 40-46.

SIST EN 1991-1-3: 2004 – Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-3. del: Splošni vplivi – Obtežba snega.

EN 1993-2: 2006 – Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 2. del: Jekleni mostovi.

Center Stožice. 2012.

<http://www.sport-ljubljana.si/center-stozice/> (Pridobljeno 30. 6. 2012.)

Nogometni stadion in večnamenska športna dvorana Stožice. 2010.

<http://www.sadarvuga.com/projects/selected/923-football-stadium-and-multipurpose-sports-hall-stoice> (Pridobljeno 30. 6. 2012.)

Program Abaqus. 2012.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Abaqus> (Pridobljeno 31. 8. 2012.)

Program Abaqus, spletna dokumentacija programa. 2012.

<https://www.sharcnet.ca/Software/Abaqus610/Documentation/docs/v6.10/index.html>

Načrt gradbenih konstrukcij, št. projekta 4160, 2009, GRADIS BP Maribor, PZI.