

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:

Smrke, K., 2013. Analiza novega načina vgradnje oken v fasadni sistem Qbiss One z metodo končnih elementov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brank, B., somentor Zupanc, B.): 110 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:

Smrke, K., 2013. Analiza novega načina vgradnje oken v fasadni sistem Qbiss One z metodo končnih elementov. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brank, B., co-supervisor Zupanc, B.): 110 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:

KATARINA SMRKE

**ANALIZA NOVEGA NAČINA VGRADNJE OKEN V
FASADNI SISTEM QBISS ONE Z METODO KONČNIH
ELEMENTOV**

Diplomska naloga št.: 3353/KS

**ANALYSIS OF A NEW DESIGN OF WINDOW
INSTALLATION IN THE FACADE SYSTEM QBISS ONE
BY USING THE FINITE ELEMENT METHOD**

Graduation thesis No.: 3353/KS

Mentor:

prof. dr. Boštjan Brank

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

Boštjan Zupanc, univ. dipl. inž. stroj.

Član komisije:

doc. dr. Sebastjan Bratina

Ljubljana, 18. 12. 2013

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana Katarina Smrke izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom
»Analiza novega načina vgradnje oken v fasadni sistem Qbiss One z metodo končnih elementov«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 11. 12. 2013

Katarina Smrke

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	519.61/.64:692.2(497.4)(043.2)
Avtor:	Katarina Smrke
Mentor:	prof. dr. Boštjan Brank
Somentor:	univ. dipl. inž. str. Boštjan Zupanc
Naslov:	Analiza novega načina vgradnje oken v fasadni sistem Qbiss One z metodo končnih elementov
Tip dokumenta:	Diplomska naloga - univerzitetni študij
Obseg in oprema:	110 str., 15 pregl., 136 sl.
Ključne besede:	Trimo, Qbiss One, okno, aluminijasti okenski okvir, metoda končnih elementov, linearna analiza, nelinearna analiza, uklonska analiza, modalna analiza, 3D končni element, lupinasti končni element, kohezijski končni element, program Catia, program ANSYS, vpliv vetra, vpliv temperature

Izvleček

V diplomskem delu so prikazani rezultati numeričnih analiz, ki so del študije o primernosti novega načina vgradnje oken v fasadni sistem Qbiss One, katerega proizvaja podjetje Trimo d.d. Predstavljene so razlike med dosedanjim in predlaganim, novim načinom vgradnje oken v fasadni sistem, kjer sta glavni novosti odstranitev vzdolžnih ojačitvenih cevi in spremenjena zasnova nosilca okenskega ter fasadnega elementa. Pri numeričnih analizah smo obravnavali del fasadnega sistema, ki smo ga poimenovali sistem panel-okno-panel. Za njegov izris smo uporabili program CATIA, za analizo po metodi končnih elementov pa program ANSYS, kjer smo upoštevali simetrijo obravnavanega sistema. Modelirani so bili vsi detajli Qbiss One panelov in okna, za kar smo uporabili 3d končne elemente za trdno telo in lupinaste končne elemente. Oba tipa končnih elementov smo med seboj povezali s kontaktnimi končnimi elementi. Naredili smo linearne elastične analize za vplive vetra in temperaturnih sprememb, stacionarno toplotno analizo, modalno analizo ter uklonske analize in geometrijsko in materialno nelinearno analizo, oboje za vpliv vetra. Na osnovi izračunanih rezultatov smo dobili informacije o sprejemljivosti predlaganega novega načina vgradnje oken v fasadni sistem Qbiss One. Izkaže se, da bi lahko novi način postal, z nekaj dopolnitvami, popolnoma sprejemljivo nadomestilo obstoječemu načinu vgradnje oken.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 519.61/.64:692.2(497.4)(043.2)
Author: Katarina Smrke
Supervisor: prof. Boštjan Brank, Ph.D.
Co-supervisor: Boštjan Zupanc, B.Sc.
Title: Analysis of a new design of window installation in the façade system Qbiss One by using the finite element method
Document type: Graduation Thesis - Higher professional studies
Scope and tools: 110 p., 15 tab., 136 fig.
Keywords: Trimo, Qbiss One, window, aluminium window frame, finite element method, linear analysis, nonlinear analysis, buckling analysis, modal analysis, 3D finite element, shell finite element, cohesive finite element, program Catia, program ANSYS, wind actions, temperature actions

Abstract:

The thesis presents the results of numerical analyses that are part of a study on suitability of a new method of window installation in the façade system Qbiss One, produced by the company Trimo d.d. The main novelties of the new system are the removal of the longitudinal reinforcement pipes and a modified design of the window and façade element holder. In numerical analyses we discussed the part of the façade system which we named the panel-window-panel system. For its plot the CATIA programme was used and for the analysis according to the method of finite elements, we used the programme ANSYS where we took into account the symmetry of the system under consideration. All the details of Qbiss One panels and the windows have been modelled and for that we used 3d finite elements for solid body and shell finite elements. Both types of finite elements were linked together with contact finite elements. We made linear elastic analyses of the effects of the wind and temperature changes, the stationary thermal analysis, modal analysis and buckling analysis, as well as geometrical and material nonlinear analysis, both for the effect of wind. Based on the calculated results we obtained information on the acceptability of the proposed new method of window installation in the façade system Qbiss One. It turns out that with some additions, the new method could become a perfectly acceptable replacement of the existing window installation method.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
1 UVOD	1
2 TRIMOV QBISS ONE FASADNI SISTEM.....	3
2.1 Qbiss One fasadni element.....	5
2.2 Vgrajevanje oken v Qbiss One fasadni sistem	6
2.3 Nov način vgrajevanja oken v Qbiss One fasadni sistem.....	10
3 FIZIKALNI MODEL ZA ŠTUDIJO PRIMERNOSTI NOVEGA NAČINA VGRADNJE OKEN V QBISS ONE FASADNI SISTEM.....	11
3.1 Sistem panel-okno-panel	11
3.2 Uporabljeni računalniški programi.....	14
3.3 Modeliranje detajlov	15
3.4 Modeliranje podpor.....	18
3.5 Izbrani tip fasadnega sistema Qbiss One in tip okna za analize.....	20
3.6 Modeliranje materialov	21
3.7 Modeliranje obtežbe.....	24
3.8 Tabela analiziranih variant.....	26
3.9 Analiza ustreznosti novega načina vgradnje	26
4 NUMERIČNI MODEL ZA ŠTUDIJO PRIMERNOSTI NOVEGA NAČINA VGRAJEVANJA OKEN V QBISS ONE FASADNI SISTEM.....	27
4.1 Osnovno o uporabljenem programu ANSYS.....	27
4.2 Nekaj podatkov o metodi končnih elementov.....	28
4.3 Različni končni elementi v ANSYSu.....	32
4.4 Izbrani končni elementi za sistem panel-okno-panel	33
4.4.1 SHELL181	33
4.4.2 SOLID185	34
4.4.3 SOLID186 in SOLID187	35
4.4.4 Metode mreženja.....	36
4.5 Mreža končnih elementov za sistem panel-okno-panel.....	39
4.6 Ocena primernosti in kvalitete ustvarjene mreže	43
4.6.1 Kvaliteta končnih elementov.....	43
4.6.2 Razmerje stranic.....	48

4.6.3	Razmerje Jacobijana	50
4.6.4	Oblikovni faktor	52
4.6.5	Odklon paralelnosti.....	54
4.6.6	Maksimalni kot v vogalu	56
4.6.7	Poševnost.....	56
4.6.8	Kvaliteta pravokotnosti.....	59
4.7	Stikovanje mrež iz različnih končnih elementov med seboj.....	63
4.7.1	CONTA174	65
4.7.2	TARGE170.....	67
4.7.3	Nekaj kontaktnih parov v sistemu panel-okno-panel	68
4.8	Izvedene analize	71
5	LINEARNO ELASTIČNA ANALIZA.....	72
5.1	Obremenitev zaradi vetra – tlak.....	72
5.1.1	Pomiki.....	73
5.1.2	Von Misesove napetosti.....	75
5.1.3	Glavne normalne napetosti	77
5.2	Obremenitev zaradi vetra – srk.....	78
5.2.1	Pomiki.....	78
5.2.2	Von Misesove napetosti.....	81
5.2.3	Glavne normalne napetosti	82
5.3	Obremenitev zaradi temperature	83
5.3.1	Pomiki.....	86
5.3.2	Von Misesove napetosti.....	88
5.3.3	Glavne normalne napetosti	89
6	LINEARNA UKLONSKA ANALIZA	91
6.1	Obremenitev zaradi vetra – tlak.....	91
6.1.1	Uklonski faktorji in uklonske oblike	91
6.2	Obremenitev zaradi vetra – srk.....	95
6.2.1	Uklonski faktorji in uklonske oblike	95
7	MODALNA ANALIZA	98
8	MATERIALNA IN GEOMETRIJSKA NELINEARNA ANALIZA	103
8.1	Obremenitev zaradi vetra – tlak.....	103
8.1.1	Pomiki.....	103
8.1.2	Von Misesove napetosti in glavne normalne napetosti	105
9	ZAKLJUČEK.....	107

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Mehanske lastnosti konstrukcijskega jekla	22
Preglednica 2: Mehanske lastnosti aluminija	22
Preglednica 3: Mehanske lastnosti poliamida	22
Preglednica 4: Mehanske lastnosti EPDM	22
Preglednica 5: Mehanske lastnosti stekla.....	23
Preglednica 6: Mehanske lastnosti mineralne volne	23
Preglednica 7: Razvrstitev modeliranih vplivov	24
Preglednica 8: Obravnavana sistema panel-okno-panel (varianta A in varianta B).....	26
Preglednica 9: Možni vzroki napak pri analizi po metodi končnih elementov	29
Preglednica 10: Število ustvarjenih KE glede na pripadajočo kvaliteto elementov.....	44
Preglednica 11: Ocena kvalitete elementa glede na kriterij poševnosti	57
Preglednica 12: Ocena kvalitete elementa glede na njegovo pravokotnost	59
Preglednica 13: Uklonski faktorji zaradi obremenitve vetra - tlak.....	92
Preglednica 14: Uklonski faktorji zaradi obremenitve vetra - srk.....	95
Preglednica 15: Lastne nihajne oblike in lastne frekvence	98

KAZALO SLIK

Slika 1: The Doll House s Qbiss One fasadnim sistemom	3
Slika 2: Unikaten zaobljen vogal elementa, izveden brez rezov, upogibanja ali varjenja.....	4
Slika 3: Qbiss One B - spoj s poudarjeno senčno fugo.....	4
Slika 4: Qbiss One F - spoj brez poudarjene senčne fuge	4
Slika 5: Horizontalna vgradnja fasadnih elementov	4
Slika 6: Stik dveh fasadnih elementov horizontalne vgradnje.....	5
Slika 7: Sestavni deli modularnega fasadnega elementa Qbiss One in izbrane dimenzije.....	6
Slika 8: Okno z možnostjo odpiranja (<i>zgoraj</i>) in fiksna zasteklitev (<i>spodaj</i>)	7
Slika 9: Prikaz aluminijastega okna na objektu.....	7
Slika 10: Detajl A - <i>Zgornji prečni prerez</i> stika panel-okno (izrisano v programu AutoCAD).....	8
Slika 11: Detajl B - <i>Spodnji prečni prerez</i> stika okno-panel (izrisano v programu AutoCAD).....	9
Slika 12: Prikaz zgornjega stika vgrajenega okna v fasadni sistem Qbiss One.....	9
Slika 13: Dimenzije pravokotne votle cevi.....	9
Slika 14: Detajl A - <i>Ideja novega načina vgradnje</i> oken v Qbiss One fasadni sistem	10
Slika 15: Detajl B - <i>Ideja novega načina vgradnje</i> oken v Qbiss One fasadni sistem	10
Slika 16: Sistem panel-okno-panel modeliran v CATIA (enote so mm).....	11
Slika 17: Geometrija polovice izbranega fizikalnega modela: a) stari način vgradnje oken v fasadni sistem in b) nova ideja vgradnje oken v fasadni sistem.....	12
Slika 18: Pogled od spredaj, prečni in vzdolžni prerez izbranega modela (enote so mm)	13
Slika 19: Delovno okno programskega orodja CATIA V5	14
Slika 20: Poenostavljeni zgornji detajl C in spodnji detajl D na stiku panel-okno	15
Slika 21: Vijačenje okenskega okvirja na nosilec okenske odprtine	16
Slika 22: Stik okenskega okvirja in vertikalnega nosilnega elementa.....	16
Slika 23: Označena območja podprtja	18
Slika 24: Shema podprtega fasadnega sistema	18
Slika 25: Prikaz podpor v programu ANSYS.....	19
Slika 26: Modeliran Qbiss One fasadni sistem.....	20
Slika 27: Modelirano aluminijasto okno z dvojno zasteklitvijo	20
Slika 28: Prikaz obremenitve nanešene v 1 koraku: standardna gravitacijska sila.....	25
Slika 29: Prikaz obremenitve nanešene v 2. koraku: obremenitev zaradi vetra - srk	25
Slika 30: Shematski prikaz sestavnih elementov računske analize	27
Slika 31: Priprava geometrijskega modela za numerično analizo po MKE	29
Slika 32: Shema poteka numerične analize	30
Slika 33: Shema Newton-Raphsonove iteracije	31
Slika 34: Končni element »SHELL181«	33
Slika 35: Končni element »SOLID185«.....	34
Slika 36: Končni element »SOLID186« (Ansys)	35
Slika 37: Končni element »SOLID187« (Ansys)	36
Slika 38: Možne oblike končnih elementov: a) 3D oblike in b) 2D oblike	37
Slika 39: Privzeta metoda določitve mreže končnih elementov: Automatic Method.....	38
Slika 40: Dodatno izvedena metoda določitve mreže končnih elementov: Hex Dominant Method.....	38
Slika 41: Prikaz celotne mreže končnih elementov sistema panel-okno-panel	39
Slika 42: Geometrija in mreža KE v območju A - zgornji rob fasadnega panela.....	39
Slika 43: Geometrija in mreža KE v območju B - zgornji stik fasadnega panela in okenskega okvirja.....	40
Slika 44: Geometrija in mreža KE v območju C - spodnji stik fasadnega panela in okenskega okvirja.....	40

Slika 45: Geometrija in mreža KE v območju D – spodnji rob fasadnega panela	41
Slika 46: Geometrija in mreža KE v območju E - stik panela z vertikalnim nosilnim elementom.....	41
Slika 47: Geometrija in mreža KE v območju F - stikovanje okenskega okvirja na nosilni element ...	42
Slika 48: Geometrija in mreža KE v območju G - okenski okvir, tesnilo in steklo	42
Slika 49: Ocena kvalitete elementov celotnega modela.....	43
Slika 50: Prikaz vrednosti za oceno kvalitete mreže v »Details of mesh« za celotno mrežo sistema...	44
Slika 51: Ustvarjeni končni elementi oblike HEX8 (št. elementov: 23671)	45
Slika 52: Ustvarjeni končni elementi oblike QUAD4 (št. elementov: 22600).....	45
Slika 53: Ustvarjeni končni elementi oblike WED6 (št. elementov: 102) in PYR5 (št. elementov: 94)46	
Slika 54: Ustvarjeni končni elementi oblike TRI3 (št. elementov: 32) in TET4 (št. elementov: 0)	46
Slika 55: Ustvarjeni končni elementi oblike TET4 s kvaliteto elementov 0,851 (št. elementov: 21)...	47
Slika 56: Ocena kvalitete elementov glede na delež prostornine mreže celotnega modela	47
Slika 57: Prikaz ploskev in prečnih prerezov za a) kocka, b) piramida, c) klinasta oblika, d) tetraeder48	
Slika 58: Postopek določitve razmerja stranic za trikotni končni element.....	48
Slika 59: Razmerje stranic za enakostranični in raztegnjen trikotnik	49
Slika 60: Postopek določitve razmerja stranic za štiristrani končni element	49
Slika 61: Razmerje stranic za kvadrat in raztegnjen pravokotnik	49
Slika 62: Ocena kvalitete glede na razmerje stranic.....	50
Slika 63: Razmerje Jacobijana za pravokotnik.....	50
Slika 64: Razmerje Jacobijana za četverokotnik.....	51
Slika 65: Ocena kvalitete glede na razmerje Jacobiana.....	51
Slika 66: Elementi HEX8 z največjim razmerjem Jacobijana.....	51
Slika 67: Izračun srednje vrednosti normale elementa (a) in projekcija elementa na ravnino (b)	52
Slika 68: Oblikovni faktor za štirikotne "shell" elemente	52
Slika 69: Oblikovni faktor za 3-D telesa.....	53
Slika 70: Ocena kvalitete glede na oblikovni faktor	53
Slika 71: Enotski vektorji vzdolž stranic.....	54
Slika 72: Odkloni paralelnosti za različne elemente v stopinjah.....	54
Slika 73: Odklon paralelnosti za sistem	54
Slika 74: Odklon paralelnosti 80,3° za en element QUAD 4 in prikaz geometrije samega elementa ..	55
Slika 75: Prikaz skupine elementov z odklonom paralelnosti 89,75° in geometrija elementa HEX8 ..	55
Slika 76: Maksimalni kot pri trikotnih a) in štirikotnih elementih b).....	56
Slika 77: Maksimalni kot v vogalu	56
Slika 78: Idealna in poševnokotna trikotna ter pravokotna oblika končnega elementa	57
Slika 79: Kriterij poševnosti določen po metodi enakostraničnega odklona prostornine	58
Slika 80: Poševnost elementov v sistemu	59
Slika 81: Uporabljeni vektorji za izračun kvalitete pravokotnosti celice.....	60
Slika 82: Uporabljeni vektorji za izračun kvalitete pravokotnosti ploskve.....	60
Slika 83: Kvaliteta pravokotnosti.....	61
Slika 84: Formiranje stika po metodi »Augmented Lagrange«.....	63
Slika 85: Prikazana izvedba kontaktov v drevesni strukturi	65
Slika 86: Geometrija elementa »CONTA174«	66
Slika 87: Zaznane kontaktne točke na Gaussovih točkah	66
Slika 88: Površina-Projekcija-Osnova kontakta.....	66
Slika 89: Geometrija in različni tipi elementa »TARGE170«.....	67
Slika 90: Prikaz ročne nastavitve kontakta med pločevino fasadnega elementa in mineralne volne....	68
Slika 91: Prikaz ročne nastavitve kontakta v zgornjem delu okenskega okvirja.....	69
Slika 92: Prikaz detajla, kjer je vidno pravilno stikovanje tesnila v spodnjem delu okenskega okvirja	69

Slika 93: Prikaz napake po samodejni izvedbi kontakta	70
Slika 94: Prikaz ročne nastavitve kontakta tesnila v spodnjem delu okenskega okvirja	70
Slika 95: Prikaz obremenitve zaradi vetra - tlak.....	72
Slika 96: Pomiki na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - tlak	73
Slika 97: Pomiki na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - tlak	73
Slika 98: Prikaz deformirane oblike zaradi vetra - tlak (v naravnem in povečanem merilu)	74
Slika 99: Von Misesove napetosti na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - tlak	75
Slika 100: Von Misesove napetosti na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - tlak	76
Slika 101: Prikaz obremenitve zaradi vetra - srk.....	78
Slika 102: Pomiki na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - srk	78
Slika 103: Pomiki na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra -srk	79
Slika 104: Prikaz deformirane oblike zaradi vetra - srk (v naravnem in povečanem merilu)	80
Slika 105: Von Misesove napetosti na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra -srk	81
Slika 106: Von Misesove napetosti na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - srk	82
Slika 107: Vhodni podatki pri stacionarni toplotni analizi	84
Slika 108: Stacionarna toplotna analiza - razporeditev temperature po sistemu panel-okno-panel	85
Slika 109: Obremenitev zaradi temperature pridobljena s stacionarno toplotno analizo	85
Slika 110: Pomiki na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi temperature	86
Slika 111: Pomiki na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi temperature.....	86
Slika 112: Prikaz deformirane oblike zaradi temperaturne obremenitve	87
Slika 113: Von Misesove napetosti na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi temperature ...	88
Slika 114: Von Misesove napetosti na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi temperature...	89
Slika 115: Obremenitev zaradi vetra - tlak.....	91
Slika 116: Prikaz 1. uklonske oblike zaradi obremenitve vetra - tlak	93
Slika 117: Prikaz 2. uklonske oblike zaradi obremenitve vetra - tlak	93
Slika 118: Prikaz 3. uklonske oblike zaradi obremenitve vetra - tlak	94
Slika 119: Obremenitev zaradi vetra - srk	95
Slika 120: Prikaz 1. uklonske oblike zaradi obremenitve vetra - srk	96
Slika 121: Prikaz 2. uklonske oblike zaradi obremenitve vetra - srk	97
Slika 122: Prikaz 3. uklonske oblike zaradi obremenitve vetra - srk	97
Slika 123: Prva lastna nihajna oblika	99
Slika 124: Prva lastna nihajna oblika (povečano merilo)	99
Slika 125: Druga lastna nihajna oblika	100
Slika 126: Druga lastna nihajna oblika (povečano merilo)	100
Slika 127: Tretja lastna nihajna oblika	101
Slika 128: Tretja lastna nihajna oblika (povečano merilo).....	101
Slika 129: Četrta lastna nihajna oblika	102
Slika 130: Četrta lastna nihajna oblika (povečano merilo).....	102
Slika 131: Kontrola konvergence in število iteracij	103
Slika 132: Pomiki zaradi obremenitve vetra - tlak pri pritisku 6000 Pa.....	104
Slika 133: Prikaz deformirane oblike zaradi vetra - tlak pri pritisku 6000 Pa (v naravnem in povečanem merilu)	104
Slika 134: Von Misesove napetosti na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - tlak pri pritisku 6000 Pa.....	105
Slika 135: Von Misesove napetosti na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - tlak pri pritisku 6000 Pa.....	106
Slika 136: Prikazano gubanje v pločevini zgoraj in spodaj ležečega panela pri pritisku 8800 Pa	106

1 UVOD

Podjetje Trimo d.d. iz Trebnjega je razvilo modularni fasadni sistem Qbiss One, ki sledi moderni arhitekturi ter učinkovito združuje estetiko in funkcionalnost, hkrati pa ima dobre tehnične karakteristike. Gre za stroškovno učinkovit, samonosilni, protipožarni in toplotno izolativni fasadni sistem, ki predstavlja alternativo standardnim fasadam in je lahko prava izbira za sodobne arhitekturne rešitve. Qbiss One sistem daje zunanjo podobo objektom, kot so športne dvorane, avtomobilski saloni, banke, hoteli, bolnišnice, nakupovalna središča, vrtci itd. Sistem ima optično gladko površino in edinstveno zaobljene robove, katerih izvedbo omogoča najsodobnejša robotizirana tehnologija, na katero so v Trimu zelo ponosni. Prefabriciran modularni fasadni sistem Qbiss One je trenutno edini na svetu, ki med jeklenimi sendvič paneli nudi zaobljen vogal fasadnega elementa, kar skupaj s senčno fugo ustvarja videz sodobnega minimalizma in elegance.

V diplomskem delu je izvedena študija novega načina vgradnje oken v omenjeni fasadni sistem Qbiss One. V ta namen smo uporabili metodo končnih elementov in računalniški program ANSYS. Trenutno se okna vgrajuje s pomočjo dodatnega vzdolžnega nosilca s pravokotnim votlim profilom, na katerega se okno pritrdi, obenem pa služi tudi kot ojačitev stika panel-okno. Nosilec se namešča tako na zgornjem, kot na spodnjem stiku okenskega okvirja ter fasadnega Qbiss One elementa, in sicer na notranji strani fasadnega ovoja. V podjetju Trimo d.d. se sprašujejo, ali ojačitev v obliki dveh dodatnih nosilcev pri vsakem oknu, ki predstavlja investitorjem neugodno rešitev tako s stroškovnega kot tudi z estetskega vidika, bistveno pripomore k dobremu obnašanju fasadnega sistema pri ekstremnih obtežbah. Zanima jih tudi, ali omenjena ojačitev predstavlja pomemben člen pri prenosu obremenitve z okna na fasado pri vplivu vetra in spremembi temperature. Gre za do zdaj neraziskan problem obnašanja sistema panel-okno-panel.

Želje in zahteve naročnikov, kot tudi arhitektov, po odstranitvi jeklenega ojačitvenega elementa (t.j. dodatnega nosilca), so torej podjetje Trimo napotile k iskanju nove ustrezne rešitve vgradnje oken v Qbiss One fasadni sistem. Slednja naj bi zagotavljala ustrezen raznos obremenitev po fasadnem sistemu zaradi različnih, včasih tudi ekstremnih, obtežb, ki jih povzročajo današnje klimatske razmere. Kot študentka Trima d.d., sem se v svoji diplomski nalogi spoprijela z reševanjem tega problema. Skupaj s somentorjem sem razvila idejo takšnega načina vgradnje oken v sistem Qbiss One, ki ne potrebuje dodatne ojačitve. To idejo sem v diplomski nalogi na različne načine analizirala z računalniškimi simulacijami, ki temeljijo na metodi končnih elementov. Obravnava omenjenega problema mi je dala nova spoznanja glede raziskovanja v gradbeništvu in uporabe programskih orodij, kot sta CATIA in ANSYS.

Sodobni montažni konstrukcijski sistemi omogočajo hitrejšo in enostavnejšo gradnjo zaradi razvoja novih in izboljšave obstoječih tehnologij ter razvoja novih in trdnjših materialov. K razvoju montažnih konstrukcij prav tako prispevajo nove metode računalniških analiz, kot tudi določene zahteve glede zmanjševanja stroškov gradnje. Upoštevati in paziti je potrebno, da so vsi konstrukcijski detajli izvedeni tako, da je konstrukcija kot celota odporna na predvidene vplive in da pri ekstremni obtežbi nastanejo le sprejemljive lokalne poškodbe, ki se lahko sanirajo. Glavni namen pri obravnavanem fasadnem sistemu Qbiss One je seveda zagotavljanje njegove kakovosti in znotraj nje tudi zanesljivost med obratovanjem, ki predstavlja najpomembnejši vidik doseganja kvalitete. Poleg teh zahtev mora biti konstrukcijski sklop skladen s vsemi relevantnimi predpisi in standardi, kar je seveda potrebno upoštevati. Ob vsem tem je trba zadostiti tudi pričakovanjem naročnika. Kot narekujejo Evrokod standardi, mora biti konstrukcija, skupaj z vsemi njenimi elementi, sprojektirana

tako, da bo med življensko dobo, s primerno stopnjo zanesljivosti in na ekonomičen način, vzdržala vplive, ki bodo delovali nanjo in med njeno uporabo ne bodo presežena mejna stanja nosilnosti. Hkrati mora konstrukcijski sistem ostati pri vseh pričakovanih vplivih v takem stanju, da ne bo prekoračeno mejno stanje uporabnosti, da bo imel zadostno trajnost, da bo pri morebitnem požaru za določen čas obdržal predpisano nosilnost itd. Ustreznost novega načina vgradnje oken v fasadni sistem je bila ocenjena na podlagi izračunanih projektnih obtežb mejnega stanja nosilnosti in mejnega stanja uporabnosti.

Diplomska naloga je strukturirana na naslednji način. Po uvodu, v drugem poglavju predstavim trenutni način vgradnje aluminijastih oken z ojačitvijo, ki ga podjetje Trimco d.d. izvaja na Qbiss One fasadnih sistemih. Zatem je prikazan nov, v tej nalogi prvič predlagani način vgradnje oken v fasadni sistem Qbiss One brez ojačitve. Ta je v nadaljevanju naloge detajlno raziskan s pomočjo različnih analiz po metodi končnih elementov. Gre za stikovanje okenskega okvirja in fasadnega panela z nadomestnim jeklenim profilom, sestavljenim iz dveh kotnih elementov. V tem poglavju so prikazane in razložene tudi razlike obeh načinov vgradnje. Geometrijski model novega načina vgradnje, ki je prikazan v tretjem poglavju, je izrisan s programskim orodjem CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application), ki omogoča modeliranje tridimenzionalnih (3D) oblik. Prikazani so osnovni geometrijski podatki obravnavanega novega sistema panel-okno-panel, modelirani so detajli, podpore, materiali in obtežba. Natančna priprava modela je ključnega pomena za uspešno analiziranje konstrukcijskega sistema z metodo končnih elementov. V četrtem poglavju so na kratko predstavljeni izbrani končni elementi in mreža končnih elementov, na podlagi katere je bila izvršena numerična analiza fasadnega sistema Qbiss One. Prikazani so 3D, lupinasti in ostali končni elementi, ki so bili uporabljeni in pa celotna mreža, ki je bila ustvarjena po uspešni diskretizaciji geometrije obravnavanega sistema panel-okno-panel. Na koncu poglavja je razloženo stikovanje različnih končnih elementov med seboj. V končnem delu diplomske naloge so prikazani rezultati analiz, ki so bile izvedene s pomočjo računalniške programske opreme ANSYS, verzija 14.0. Program omogoča različne vrste analiz, kot tudi grafični prikaz rezultatov. Uporaba računalniških programov omogoča, v primerjavi z nekdanjimi metodami, mnogo bolj podrobno in natančno analizo mehanskega odziva konstrukcijskega sistema. S pomočjo programa so bile izvedene linearna elastična in linearna uklonska analiza ter modalna analiza in geometrijsko nelinearna analiza. Rezultati teh analiz so prikazani v petem poglavju.

2 TRIMOV QBISS ONE FASADNI SISTEM

Podjetje Trimo je patentiralo modularni fasadni sistem pod imenom Qbiss One. To je samonosna, izolativna in ognjeodporna fasada, ki je dober inženirski dosežek tako v tehnološkem kot tudi v inovativnem smislu. S poudarjenim spojem in senčno fugo predstavlja preprost ter eleganten fasadni ovoj z dovršeno obliko, združeno s funkcionalnostjo in hitro montažo. Spodaj je prikazana umetniška inštalacija (stavba) iz fasadnega sistema Qbiss One (slika 1).



Slika 1: The Doll House s Qbiss One fasadnim sistemom

Sam fasadni sistem združuje več funkcij, ki so:

- *stroškovna učinkovitost* - gre za samonosilen sistem, ki ne potrebuje dodatne podkonstrukcije (pritrjuje se ga le na krajnih prečnih delih), s čimer se zniža stroške investicije in skrajša čas gradnje,
- *varnost* - požarna odpornost, ki omogoča višjo pasivno varnost zgradbe,
- *zanesljivost* - prefabricirana rešitev, ki je proizvedena z najsodobnejšo robotizirano tehnologijo, zagotavlja dolgoletno brezhibnost objekta,
- *estetika* - unikaten, zaobljen vogal elementa (brez rezov, upogibanja ali varjenja) in možnost poudarjene senčne fuge (Qbiss One B),
- *bivalno udobje* - polnilo iz mineralne volne zagotavlja toplotno stabilnost, zaradi katere se znižajo stroški ogrevanja in hlajenja.

Fasadni sistem Qbiss One B je fasada s poudarjenim spojem, pri čemer vzdolžni in prečni spoj tvorita fugo okoli celotnega fasadnega elementa. Posamezni fasadni element omogoča modularno gradnjo in se ga enostavno sestavlja v zeleni ovoj. Na sliki 3 in sliki 4 je prikazana razlika v spoju s poudarjeno in z nepoudarjeno senčno fugo.



Slika 2: Unikaten zaobljen vogal elementa, izveden brez rezov, upogibanja ali varjenja



Slika 3: Qbiss One B - spoj s poudarjeno senčno fugo



Slika 4: Qbiss One F - spoj brez poudarjene senčne fuge

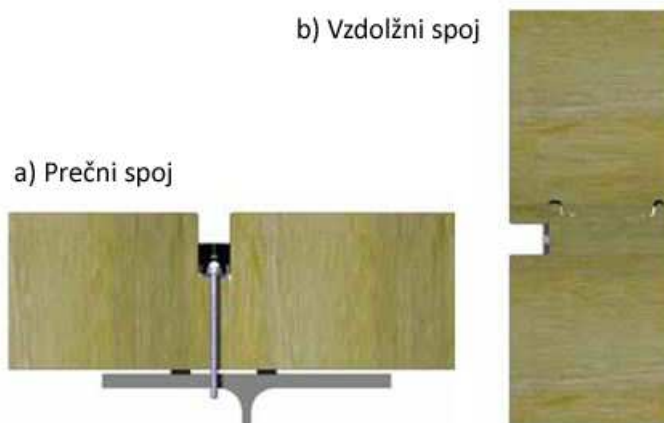
Modularni fasadni sistem sestavljajo naslednji glavni deli:

- fasadni elementi,
- okna, okenski in vratni okvirji ter obrobe,
- vogalni elementi,
- tesnila in material za pritrjevanje.

Dimenzijsko je definiran z rastrsko razdaljo - R (razdalja med podporami), ki določa dolžino fasadnega elementa, in modularno širino elementa - M . V fasadnem sistemu medsebojni fasadni elementi tvorijo vzdolžni in prečni spoj (slika 5) (Tehnični dokument Qbiss One B, 2011).



Slika 5: Horizontalna vgradnja fasadnih elementov



Slika 6: Stik dveh fasadnih elementov horizontalne vgradnje

Prečni spoj sestavljata prečna robova fasadnega elementa, preko katerih sta sosednja elementa pritrjena z vijaki v konstrukcijo. Vz dolžni spoj pa tvorita pero in utor fasadnega elementa.

Qbiss One je sistem, ki se ga vgrajuje na več možnih načinov:

- horizontalna vgradnja *na klasičen način* - fasadni elementi so med seboj povezani v horizontalni smeri (vz dolžno) preko sistema pero-utor; v vertikalni smeri (prečno) so pritrjeni na nosilno konstrukcijo,
- horizontalna vgradnja z *opečnato strukturo* - vgradnja elementov z zamikom,
- horizontalna vgradnja z *asimetrično strukturo* - dolžina fasadnih elementov se poljubno spreminja, medtem ko širina elementov ostaja enaka,
- vertikalna vgradnja *na klasičen način* - fasadni elementi so med seboj povezani v vertikalni smeri (vz dolžno) preko sistema pero-utor; v horizontalni smeri (prečno) pritrjeni v nosilno konstrukcijo, in
- vertikalna vgradnja z *zamikom* - dolžine in širine fasadnih elementov so vedno enake, omogočen pa je zamik fasadnih elementov na horizontalni osi (Qbiss One brochure, 2013).

Za raziskovanje detajla vgradnje okna v fasadni sistem, je bil v tej nalogi izbran prvi, horizontalen, klasičen način vgradnje panelov.

2.1 Qbiss One fasadni element

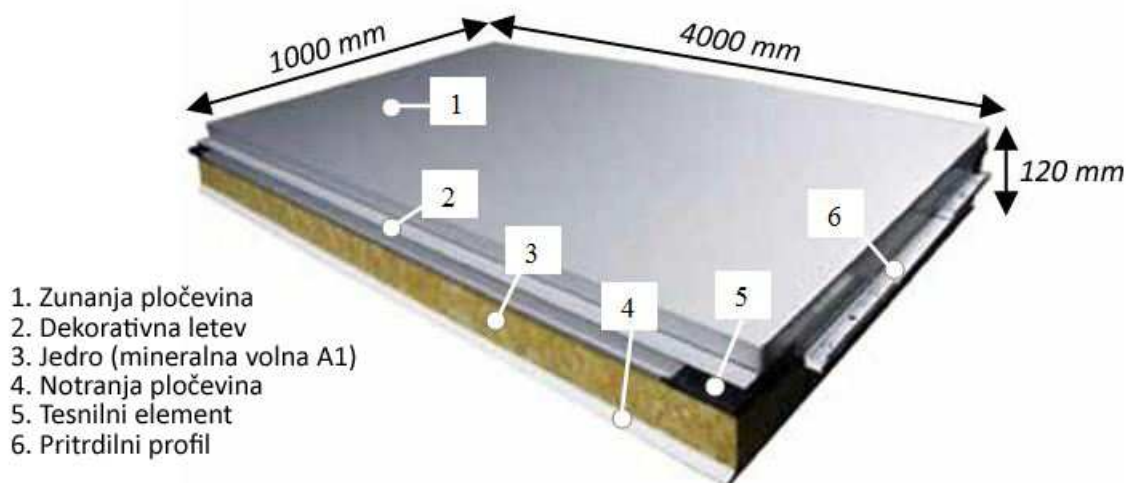
Qbiss One fasadni element je sestavljen iz dveh, obojestransko pocinkanih in obarvanih jeklenih pločevin. Standardna debelina zunanje pločevine, ki je gladka, znaša 0,7 mm. Notranja pločevina, ki je lahko profilirana, je izdelana v standardni debelini 0,5 mm ali 0,6 mm. Izbira možnih tipov profiliranih pločevin je naslednja: gladek profil, S- in V-profil ter mikronilirani profil.

Pločevini sta prilepljeni s poliuretanskim lepilom na jedro iz negorljive lamelirane mineralne volne razreda A1 (EN 13501-1), ki zagotavlja zvočno in toplotno izolativnost ter visoko požarno odpornost. Vse tri plasti sestavljajo kompakten fasadni element debeline 80 - 240 mm, ki zagotavlja potrebno nosilnost, tesnost in sestavljivost. Samonosilni izolacijski sendvič paneli z obojestranskim kovinskim oplaščenjem, se lahko uporabijo na zunanjih in notranjih stenah ter stropovih. Kakovost materialov je dokazana tudi s Certifikatom o skladnosti proizvoda (EC).

Toplotna prehodnost sendvič panela znaša od 0,52 do 0,17 W/m²K, požarna odpornost za različne debeline pa se giblje od EI 30 do EI 120. Z EI, ki se meri v minutah, se označuje požarno klasifikacijo nenosilnega dela stavbe. Celovitost ali integriteta (E) predstavlja odpornost elementa ali dela stavbe proti vdoru ognja, dima in plinov, izolativnost (I) pa odpornost dela stavbe proti prenosu prekomerne vročine.

Paneli so na voljo v standardni modularni širini 1000 mm in nestandardni, katerikoli modularni širini 600 mm - 1200 mm. Dolžina elementa se lahko giblje od 530 mm do največ 6500 mm. Debeline panelov so lahko naslednje: 80, 100, 120, 133, 150, 172, 200 in 240 mm (Tehnični dokument Qbiss One B, 2011).

Za analize, ki so se izvedle v okviru te naloge, je bil izbran fasadni element s standardno modularno širino 1000 mm, dolžino 4000 mm in debelino 120 mm, slika 7. Masa elementa debeline 120 mm (Q-120) znaša 26,5 kg/m², toplotna prehodnost je 0,34 W/m²K in ognjevarnost EI 60.



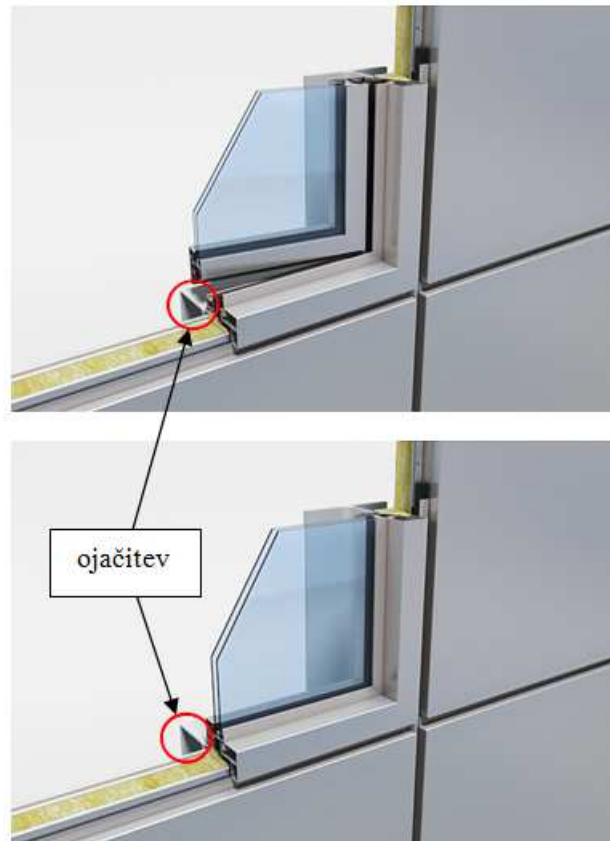
Slika 7: Sestavni deli modularnega fasadnega elementa Qbiss One in izbrane dimenzije

2.2 Vgrajevanje oken v Qbiss One fasadni sistem

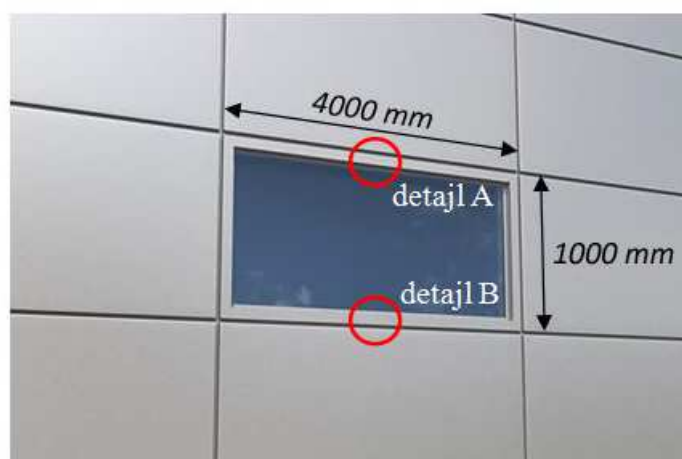
Okno je pomemben element v ovojju stavbe, saj bistveno vpliva na bivalno udobje, vzdrževalne in obratovalne stroške ter učinkovito rabo energije. Hkrati omogoča vizualni stik z zunanjim okoljem in daje občutek časovne in prostorske orientiranosti. Sodobno okno ima več funkcij, ki zajemajo skoraj celotno področje gradbene fizike: svetlobno, zvočno in toplotno ugodje v prostoru. Ščiti nas pred zunanjimi vremenskimi vplivi in omogoča dotok svežega zraka.

Podjetje Trimo v fasadni sistem Qbiss One vgrajuje modificirana aluminijasta okna. Sodobna okna nudijo izbiro med dvoslojnimi ali troslojnimi termopan stekli, ki so ločena s PVC, ALU ali INOX distančniki. Vmesni prostori so polnjeni z inertnimi plini (argon, kripton itd.). Na voljo so okna z odpiralnim sistemom ali fiksno zasteklitvijo. Detajl obeh oken je prikazan na sliki 8, kjer je tudi označena ojačitev na stiku panela in okna. Ojačitev v obliki horizontalnega nosilca škatlastega prečnega prereza, je nameščena na notranji strani fasadnega ovoja, in sicer tako na zgornjem, kot tudi na spodnjem stiku okenskega okvirja ter fasadnega elementa. Trenutno se vgradnja oken izvaja s pomočjo te »cevi«, ki naj bi služila kot ojačitev stika panel-okno.

Maksimalno okno, ki ga lahko vgradimo, je dolžine 6434 mm (svetla okenska odprtina) in višine do 2500 mm. Izvedba daljših okvirjev, od 6,5 m, se izvaja s sestavljanjem posameznih okvirjev, ki so spojeni v prečnem spoju (Tehnični dokument Qbiss One B, 2011). Izbrane dimenzije transparentnih elementov so odvisne tudi od želje investitorjev ali arhitektov.



Slika 8: Okno z možnostjo odpiranja (zgoraj) in fiksna zasteklitev (spodaj)



Slika 9: Prikaz aluminijastega okna na objektu

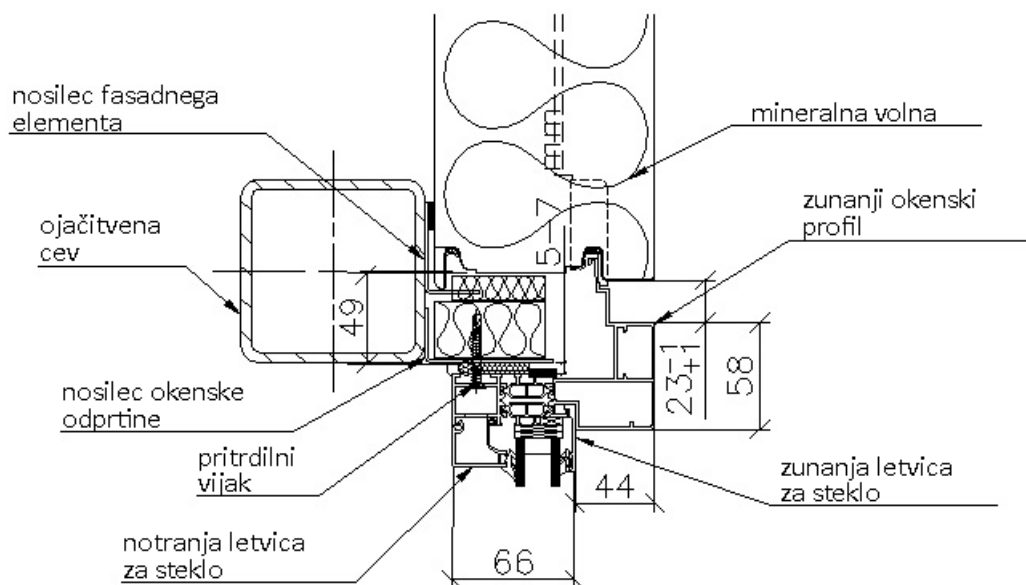
V nadaljevanju bomo obravnavali aluminijasto okno z dvojno zasteklitvijo, dolžine 4000 mm in višine 1000 mm, slika 9. Tako bomo imeli sistem fasadnega elementa in okna z enako dolžino in višino.

Na sliki 9 sta označena dva detajla stika panel-okno, A in B, ki sta prikazana na slikah 10 in 11. Izrisana sta s pomočjo programske opreme AutoCAD. Na slikah 10 in 11 so razvidni sestavni deli trenutnega načina vgradnje oken v fasadni sistem. Detajl A (slika 10) predstavlja *zgornji prečni prerez stika panel-okno*. Iz slike 10 je razvidno, da fasadni element nalega na jekleni kotnik (nosilec fasadnega elementa), na katerega je privijačena ojačitvena cev škatlastega prereza. Na nižje ležeči jekleni kotnik (nosilec okenske odprtine) je z vijaki pritrjen zgornji okenski profil oziroma okvir. Podobno je na detajlu B (slika 11), ki predstavlja *spodnji prečni prerez stika okno-panel*, s to razliko, da je nameščen le en jekleni kotnik. To pa zato, ker ne rabimo dodatnega nosilca za naleganje fasadnega elementa. Na kotnik sta z vijaki pritrjena tako ojačitvena cev kot tudi sam okenski okvir.

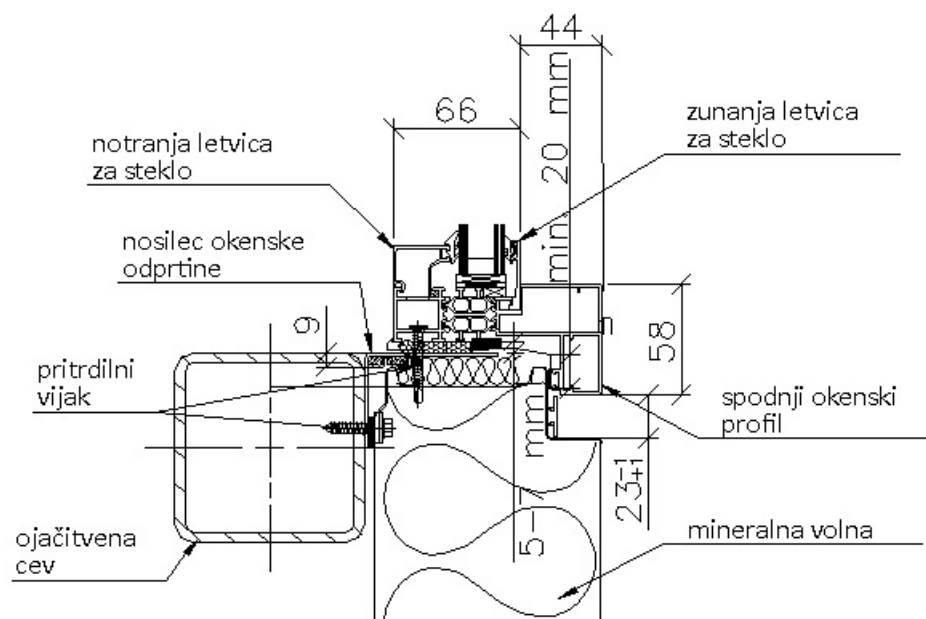
Kot sem že omenila v uvodu, je pri načinu vgradnje okna v Qbiss One fasadni sistem s pravokotno votlo cevjo moteče, da notranja stena ni ravna in zato ne ponuja estetskega videza. Poveča pa se tudi strošek same izvedbe fasade (zaradi dodatnega vijačenja in varjenja), kot tudi strošek izdelave fasadnega ovoja.

Na sliki 12 je prikazan zgornji stik fasadnega panela in okna. Fotografirano je okno v Oddelku razvoja podjetja Trimo d.d. Ojačitvena cev je privarjena na vertikalni nosilni element, v tem primeru je to jekleni steber I profila. Vertikalni steber I profila je na obeh koncih posameznega modularnega fasadnega panela, saj služi za pritrjevanje panelov obenem pa je del nosilne konstrukcije.

Način pritrjevanja fasadnih elementov Qbiss One se izbere glede na vrsto nosilne konstrukcije. Ena od možnosti je pritrjevanje neposredno v jekleno konstrukcijo (če je konstrukcija v dopustnih tolerancah). Če konstrukcija ni v dopustnih tolerancah, je potrebno uporabiti nastavljivo podkonstrukcijo. Pri betonskih konstrukcijah pa se uporabljata dva načina pritrjevanja, in sicer z nastavljivo podkonstrukcijo ali s širokim izravnalnim profilom.



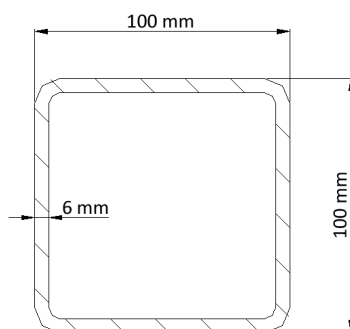
Slika 10: Detajl A - Zgornji prečni prerez stika panel-okno (izrisano v programu AutoCAD)



Slika 11: Detajl B - Spodnji prečni prerez stika okno-panel (izrisano v programu AutoCAD)



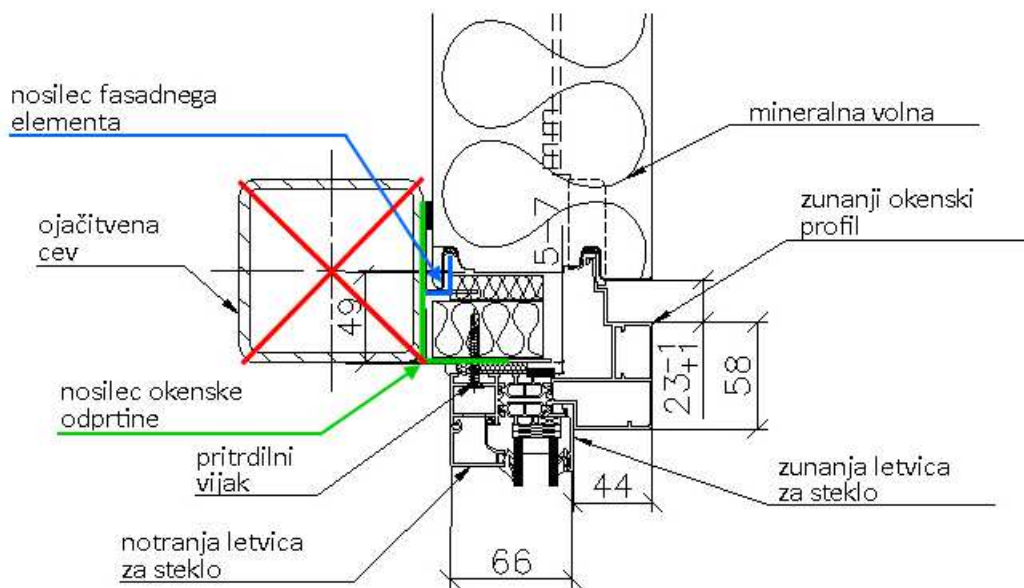
Slika 12: Prikaz zgornjega stika vgrajenega okna v fasadni sistem Qbiss One



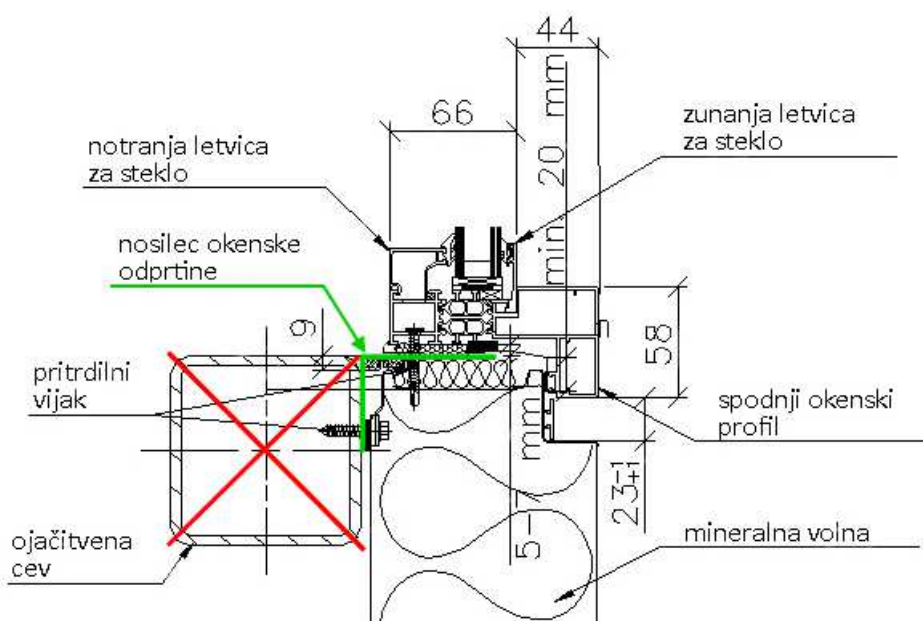
Slika 13: Dimenzije pravokotne votle cevi

2.3 Nov način vgrajevanja oken v Qbiss One fasadni sistem

Ideja novega načina vgradnje oken v Qbiss One fasadni sistem temelji na odstranitvi cevi škatlastega prereza, kot je prikazano na slikah 14 in 15. Nadomestili jo bomo z jeklenim kotnikom primernih dimenzij oziroma spremenili dimenzije že obstoječega nosilca okenske odprtine. Na sliki 14 je prikazano prekonstruiranje obstoječega konstrukcijskega detajla A s slike 10. Na zgornjem stiku panela in okenskega okvirja bomo skrajšali nosilec okenske odprtine (označen z zeleno barvo na sliki 14) v horizontalni smeri in podaljšali vertikalni del nosilca okenske odprtine do zgornjega roba nosilca fasadnega elementa (označen z modro barvo na sliki 14). Slednji je, kot manjši kotnik, privarjen na nosilec okenske odprtine. Detajl B (glej sliki 15 in 11) ostane po odstranitvi cevi škatlastega prereza nespremenjen, ker je tam že nameščen ustrezen kotnik.



Slika 14: Detajl A - Ideja novega načina vgradnje oken v Qbiss One fasadni sistem



Slika 15: Detajl B - Ideja novega načina vgradnje oken v Qbiss One fasadni sistem

3 FIZIKALNI MODEL ZA ŠTUDIJO PRIMERNOSTI NOVEGA NAČINA VGRADNJE OKEN V QBISS ONE FASADNI SISTEM

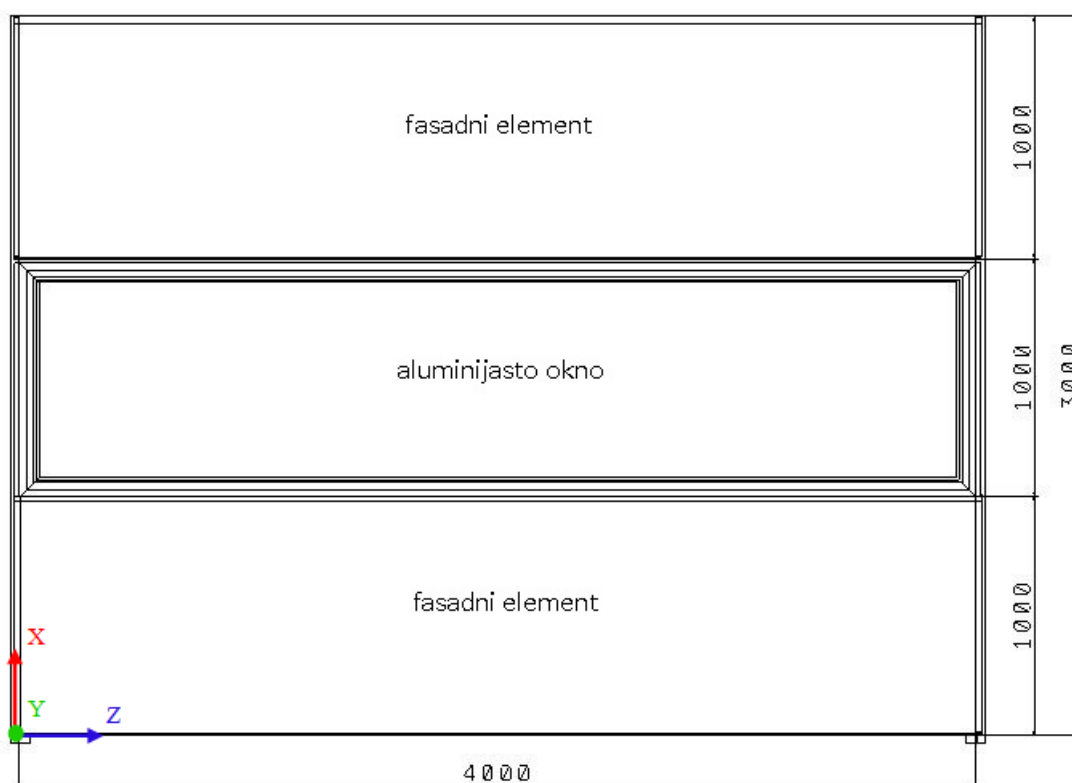
Če želimo pojav iz realnega sveta obravnavati na inženirski način, moramo pripraviti model. Temu postopku pravimo modeliranje. V nadaljevanju je opisan fizikalni model za obravnavani problem.

3.1 Sistem panel-okno-panel

Odločili smo se, da bomo obravnavali naslednji del fasadnega ovoja:

- a) v vzdolžni smeri - del fasadnega ovoja med dvema vertikalnima jeklenima nosilnima elementoma (škatlastega prečnega prereza), ki sta na krajnjih robovih fasadnih elementov,
- b) po višini - izbrano območje, omejeno na zgornji in spodnji fasadni element oziroma panel in vmesno okno z aluminijastim okvirjem.

Na sliki 16 je prikazan izbrani del fasadnega ovoja, ki smo ga poimenovali sistem *panel-okno-panel*. Sestavljata ga dva fasadna elementa Qbiss One, dimenzij $4\text{ m} \times 1\text{ m}$ ter vmesno okno, prav tako dimenzij $4\text{ m} \times 1\text{ m}$. Skupna dimenzija izbranega del fasadnega ovoja torej znaša $4\text{ m} \times 3\text{ m}$. Na sliki 16 je prikazan zunanji pogled obravnavanega sistema.



Slika 16: Sistem panel-okno-panel modeliran v CATIA (enote so mm)

Obrazložitev za gornjo izbiro je naslednja:

a) vzdolžna smer:

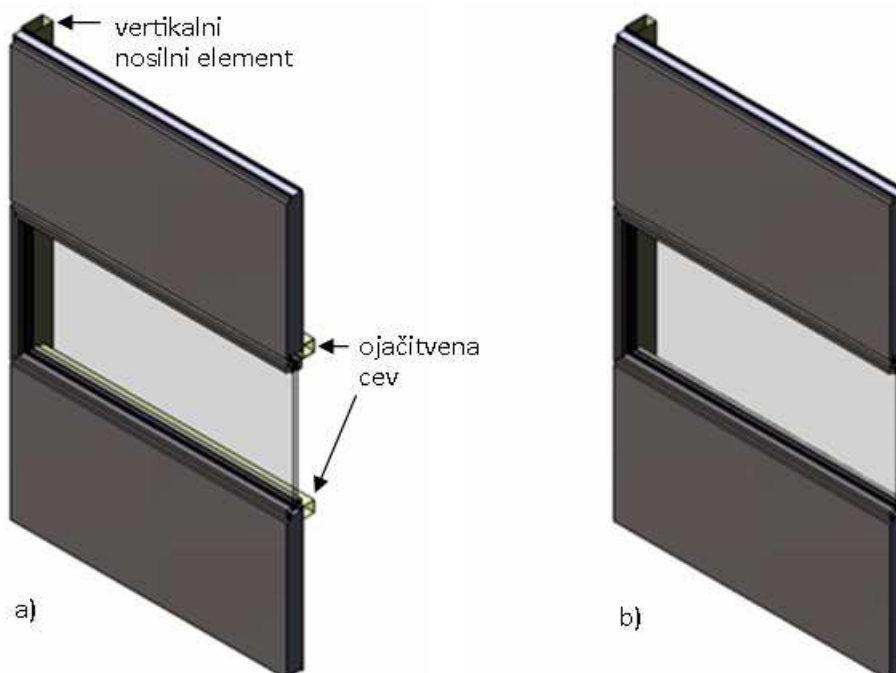
Vertikalna jeklena elementa, ki sta na obeh robnih straneh fasadnih elementov, sta nosilna konstrukcijska elementa, veliko bolj toga od fasadnega ovoja. Služita tudi za pritrdjevanje fasadnih in transparentnih elementov.

Predpostavimo, da je deformiranje obeh nosilnih elementov (levega in desnega) popolnoma enako in takšno, da to deformiranje ne obremenjuje sistema panel-okno-panel. Se pravi, da ne pride do tega, da bi se levi vertikalni element drugače deformiral kot desni ali obratno in na ta način obremenil celoten sistem. Predpostavimo torej, da se vertikalna nosilna elementa vedno deformirata tako, da se sistem panel-okno-panel pri tem premakne kot togo telo.

Ob zgoraj navedenih predpostavkah ima torej lahko sistem panel-okno-panel na stiku z nosilnim vertikalnim elementom toge podpore.

b) po višini:

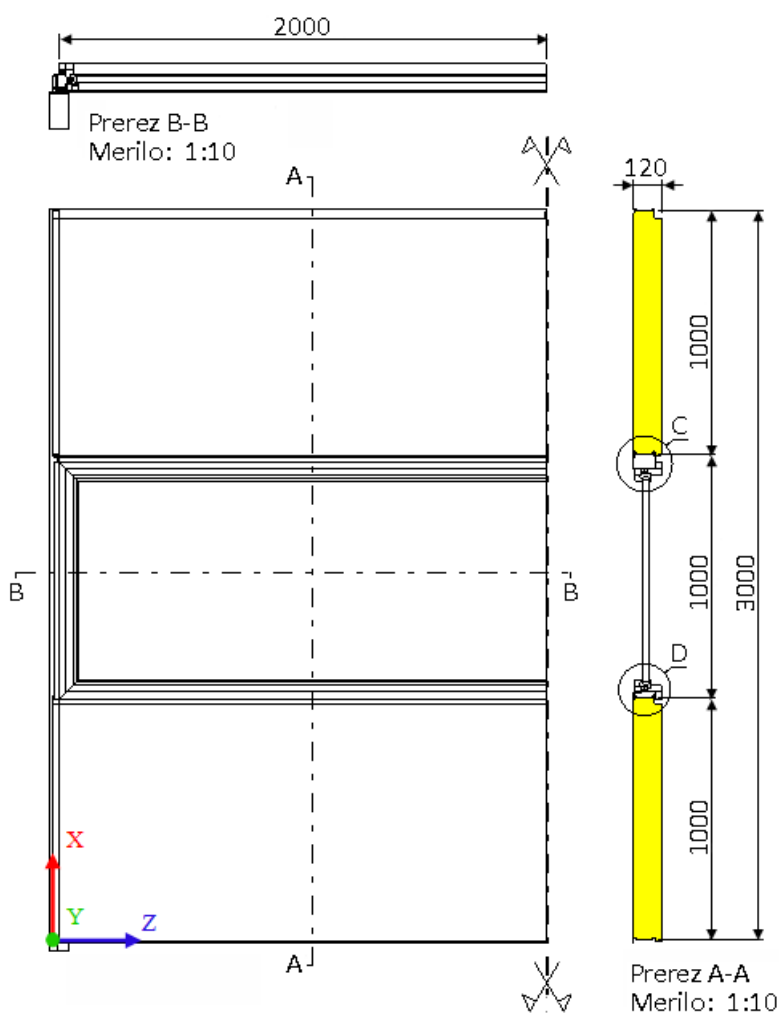
Predpostavimo, da se fasadni sistem podobno oziroma na enak način nadaljuje navzgor in navzdol. V vzdolžni smeri so paneli med seboj povezani preko sistema pero-utor, ki omogoča minimalno pomikanje panelov navzgor in navzdol, prav tako tudi navznoter ter navzven.



Slika 17: Geometrija polovice izbranega fizikalnega modela: a) stari način vgradnje oken v fasadni sistem in b) nova ideja vgradnje oken v fasadni sistem

Za izbrani del fasadnega ovoja sta značilni tako geometrijska kot materialna simetrija, kot tudi simetrija glede podpiranja in obtežbe (slika 17). Simetrijska os (označena na sliki 18) poteka po sredini med obema vertikalnima nosilnima elementoma, se pravi na 2 m celotne rastrske razdalje. Na sliki 17 je polovica sistema panel-okno-panel izrisana s pomočjo programskega orodja CATIA, ki je namenjen za dvodimenzionalno (2D) in tridimenzionalno (3D) geometrijsko modeliranje. Na sliki 18 je prav tako narisana polovica sistema panel-okno-panel z osnovnimi dimenzijami. Prikazana sta tudi prečni A-A in vzdolžni B-B prerez. V prečnem prerezu sta označena dva detajla, C in D na stiku med fasadnim panelom in transparentnim elementom. Omenjena detajla sta podrobno prikazana v poglavju 3.3, kjer je predstavljeno modeliranje detajlov.

Tudi pri numeričnem modelu smo uporabili le polovico sistema panel-okno-panel. Na simetrijski osi so bili upoštevani simetrijski robni pogoji: preprečen horizontalni pomik oziroma pomik v Z smeri ter preprečena zasuka okoli X in Y osi (slika 18).

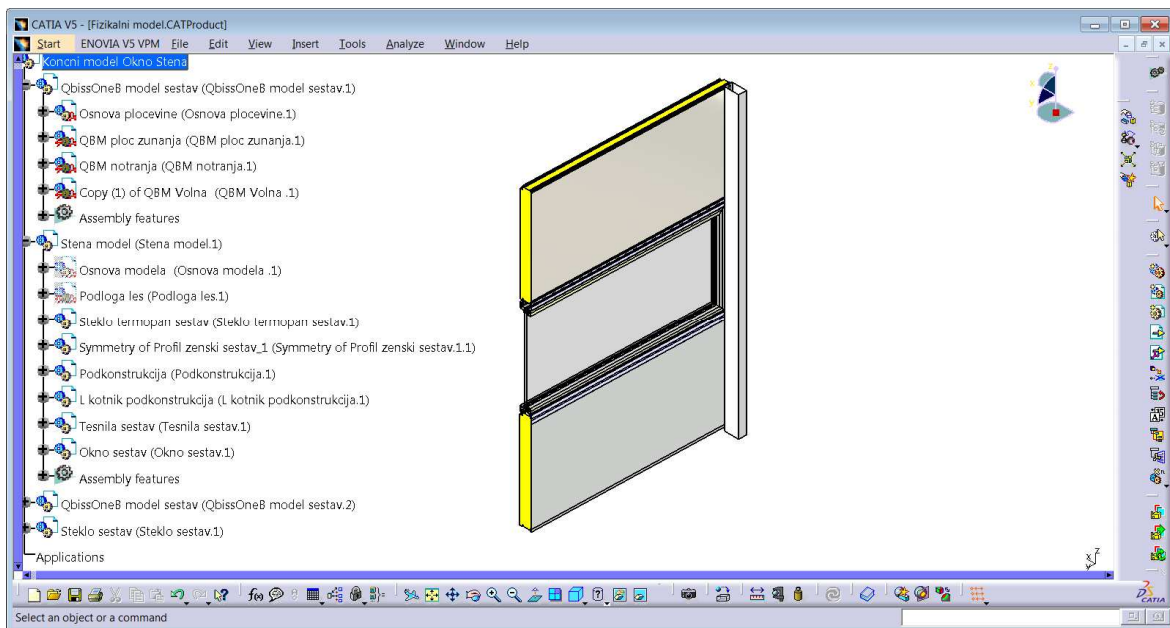


Slika 18: Pogled od spredaj, prečni in vzdolžni prerez izbranega modela (enote so mm)

3.2 Uporabljeni računalniški programi

CATIA (angleško Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application) je CAD/CAM/CAE programska oprema. Softver razvija podjetje Dassault Systemes od leta 1970. Prvotno je bil namenjen za Dassaultovo letalo Mirage, se pravi za potrebe francoske letalske industrije. Danes se ga uporablja tudi v drugih panogah, od avtomobilske do vesoljske industrije, za industrijske stroje, elektroniko, ladjedelništvo, ... Uporablja se ga tudi v gradbeništvu. Program CATIA je dobro podporno orodje za razvoj novega tehniškega izdelka. Omogoča spremembo zasnove izdelka in skrajša razvojne cikle. To pomaga podjetjem, da pospešijo svoj odziv na potrebe trga. CATIA je povezana tudi z ENOVIA, SIMULIA in DELMIA. V povezavi z ENOVIA upravlja življenjski cikel izdelka, medtem ko s SIMULIA skrbi za tehnično kakovost in z DELMIA za proces proizvodnje. CATIA V5 je ključni del V5 PLM (Product Lifecycle Management).

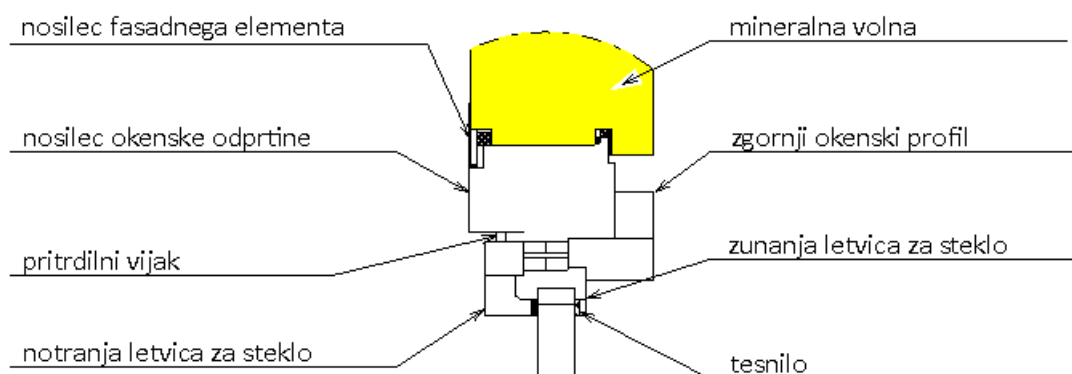
Na osnovi detajlov, izrisanih v programu AutoCAD, je bil s pomočjo programskega orodja CATIA V5 narejen 3D geometrijski model sistema panel-okno-panel. Model smo kasneje po posameznih sklopih uvozili v program ANSYS za numerično analizo.



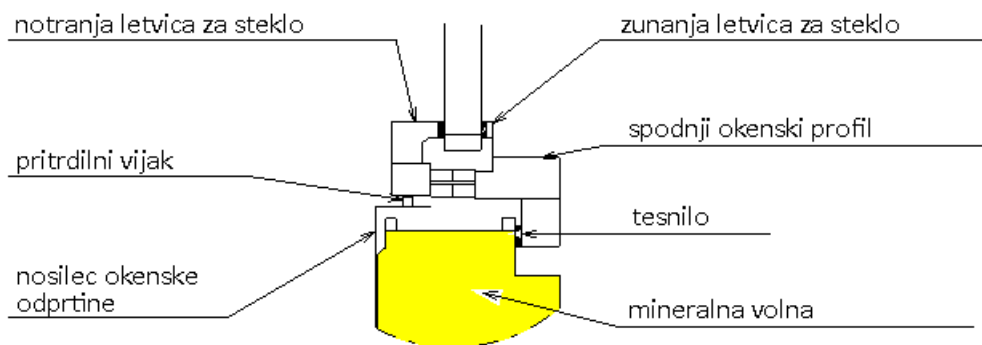
Slika 19: Delovno okno programskega orodja CATIA V5

3.3 Modeliranje detajlov

Da bi izbrani fizikalni model kar najbolj opisal realno stanje, so bili na stiku panel-okno modelirani vsi detajli okna, res da nekoliko poenostavljeno (slika 20), zaradi lažjega kasnejšega računskega simuliranja kontaktov in priprave mreže končnih elementov. Pri modeliranju niso bili upoštevani tesnilni kit in tesnilni trak, izolacijska pena, okroglo PE tesnilo ter butilni trak na Alu foliji, ker ne prispevajo k nosilnosti samega okenskega okvirja.



Detail C
Scale: 1:5



Detail D
Scale: 1:5

Slika 20: Poenostavljeni zgornji detajl C in spodnji detajl D na stiku panel-okno

Iz slike 20 je razvidno, da je okenski okvir privijačen na nosilec okenske odprtine z vijaki. Ti vijaki so bili v numeričnem modelu, opisanem v naslednjem poglavju, modelirani s 3D »solid« končnimi elementi. Z omenjenimi končnimi elementi so bila modelirana tudi tesnila, distančniki ter mineralna volna. Vsi ostali deli, kot so pločevina, nosilec okenske odprtine, nosilec fasadnega elementa, okenski profil, letvica za steklo in plastika pa so bili v numeričnem modelu modelirani s »shell« elementi. Stik pločevine panela in mineralne volne je bil modeliran kot tog, saj smo predpostavili, da pri obravnavanih obtežbah ni mogoč pretrg tega lepljenega stika.

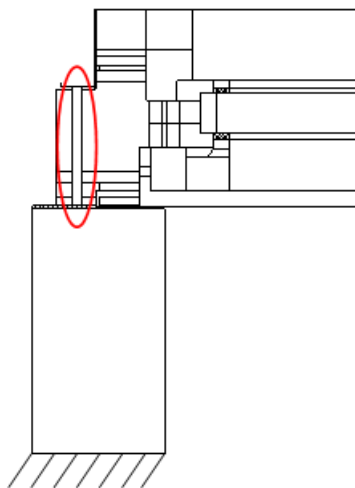
V nadaljevanju je razloženo pritrjevanje okenskega okvirja v konstrukcijski sklop.

Vertikalni nosilec okenske odprtine (kotnik) je privijačen neposredno na vertikalni nosilni element s 4 vijaki na medsebojni razdalji 25 cm (slika 21 levo). Na sliki 21 desno pa so prikazani in označeni 4 vijaki, s katerimi je zgornji okenski okvir privijačen na horizontalni nosilec okenske odprtine. Vijaki so na medsebojni razdalji 50 cm. Enako število vijakov (na enakih medsebojnih razdaljah) se nahaja tudi na spodnji legi (na spodnjem stiku okenskega okvirja in nosilca okenske odprtine).

Na obeh prečnih spojih pa je aluminijski okenski okvir privijačen na vertikalni nosilec okenske odprtine s 3 vijaki, katerih razdalja znaša 30 cm, ter s 3 vijaki na razdalji 32 cm neposredno na vertikalni nosilni element (slika 21 levo). Opisano je vijačenje za polovico sistema, kar pomeni, da je zaradi simetrije sistema enako izvedeno na drugi strani. Na sliki 22 je označena pozicija enega vijaka, s katerim je privijačen okenski okvir na nosilni vertikalni element.



Slika 21: Vijačenje okenskega okvirja na nosilec okenske odprtine



Slika 22: Stik okenskega okvirja in vertikalnega nosilnega elementa

V programu CATIA je bilo potrebno za uvoz geometrije sistema panel-okno-panel v program ANSYS ustvariti različne sestavne dele modela, katere smo shranili v .stp formatu. To je bilo narejeno zaradi kasnejšega boljšega in lažjega pregledovanja vseh sestavnih delov ter zaradi enostavnejšega definiranja lastnosti elementov.

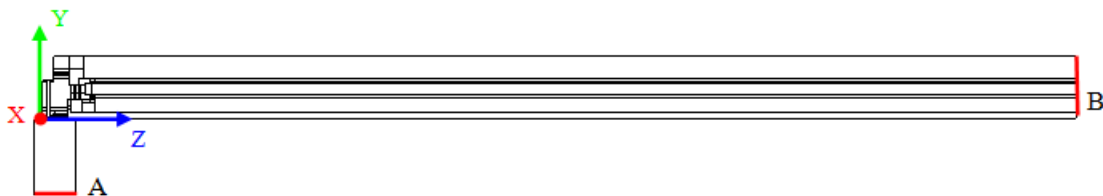
V programu ANSYS se tako ustvarijo posamezni deli modela imenovani »Parts«, ki v našem primeru predstavljajo številne sestavne dele sistema panel-okno-panel. To so jeklena vertikalna podkonstrukcija, zunanja in notranja pločevina Qbiss plošče, mineralna volna, okenski okvir, sestavni deli steklene šipe, vijaki, tesnila itd. Tako smo dobili 61 sestavnih delov »Parts«, ki so vsebovali skupaj 161 teles »Bodies«.

3.4 Modeliranje podpor

Da se čim bolj približamo realnemu obnašanju konstrukcijskega sistema panel-okno-panel, moramo modelirati primerne podpore, ki realistično omejujejo premikanje sistema.

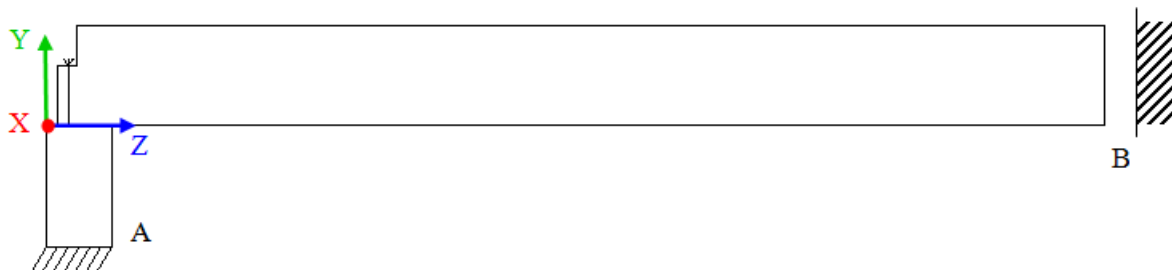
Spomnimo se, da smo za sistem panel-okno-panel izbrali eno nedilatirano okno dolžine 4 m in modularni fasadni element enake dolžine. Torej je znašala širina med krajnimi podporami 4 m. Ker je bila upoštevana simetrija fasadnega sistema preko ravnine, vzporedne XY ravnini, je bila v CATIA in ANSYS modelirana le polovica fizikalnega modela dolžine 2 m.

Simetrija sistema se je podala v programu ANSYS s pomočjo ukaza »Symetry Region«, ki se je dodatno izvedla še za telesa kot so volna, distančnik in tesnila. Na sliki 23 je prikazan vzdolžni prerez modela z izrisanim koordinatnim sistemom XYZ in označenimi območji podprtja.



Slika 23: Oznacena območja podprtja

V točki 3.1 so navedene predpostavke, na podlagi katerih je bil nosilni vertikalni element nepomično podprt (območje A na sliki 24). Ta podpora na notranji strani nosilnega stebra prepreči pomik v vseh smereh in zasuk okoli vseh osi (X , Y , Z). Na simetrijski osi (območje B na sliki 24), ki leži na sredini med obema vertikalnima nosilnima elementoma, je preprečen pomik v smeri Z osi. Prav tako sta na tem mestu preprečena tudi zasuka okoli X in Y osi.



Slika 24: Shema podprtega fasadnega sistema

Podpora v območju A: $u_x = 0$ $\varphi_x = 0$
 $u_y = 0$ $\varphi_y = 0$
 $u_z = 0$ $\varphi_z = 0$

Podpora v območju B: $u_x \neq 0$ $\varphi_x = 0$
 $u_y \neq 0$ $\varphi_y = 0$
 $u_z = 0$ $\varphi_z \neq 0$

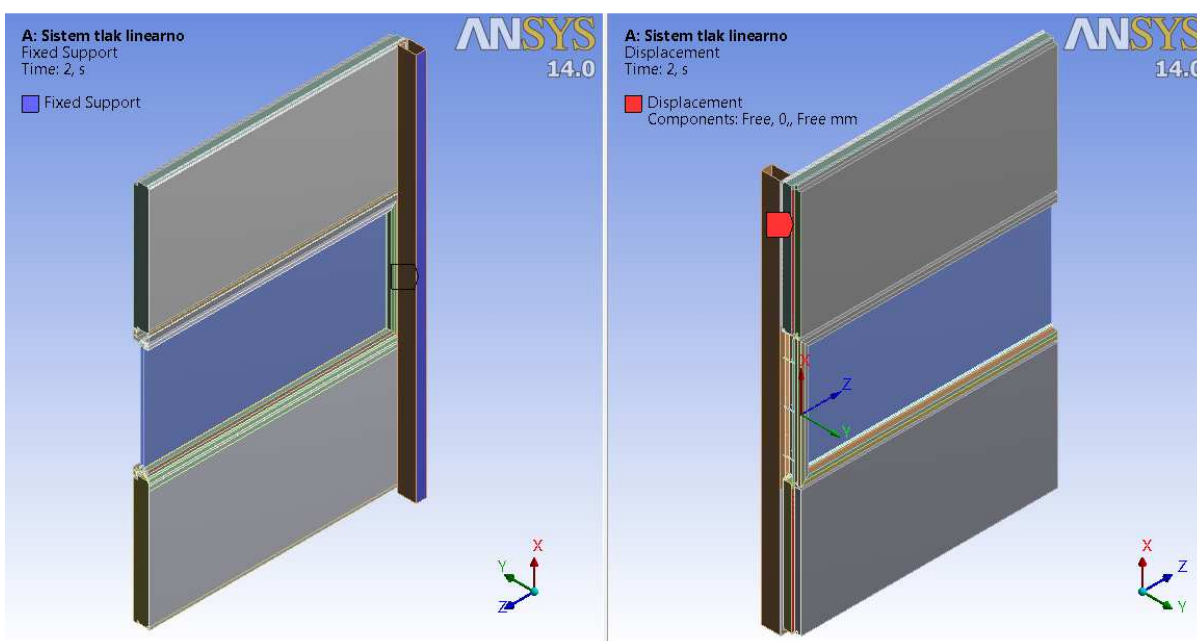
Kjer pomeni:

u_x = pomik v smeri X osi
 u_y = pomik v smeri Y osi
 u_z = pomik v smeri Z osi

φ_x = zasuk okoli X osi
 φ_y = zasuk okoli Y osi
 φ_z = zasuk okoli Z osi

Fasadni paneli so v prečni smeri privijačeni na vertikalni element (nosilno konstrukcijo), vendar vijaki niso bili zmodelirani v programu CATIA, zato je bilo pritrjevanje fasadnih panelov izvedeno v programu ANSYS. Z ukazom »Displacement« smo na označeni površini pločevine (slika 25 desno) preprečili pomik fasadnega panela v smeri Y osi in na ta način nadomestili pritrjevanje panela z vijaki. V realnosti ta del pločevine ni prilepljen na mineralno volno in tudi v ANSYSU ni bil izveden kontakt (»bonded«) na tem stiku. Tako smo z opisanim načinom pritrjevanja Qbiss plošče na vertikalni nosilni element obenem preprečili tudi odmik pločevine od mineralne volne.

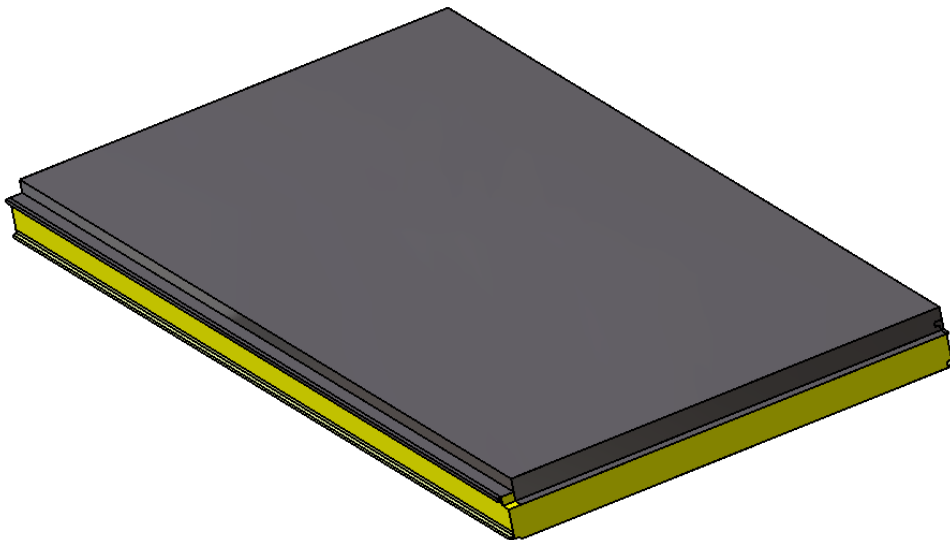
V realnosti je vzdolžni spoj med paneli izveden po sistemu pero-utor. Takšen spoj omogoča majhno premikanje stičnega roba panela navzgor in navzdol, prav tako pa tudi navznoter ter navzven, pri čemer je prisoten odpor sosednjega panela. Odločili smo se, da bomo odpor sosednjega panela v stiku pero-utor zanemarili in zgornji ter spodnji rob sistema panel-okno-panel modelirali kot nepodprta.



Slika 25: Prikaz podpor v programu ANSYS

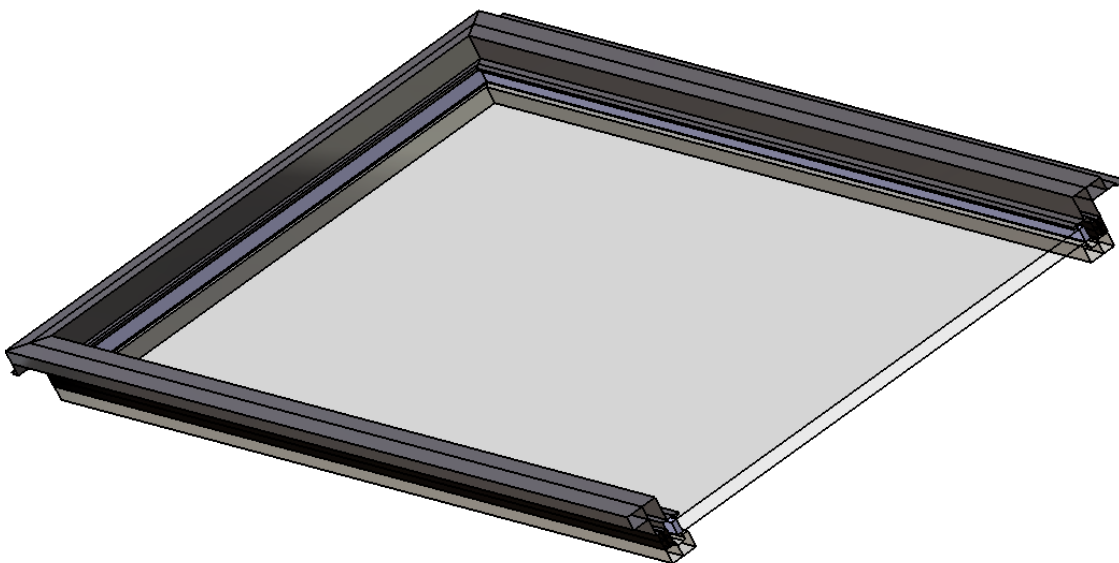
3.5 Izbrani tip fasadnega sistema Qbiss One in tip okna za analize

Za simulacijo obnašanja fasadnega sistema Qbiss One je bil izbran fasadni panel z debelino 12 cm. Elementi s to debelino se pogosto uporabljajo, kar je bil glavni razlog za njegovo izbiro. Dolžina modeliranega panela znaša 2 m, medtem ko je njegova širina 1 m, kar je standardna modularna širina. Na spodnji sliki 26 je prikazan modeliran izolacijski sendvič panel z obojestranskim kovinskim oplasčenjem debeline 0,6 mm.



Slika 26: Modeliran Qbiss One fasadni sistem

Za transparentni element je bilo izbrano aluminijasto okno z dvojno zasteklitvijo. Dolžina modeliranega okna je prav tako 2 m. Pri temu elementu se je modeliralo tudi steklo z debelino 8 mm, kljub temu da steklo nima značaja nosilnega materiala. To pa zato, da so se po izvedenih numeričnih analizah v programu ANSYS preverili tudi pomiki in napetosti v steklu.



Slika 27: Modelirano aluminijasto okno z dvojno zasteklitvijo

3.6 Modeliranje materialov

Struktura je osnovna značilnost snovi, ki odločilno vpliva na njeno mehansko obnašanje. V grobem lahko trdne snovi glede na strukturo razdelimo na amorfne (steklo, guma, plastične mase...), kristalne (minerali) in kristalaste (jeklo in druge kovine). Ali se snov obnaša izotropno ali anizotropno, je v največji meri odvisno ravno od njene strukture. Izotropija je lastnost snovi, da se v vseh smereh obnaša enako in velja za amorfne snovi. Izotropne lastnosti navadno pripišemo tudi kristalastim snovem. Anizotropija pa je lastnost snovi, da so njihove mehanske lastnosti različne v različnih smereh (Srpčič, 2003). Eden od predstavnikov anizotropnih materialov, poleg lesa, je tudi mineralna volna, ki je sestavni element Qbiss One panela. Posebnost lamel iz mineralne volne so pravokotno orientirana vlakna, ki zagotavljajo veliko razplastno trdnost.

Pomemben podatek pri materialih je tudi, ali se v določenem napetostnem stanju obnašajo elastično ali neelastično. Elastično se obnašajo tista telesa, ki se med delovanjem zunanje obtežbe sicer deformirajo, vendar se po popolni razbremenitvi povrnejo v prvotno nedeformirano stanje. Telesa, ki pa po obremenitvi ohranijo deformirano obliko in velikost, so plastična. Pogosto pa se telesa obnašajo elasto-plastično, to pomeni, da se po razbremenitvi en del deformacije izgubi (elastična deformacija), drugi del pa ostane (plastična deformacija) (Srpčič, 2003).

V obravnavanem sistemu panel-okno-panel so modelirani naslednji materiali, katerih karakteristike smo podali v programu ANSYS, in sicer pod drugo točko imenovano »Engineering Data« v shemi »Project Schematic«:

- konstrukcijsko jeklo,
- aluminij (Aluminium Alloy 6063-T6),
- poliamid (PA66 GF25),
- EPDM (tesnilo),
- steklo,
- mineralna volna.

Konstrukcijsko jeklo, aluminij, poliamid, EPDM in steklo imajo lastnosti izotropnega materiala, medtem ko je mineralna volna anizotropen material.

Za izvedbo ustreznih analiz smo potrebovali naslednje mehanske lastnosti materiala:

- ρ ...gostota [kg/m^3],
- α ...koeficient toplotnega raztezka [$1/^\circ\text{C}$],
- E ...modul elastičnosti [Pa, MPa],
- ν ...Poissonov količnik,
- λ ...toplotna prevodnost [W/mK],
- $G = E/(2(1 + \nu))$...strižni modul [Pa, MPa].

Računske vrednosti materialnih konstant, ki jih potrebujemo za modeliranje materialov sestavnih elementov sistema panel-okno-panel, so bile pridobljene s strani proizvajalcev in so tabelarično prikazane v nadaljevanju. Izjema je EPDM tesnilo, ki smo mu predpisali zelo majhen elastični modul.

Preglednica 1: Mehanske lastnosti konstrukcijskega jekla

KONSTRUKCIJSKO JEKLO		
Oznaka	Vrednost	Enote
ρ	7850	kg/m ³
α	$1,20 \cdot 10^{-5}$	1/°C, 1/K
E	200000	MPa
ν	0,3	
λ	60,5	W/m K
G	$7,69 \cdot 10^{10}$	Pa

Preglednica 2: Mehanske lastnosti aluminija

ALUMINIJ		
Oznaka	Vrednost	Enote
ρ	2700	kg/m ³
α	$2,35 \cdot 10^{-5}$	1/°C, 1/K
E	69500	MPa
ν	0,33	
λ	200	W/m K
G	$2,61 \cdot 10^{10}$	Pa

Preglednica 3: Mehanske lastnosti poliamida

POLIAMID		
Oznaka	Vrednost	Enote
ρ	1320	kg/m ³
α	$7,0 \cdot 10^{-5}$	1/°C, 1/K
E	8600	MPa
ν	0,35	
λ	0,34	W/m K
G	$3,18 \cdot 10^{+8}$	Pa

Preglednica 4: Mehanske lastnosti EPDM

EPDM		
Oznaka	Vrednost	Enote
ρ	120	kg/m ³
α	/	1/°C, 1/K
E	0,1	MPa
ν	0,4	
λ	0,25	W/m K
G	49505	Pa

Preglednica 5: Mehanske lastnosti stekla

STEKLO		
Oznaka	Vrednost	Enote
ρ	2500	kg/m ³
α	8,50 10 ⁻⁶	1/°C, 1/K
E	70000	MPa
ν	0,23	
λ	0,96	W/m K
G	2,85 10 ⁺¹⁰	Pa

Preglednica 6: Mehanske lastnosti mineralne volne

MINERALNA VOLNA		
Oznaka	Vrednost	Enote
ρ	120	kg/m ³
α	1,20 10 ⁻⁵	1/°C, 1/K
E_x	0,5	MPa
E_y	11	MPa
E_z	5	MPa
$\nu_{xy}=\nu_{yz}=\nu_{xz}$	0,01	
G_{xy}	2,32	MPa
G_{yz}	5,8	MPa
G_{xz}	0,5	MPa
λ	0,041	W/m K

Kot mnogi materiali, se steklo obnaša idealno elastično. Posebnost stekla pa je to, da ni duktilno, se pravi da nima plastičnega dela obnašanja, ko se ga bolj in bolj obremenjuje. Hipoma se zgodi lom (Bon, 2003).

Mineralna volna je po celotni svoji prostornini nehomogena in se posledično obnaša anizotropno. To pomeni, da so njene mehanske lastnosti različne v različnih smereh. Med posebnimi primeri anizotropije je najpomembnejši primer ortotropne ali ortogonalno izotropne snovi, za katero je značilno, da se obnaša izotropno glede na tri medsebojno pravokotne ravnine.

Iz enoosnega preizkusa na vzorcu, katerega vzdolžna os poteka v smeri osi y , dobimo diagram $\sigma - \epsilon$. Iz slednjega lahko odčitamo modul elastičnosti E_y za prvo smer ortotropije. V preostalih dveh ortotropnih smereh x in z pa z merjenjem prečnih deformacij določimo še koeficienta prečne kontrakcije ν_{xy} in ν_{yz} . Postopek ponovimo, tako da vzorec enoosno obremenimo še v smereh osi x in z , da dobimo modula elastičnosti E_x in E_z , izmerimo pa tudi Poissonova količnika ν_{xy} in ν_{xz} . Ko pravokotni vzorec obtežimo s strižno obtežbo v ravnini, ki jo določata ortotropni smeri y in x , dobimo $\tau - \gamma$ diagram. Na podlagi diagrama lahko določimo strižni modul G_{xy} . Na podoben način dobimo strižna modula G_{xz} in G_{yz} (Srpčič, 2003). Vrednosti materialnih konstant za mineralno volno so bile pridobljene v podjetju Trimo d.d. na podlagi izvedenih testov.

3.7 Modeliranje obtežbe

Obtežba je neka motnja, ki povzroči spremembo napetostnega stanja v konstrukciji. Poznamo statično in dinamično obtežbo, temperaturno spremembo, gibanje tal, relativni premiki, požar itd.

Za izvedbo analize konstrukcijskega sistema so bili v programu ANSYS modelirani naslednji vplivi, ki so prikazani v preglednici 7:

- lastna teža,
- enakomerni površinski pritisk in srk zaradi vetra,
- temperaturna obremenitev oziroma toplotni vpliv.

Preglednica 7: Razvrstitev modeliranih vplivov

Izvor / Spreminjanje s časom	Stalni vplivi	Spremenljivi vplivi
Neposredni vplivi	Lastna teža konstrukcije	Vplivi vetra (tlak, srk)
Posredni vplivi	/	Toplotni vplivi

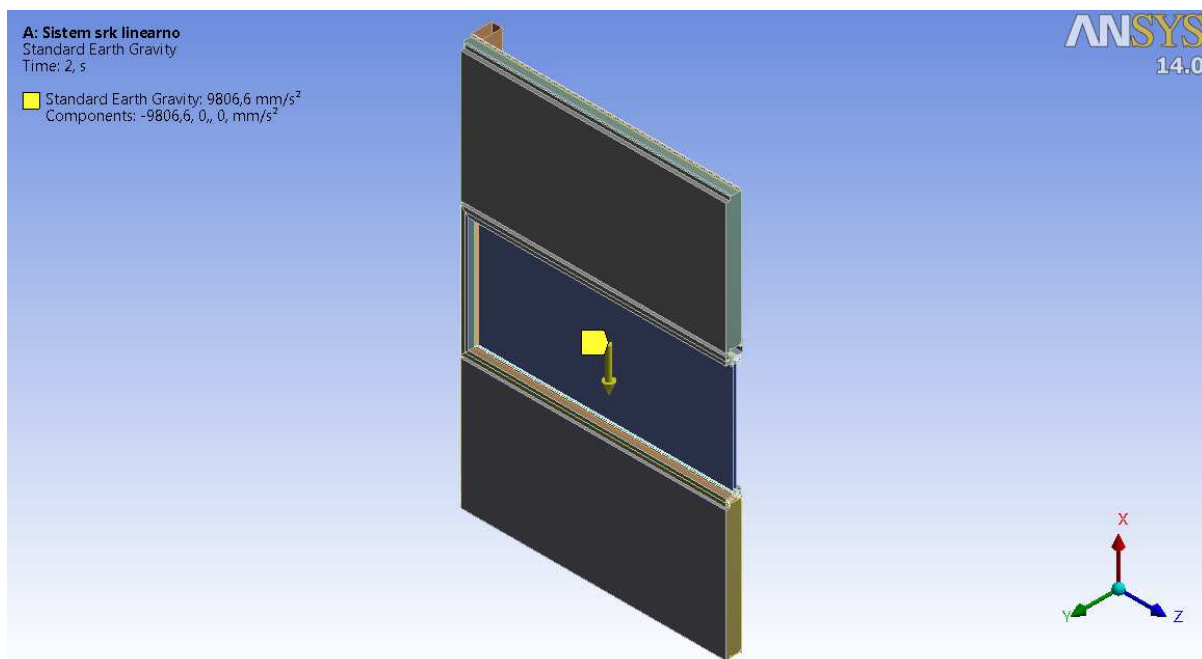
Lastno težo obravnavanega sistema panel-okno-panel izračuna program ANSYS na podlagi podanih vrednosti materialnih konstant za gostoto, geometrije in težnostnega pospeška.

V Sloveniji predstavlja pomemben vpliv tudi veter. Narava vetra je taka, da se njegov vpliv spreminja s časom. Neposredno deluje na zunanje ploskve objekta kot tlak ali srk, in sicer deluje pravokotno na obremenjeno ploskev. Vrednost enakomernega tlaka in srka, ki smo jo nanegli na zunanjo površino sistema panel-okno-panel znaša 3000 N/m^2 oziroma $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$. Primer enakomerne površinske obtežbe zaradi vetra v programu ANSYS, je prikazan na sliki 29, kjer temno rdeče obarvane ploskve predstavljajo obremenjene konstrukcijske elemente.

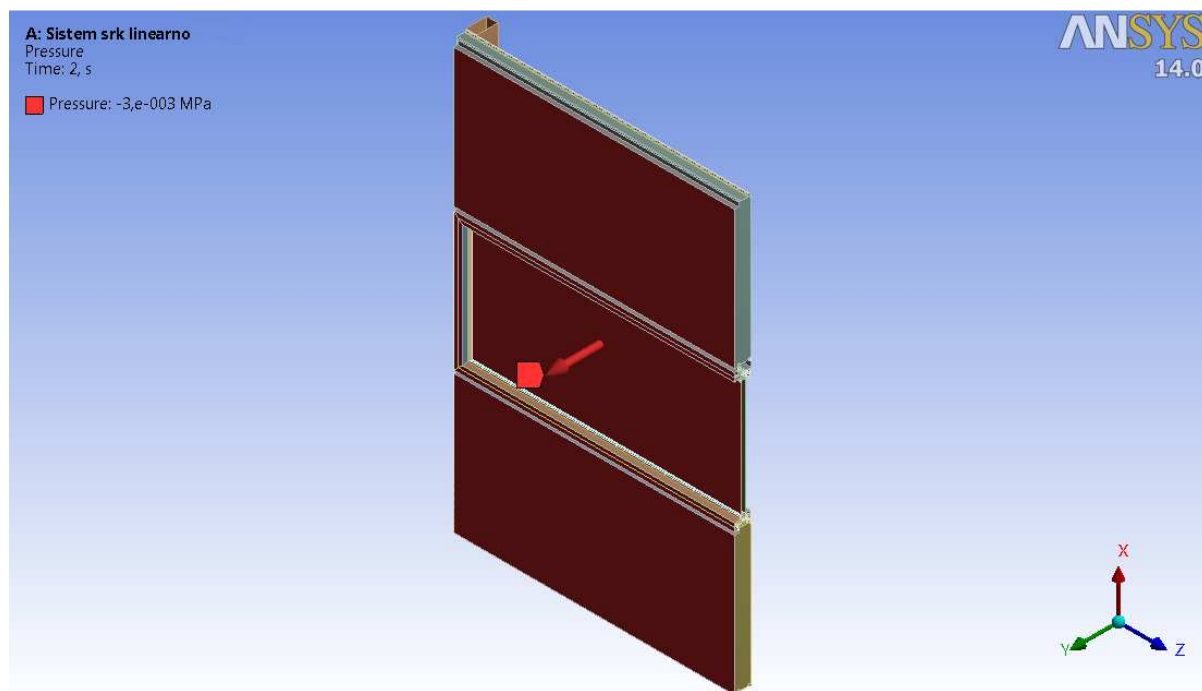
Toplotni vplivi so lahko pomembni zaradi velikosti konstrukcije ali zaradi velikih temperaturnih sprememb, ki so značilne za današnje klimatske pogoje. Obarvana fasada, katero obravnavamo v našem primeru, se lahko na južni in zahodni strani segreje na visoko temperaturo. Predpostavimo, da je ta temperatura $90 \text{ }^\circ\text{C}$.

Konstrukcije se različno odzivajo na spremembe temperature. Dva skrajna primera, ki se lahko pojavita, sta naslednja: (i) konstrukcija se prosto deformira - v njej ni dodatnih napetosti, ker ni ovir za spremembo oblike zaradi toplotnih vplivov, (ii) konstrukcija se sploh ne deformira, ker so premiki konstrukcije v celoti preprečeni, zato se v njej pojavijo dodatne napetosti. V praksi se pojavita mešanici obeh navedenih primerov. Potrebno je poskrbeti za tako izvedbo, da premiki zaradi toplotnih vplivov ne škodujejo zanesljivosti konstrukcije, in zagotoviti ustrezen prenos sil (Beg s sod., 2009).

Obremenitev je v programu ANSYS nanešena v dveh korakih. V prvem koraku je upoštevana lastna teža (slika 28), medtem ko je v drugem koraku nanešena obravnavana obremenitev, npr. obremenitev zaradi vetra - srk, ki je usmerjen stran od obremenjene ploskve in je negativnega predznaka (slika 29).



Slika 28: Prikaz obremenitve nanešene v 1 koraku: standardna gravitacijska sila



Slika 29: Prikaz obremenitve nanešene v 2. koraku: obremenitev zaradi vetra - srk

3.8 Tabela analiziranih variant

Spodaj v preglednici 8 sta prikazani obe obravnavani varianti sistema panel-okno-panel. Varianta A, ki je bila analizirana v diplomski nalogi, je fasadni sistem, kjer ni vgrajene ojačitvene cevi na zgornjem in spodnjem stiku med fasadnim panelom ter okenskim okvirjem. Varianta B, ki bo služila zgolj za primerjavo rezultatov, pa predstavlja trenutni način vgradnje panelov in okenskega okvirja z ojačitveno cevjo. Slednja se bo naknadno izvedla v podjetju in ni prikazana v tej diplomski nalogi.

Preglednica 8: Obravnavana sistema panel-okno-panel (varianta A in varianta B)

Varianta A	Varianta B
Sistem panel-okno-panel brez ojačitvene cevi	Varianta A + ojačitvena cev

3.9 Analiza ustreznosti novega načina vgradnje

Raziskava novega načina vgradnje okenskega okvirja v fasadni sistem je temeljila na podlagi preverjanja mejnega stanja nosilnosti (MSN) in mejnega stanja uporabnosti (MSU).

Temeljni koncept mejnih stanj je stanje, ki konstrukcijo označuje kot zadovoljivo (varno) ali nezadovoljivo (nevarno). Mejno stanje je povezano z določenimi zahtevami glede obnašanja konstrukcije ali konstrukcijskega sklopa, ki pa niso dovolj jasno izoblikovane. Zato je tudi težje natančno določiti kdaj konstrukcija preide v mejno stanje. Mejno stanje nosilnosti je povezano s porušitvijo ali podobno obliko odpovedi konstrukcijskega sistema in je povezano z varnostjo ljudi. Pomembno je poudariti, da odpoved pri mejnem stanju glavnega konstrukcijskega sistema pomeni porušitev celotnega objekta, medtem ko odpoved sekundarnega ali drugih elementov, kot so fasadne obloge, predstavlja le lokalno porušitev. Mejno stanje nosilnosti se lahko na podlagi meje tečenja določa pri konstrukcijah, ki so izdelana iz duktilnih materialov. Na drugi strani pa se mejno stanje uporabnosti pojavlja v fazi normalne uporabe konstrukcije. Odraža se na podlagi udobnega počutja, katerega zagotovimo z omejitvijo prekomernih povosov in nihanj (Beg s sod., 2009). Prekoračitev mejnega stanja nosilnosti skoraj vedno predstavlja odpoved konstrukcije, medtem ko prekoračitev mejnega stanja uporabnosti ne predstavlja tako resnih posledic, tako da lahko konstrukcijo večinoma normalno uporabljamo naprej.

V diplomskem delu je bila določena projektna obtežba sistema panel-okno-panel pri mejnem stanju nosilnosti in prav tako tudi pri mejnem stanju uporabnosti. Na podlagi sklicevanj na ta mejna stanja je bilo možno določiti zanesljivost oziroma ustreznost konstrukcijskega sistema.

Kriteriji za mejno stanje nosilnosti so bili naslednji:

- a) začetek plastifikacije duktilnih materialov, kot sta jeklo in aluminij,
- b) izguba stabilnosti sistema panel-okno-panel (uklon),
- c) dosežena trdnost stekla ali kateregakoli drugega krhkega materiala.

Kriterij za mejno stanje uporabnosti pa je bil pomik, ki je v sistemu panel-okno-panel še dopusten.

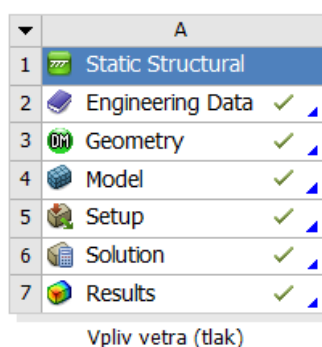
4 NUMERIČNI MODEL ZA ŠTUDIJO PRIMERNOSTI NOVEGA NAČINA VGRAJEVANJA OKEN V QBISS ONE FASADNI SISTEM

4.1 Osnovno o uporabljenem programu ANSYS

Numerične analize so bile izvedene v programu ANSYS, verzija 14.0. Delovno okolje ANSYS Workbench je programski paket za računalniško podprti inženiring (CAE). Vsebuje grafični vmesnik, ki povezuje funkcije geometrijskega modelirnika z različnimi ANSYS produkti, s katerimi je omogočeno izvajanje različnih simulacij z uporabo metode končnih elementov (FEM).

Uporaba ANSYS simulacijske programske opreme nam omogoča napovedati, kako se bodo izdelki ali konstrukcijski sistemi obnašali v realnem okolju pod delovanjem številnih sil, ki vplivajo na celoten sistem. Računalniška orodja lahko pomagajo napovedati učinkovitost delovanja celotnega sistema, na tej podlagi pa se lahko izvede izboljšava posameznih elementov ali podsistemov, kakor tudi njihovih interakcij med seboj.

Z zagonom programa ANSYS Workbench se odpre glavno delovno okno programa. S pomočjo zavihka »Toolbox« izberemo željeno vrsto analize. Po korakih v oknu »Project Schematic« sestavimo in izvedemo računski primer. Shematski prikaz računskega primera nas preprosto vodi pri delu (slika 30). Z njegovo pomočjo nadzorujemo delo.



Slika 30: Shematski prikaz sestavnih elementov računske analize

Za analize je potrebno vnesti materialne karakteristike, ki so odvisne od vrste analize. Materialne karakteristike je možno shraniti v knjižnico materialov, ki jo lahko uporabimo tudi za naslednje projekte. Kasneje pripišemo materialne podatke vsem geometrijskim elementom konstrukcijskega sistema.

V program ANSYS smo iz programa CATIA uvozili celotno geometrijo konstrukcijskega sistema, ki predstavlja računsko območje za katerega rešujemo enačbe problema. Celotno računsko območje je potrebno aproksimirati z mrežo končnih elementov, ki je v geometrijskem smislu večje število geometrijskih teles in/ali likov, kot so prizma, piramida, tetraeder, štirikotnik in trikotnik. Vsak končni element je kontrolni volumen/površina, v katerem se izvednotijo primerne enačbe, dobljeni rezultati pa se združijo na nivoju mreže, z namenom, da se dobi rešitev za celotno računsko območje.

Pri tem je pomembno, da izračunana rešitev z zgoščevanjem mreže konvergira, se pravi da se z večanjem števila končnih elementov v mreži vse bolj bližamo točni rešitvi. Pri nelinearni analizi pa imamo še drugo vrsto konvergence, ki se nanaša na dejstvo, da pri določenem nivoju obtežbe računamo rezultat iteracijsko - ta konvergenca torej pomeni, da pridemo do rešitve s končnim številom iteracij.

Potrebno je določiti tudi robne pogoje. Ko so vsi potrebni podatki uspešno podani, kar je potrjeno s statusom zeleno obarvane kljukice (slika 30), izberemo željeno vrsto analize.

4.2 Nekaj podatkov o metodi končnih elementov

Reševanje inženirskih problemov za trdna telesa in tekočine temelji na reševanju diferencialnih enačb. Z diferencialnimi enačbami opisan problem ima za neznanke polja osnovnih spremenljivk, ki so lahko pomiki, sile, napetosti, deformacije, temperatura itd. Točno (t.i. analitično) rešitev za te spremenljivke je mogoče dobiti samo za enostavne probleme. Analitične rešitve niso na voljo za veliko večino problemov v vsakodnevni inženirski praksi. Za nekoliko zahtevnejše in zahtevne probleme je mogoče najte rešitve, ki le približno zadostijo diferencialnim enačbam po celotnem obravnavanem območju.

Približne rešitve se dobi z numeričnimi metodami, ki temeljijo na razdelitvi (mreženju, diskretizaciji) obravnavanega območja oziroma uvedbi končnega števila prostostnih stopenj (angl. Degrees of Freedom - DOF) po obravnavanem območju. Po diskretizaciji z ustreznimi matematičnimi postopki pretvorimo diferencialne enačbe v sistem linearnih ali nelinearnih algebraičnih enačb.

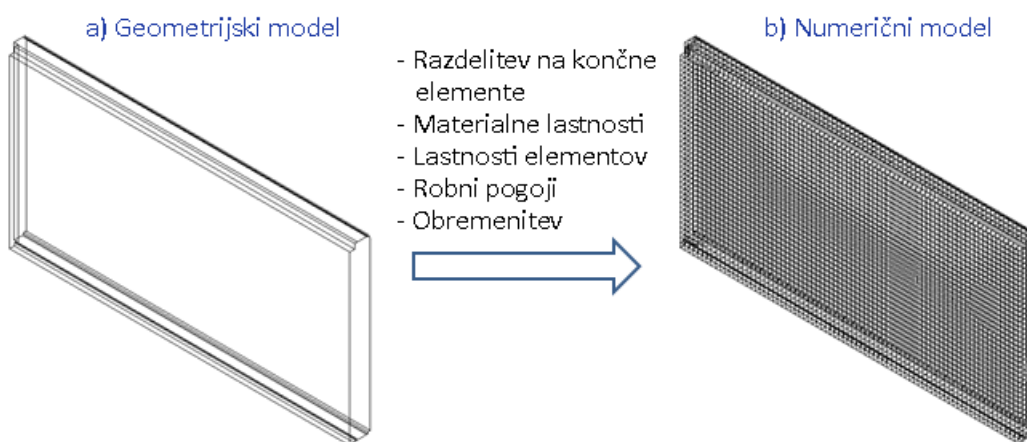
V diplomski nalogi je bila za analizo sistema panel-okno-panel uporabljena metoda končnih elementov, MKE (angl. Finite Element Method – FEM), ki je najbolj razširjena numerična metoda za reševanje problemov, ki se nanašajo na konstrukcije. Čeprav je bila metoda končnih elementov prvotno razvita za reševanje konstrukcijskih problemov v letalstvu in gradbeništvu, se danes uporablja v vseh tehničnih strokah, saj gre v osnovi za numerično reševanje diferencialnih enačb, ki opisujejo različne pojave v tehniki in naravoslovju.

V matematičnem smislu metoda končnih elementov vedno poda približno numerično rešitev obravnavanega problema. Včasih ni ravno lahka naloga za inženirja, da se odloči ali je rešitev zadosti dobra ali ne. Lažje je, če so na voljo eksperimentalne ali analitične rešitve za podobne enostavnejše primere, ki lahko pomagajo inženirju pri potrditvi pravilnost numeričnih rezultatov. Za dobro oceno dobljenih rezultatov je potrebno poznati ozadje metode končnih elementov ter imeti določeno znanje o uporabljenem programskem orodju. Le tako se lahko presodi primernost uporabljenih končnih elementov in algoritmov za obravnavani problem.

Izračunani rezultati so odvisni od uporabljene mreže končnih elementov in od pravilnega stikovanja različnih vrst končnih elementov. Po drugi strani pa se lahko napake pojavijo tudi zaradi uporabe neprimernih končnih elementov. ANSYS pri tem pomaga uporabniku z opozorili, s katerimi omogoča izboljšati model. Nekaj razlogov, ki lahko vodijo do slabih rezultatov analiz, je prikazanih v preglednici 9 (Nelson s sod., 2013).

Preglednica 9: Možni vzroki napak pri analizi po metodi končnih elementov

	Programska oprema po metodi končnih elementov	Inženir
Predprocesiranje	<ul style="list-style-type: none"> • neustrezna oblika elementov • neprimeren algoritem mreženja • opozorila glede mreže 	<ul style="list-style-type: none"> • napačna izbira končnih elementov • napačno stikovanje elementov • neustrezno idealiziranje obravnavanega problema
Reševanje enačb	<ul style="list-style-type: none"> • neustrezen algoritem izračuna • netočna iteracija • opozorila glede mreže 	<ul style="list-style-type: none"> • nepravilno izbrana vrsta analize • neustrezni robni pogoji • neustrezen kriterij konvergence
Postprocesiranje	<ul style="list-style-type: none"> • neustrezno povprečenje rezultatov • napačen prikaz rezultatov • opozorila glede mreže 	<ul style="list-style-type: none"> • napačen koordinatni sistem za čitanje rezultatov • neustrezna izbira komponent rezultatov • napačna interpretacija rezultatov



Slika 31: Priprava geometrijskega modela za numerično analizo po MKE

Mreža končnih elementov je medsebojno povezana v karakterističnih točkah, ki jih imenujemo vozlišča. V vozliščih je »doma« končno število neznanih parametrov, ki so vozliščne vrednosti osnovnih spremenljivk. Po končnih elementih, s pomočjo interpolacijskih funkcij, predpostavimo variacijo osnovnih spremenljivk v odvisnosti od njihovih vozliščnih vrednosti. Da se diskretizirani računski model pri določenih robnih in začetnih pogojih obnaša dovolj natančno, morajo interpolacijske funkcije zadovoljevati določene pogoje vzdolž robov elementov.

Čim podrobnejša je diskretizacija oziroma čim večje je število končnih elementov ali stopnja interpolacijskih funkcij, tem večja je natančnost numerične rešitve. Ustreznost tipa končnih elementov in ustreznost njihove porazdelitve po obravnavanem območju (mreža KE) lahko bistveno vplivata na

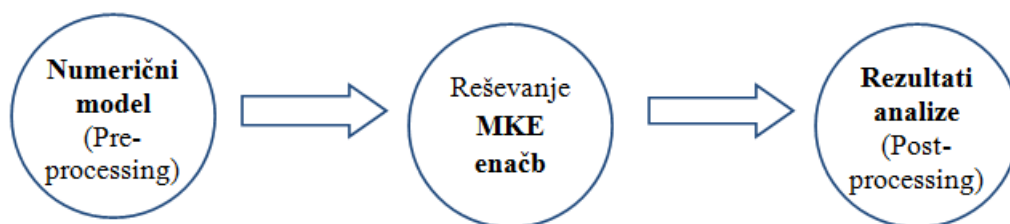
kvaliteto rezultatov. Kompleksnejše konstrukcije so diskretizirane z velikim številom končnih elementov. Torej imamo veliko število neznanih vozliščnih parametrov.

Veliko raziskovalnega dela je bilo opravljenega na področju numeričnega modeliranja v zadnjih tridesetih letih. To danes inženirjem omogoča izvedbo realističnih simulacij. Nelinearni problemi v gradbeništvu, ki na primer vsebujejo nelinearno obnašanje materiala, velike deformacije ali kontaktne probleme, so postali rešljivi. Zaradi hitrega razvoja na področju strojne opreme, z vse bolj zmogljivimi procesorji, je danes možno izvesti simulacije tudi za modele z več milijoni prostostnih stopenj.

Zaradi tega je bilo za analize inženirskih problemov po metodi končnih elementov izdelano veliko število namenskih računalniških programov. V praksi so pogosto uporabljeni programi kot so ABAQUS, MSC.NASTRAN in ANSYS. Metodo končnih elementov uporabljamo za reševanje statičnih in dinamičnih problemov pri konstrukcijah. Uporabljamo jo tudi za analizo toka tekočin, preračun temperaturnih polj itd (MKE Praktikum, 2013).

Postopek reševanja celotne konstrukcije po metodi končnih elementov razdelimo na naslednje faze:

- izdelava geometrije računskega modela,
- vnos materialnih karakteristik,
- vnos robnih pogojev vpetja in obremenitev,
- vnos fizikalnih lastnosti posameznih delov konstrukcije,
- diskretizacija (mreženje) konstrukcije s primernimi končnimi elementi,
- preverjanje ustreznosti numeričnega modela,
- numerični izračun po metodi končnih elementov in
- prikaz ter analiza dobljenih rezultatov.



Slika 32: Shema poteka numerične analize

Potek numerične analize je razdeljen na tri sklope, kar je razvidno iz slike 32. Vhodne podatke numeričnega modela pripravimo z ustreznimi programi, ki jih v splošnem imenujemo pred-procesorji. Z njimi ustvarimo vse potrebne podatke za preračun, kot so geometrija modela, materialne karakteristike, robne pogoje vpetja in obremenitve, mreža končnih elementov. S pomočjo teh vhodnih podatkov in izbrane vrste končnih elementov, program naredi sistem enačb za neznane vozliščne pomike, ki ga reši s pomočjo primernega numeričnega postopka. Ko so vozliščni pomiki znani, se iz njih izračuna deformacije in napetosti. S programi, ki jih imenujemo post-procesorji, pa rezultate analize nazorno grafično prikažemo v obliki barvnih polj, kot so na primer deformirana oblika modela ali izolinije napetosti in deformacij.

Za vsakega od omenjenih treh sklopov lahko načeloma uporabimo drug program. Pred- in post-procesiranje zahteva kvaliteten uporabniški vmesnik in zmogljivo obdelavo računalniške grafike. Običajno uporabljamo eno samo programsko orodje, ki omogoča izvedbo vseh treh sklopov.

Reševanje linearnih problemov v gradbeni mehaniki je postala standardna naloga, zato je takšno reševanje navadno izvršeno brez večjih težav. Natančnost rezultatov je pravzaprav odvisno le od kvalitete mreženja. Vsak linearen problem v gradbenem konstrukterstvu se po MKE prevede na reševanja matrične enačbe:

$$K \cdot u = F, \tag{1}$$

kjer je K togostna matrika, u označuje vektor neznanih vozliščnih pomikov, F pa označuje vektor znanih vozliščnih zunanjih sil (obtežbe).

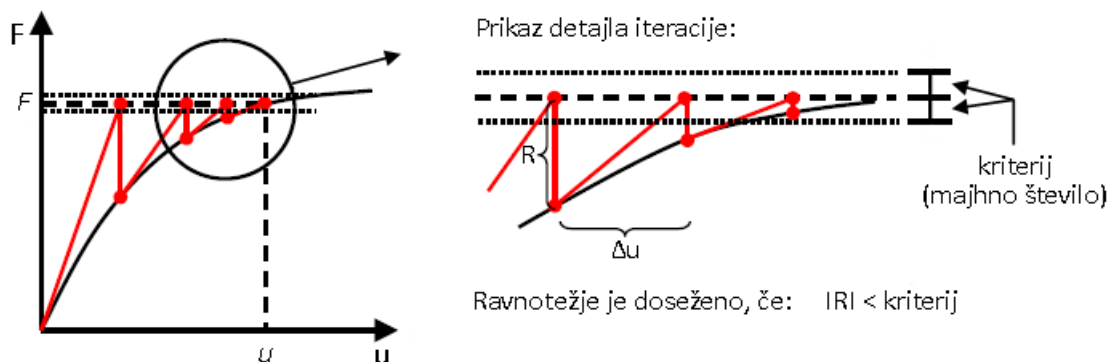
Nasprotno pa poteka reševanje nelinearnega inženirskega problema iterativno in je rešitev na voljo samo, če je po določenem številu iteracij dosežena konvergenca. Nelinearen problem v gradbenem konstrukterstvu se po MKE prevede na reševanje matrične enačbe, ki je izražena kot:

$$K(u) \cdot u = F, \tag{2}$$

kjer se zavedamo, da je togostna matrika odvisna od pomikov. Zaradi tega je potrebna shema iterativnega reševanja. V ANSYS-u je uporabljena Newton-Raphsonova metoda po kateri iterativno rešujemo nelinearni problem. Postopek iterativnega reševanja je razviden v naslednji enačbi ter je dodatno prikazan na sliki 33.

$$K^T(u) \cdot \Delta u = F - F^{NR}(u); \quad F - F^{NR}(u) = R(u) \tag{3}$$

V vsaki Newton-Raphsonovi iteraciji je sprememba togosti identificirana z nagibom krivulje na sliki 33. Torej govorimo o tangentni togosti K^T . F predstavlja znani fiksni vektor zunanje obtežbe, F^{NR} pa je trenutni vektor notranjih sil, ki je odvisen od trenutnih pomikov u , ki so vsota vseh že izračunanih Δu . V vsaki iteraciji se izračuna prirastek pomika Δu . Iteracije se ponavljajo, dokler se ne vzpostavi ravnotežje sil, oziroma vektor ostankov R ne postane sprejemljivo majhen. Drugače povedano, konstrukcija je v ravnotežju pri dani obtežbi F , če so ostanki (rezidualne sile) enaki nič. ANSYS tekom reševanja nelinearnega problema prikazuje kontrolo konvergence, kjer lahko opazujemo Newton-Raphsonove iteracije. Torej lahko uporabnik tekom procesa reševanja opazuje trend konvergence (Nelson s sod., 2013).



Slika 33: Shema Newton-Raphsonove iteracije

4.3 Različni končni elementi v ANSYSu

Naj povzamemo nekaj pomembnih dejstev, s katerimi naj bi bil seznanjen vsak, kdor dela predprocesiranje za analizo po metodi končnih elementov. Na začetku se je potrebno odločiti ali bomo vzeli obliko elementa z linearno ali kvadratno interpolacijo. Za lažjo predstavbo naj omenimo preprost primer, kjer imamo za prostostno stopnjo pomik. V ANSYS-u so taki elementi imenovani SOLID (delujoč v 3D), PLANE (delujoč v 2D) ali LINK (delujoč v 1D). Poglejmo si enodimenzionalni primer. Znotraj enega elementa se pomiki spreminjajo ali linearno ali kvadratično:

$$\begin{aligned} u(x) &= a_0 + a_1 \cdot x \\ u(x) &= a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Torej govorimo o linearnih ali kvadratičnih elementih. Kot posledica te predpostavke so napetosti in tudi deformacije porazdeljene znotraj elementa bodisi konstantno bodisi linearno, zaradi:

$$\varepsilon(x) = \frac{du}{dx} \quad \text{in} \quad \sigma(x) = E \cdot \varepsilon(x) \quad (5)$$

S pomočjo elastičnega modula E (Youngov modul), nanešene sile F in prečnega prereza $A(x)$, dobimo analitično rešitev:

$$u(x) = \frac{F}{E} \int_0^x \frac{1}{A(x)} dx \quad \text{in} \quad \sigma(x) = \frac{F}{A(x)}, \quad (6)$$

ki izhaja iz direktne integracije diferencialne enačbe zgoraj obravnavanega problema. Splošno je znano, da so boljši rezultati dobljeni, če pri enaki diskretizaciji uporabimo kvadratične elemente (ali elemente višjega reda), kot če uporabimo linearne elemente (ali elemente nižjega reda). Omeniti velja tudi, da je rešitev za pomike zvezna po vsej mreži, medtem ko so napetosti in deformacije zvezne samo v mejah posameznega elementa. To je narava rešitve po metodi končnih elementov. V ANSYS Workbench so elementi SOLID186/SOLID187, katerih značilnost je kvadratična interpolacija.

Poglejmo si še različne vrste elementov. Za modeliranje obnašanja konstrukcij, pri katerih sta dve dimenziji bistveno manjši v primerjavi s tretjo dimenzijo, se uporablja gredni element, tako imenovani »beam« element. V primerjavi s klasičnim »solid« elementom ima »beam« element za prostostne stopnje, poleg pomikov, tudi rotacije.

Lupinasti element se imenuje »shell« element. Je precej podoben »beam« elementu v smislu, da ima dve vrsti prostostnih stopenj, in sicer pomike ter rotacije. Lupinaste elemente se ponavadi uporabi pri modeliranju konstrukcij, ki so podvržene tako upogibni kot membranski obtežbi in pri kateri sta dve dimenziji bistveno večji v primerjavi s tretjo dimenzijo. Ko je tanka konstrukcija ponazorjena z lupinastimi elementi, se moramo zavedati, da s pomočjo lupinastih elementov pravzaprav opišemo obnašanje srednje ploskve konstrukcije (Nelson s sod., 2013).

Pri lupinastih elementih se uporabljata dve različni teoriji. Razlika med tipičnimi KIRCHOFF-ovimi lupinastimi elementi (SHELL63) in tipičnimi REISSNER-MINDLIN-ovimi lupinastimi elementi (SHELL181) je ta, da pri prvih niso upoštevane prečne strižne deformacije. Se pravi, da je učinek deformacij prenizko vrednoten, posebej pri debelejših lupinastih konstrukcijah. Po drugi strani pa je pri lupinastih elementih, osnovanih po Reissner-Mindlinovi teoriji, treba upoštevati, da imajo ti

elementi tipično mehkejše obnašanje zaradi upoštevanja prečnih sil. Enako, kot pri »beam« elementih, se lahko zanemari vpliv prečnih deformacij, ko se predpostavi, da je lupinasta konstrukcija vitka. Se pravi, ko je razmerje debeline lupinastih elementov proti dvema značilnima dolžinama - d/l_1 in d/l_2 manjše od $1/10$. Za obe teoriji pa je značilno linearno spreminjanje upogibnih napetosti po debelini.

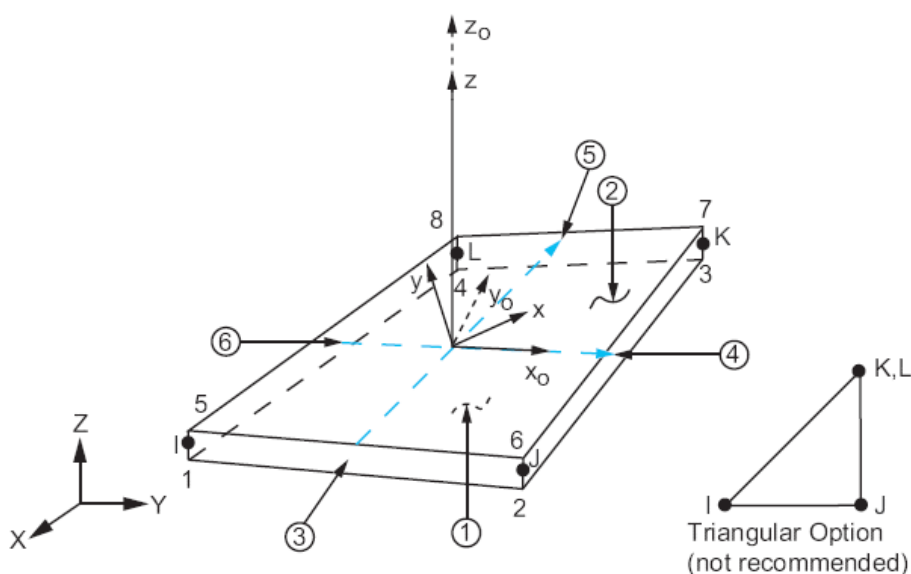
4.4 Izbrani končni elementi za sistem panel-okno-panel

Ko smo uspešno uvozili geometrijo iz programa CATIA in določili simetrijo sistema panel-okno-panel, smo prešli na diskretizacijo modela s končnimi elementi. Za različne prostostne stopnje, dodajanje lastnosti in natančnost diskretizacije poskrbi programsko orodje samo, le izbrati je potrebno najustreznejše elemente in dodati njihove materialne lastnosti.

4.4.1 SHELL181

V programu ANSYS je za tanke ploskovne konstrukcijske elemente (»3D Shell element«) na voljo element pod imenom »SHELL181«, ki je prikazan na sliki 34. SHELL181 je osnovan na REISSNER-MINDLIN-ovi teoriji. Ti elementi so bili uporabljeni pri našem modelu. »Shell« element je dejansko 2D element, ki je imenovan 3D, zato ker ni omejen na XY ravnino kot je »2D solid element«. Lahko je umeščen kamorkoli v tri-dimenzionalnem prostoru.

»SHELL181« je bil uporabljen za diskretiziranje ploskev, ki predstavljajo pločevino fasadnega panela, steklene površine (dvojna zasteklitev), notranje in zunanje letvice za steklo ter aluminijasti okenski okvir. »SHELL181« je primeren za analize tankih do zmerno debelih lupinastih konstrukcij. Je štiri-vozliščni element s šestimi prostostnimi stopnjami v vsakem vozlišču: pomiki v X, Y, in Z smeri ter zasuki okoli X, Y in Z osi. Če se uporabi membranske elemente, imajo ti samo pomike. »SHELL181« je združljiv z linearno elastičnimi, elastoplastičnimi in hiperelastičnimi materialnimi lastnostmi. Primeren je za linearno analizo ter za nelinearno, pri kateri se pojavijo velike rotacije in/ali velike deformacije.



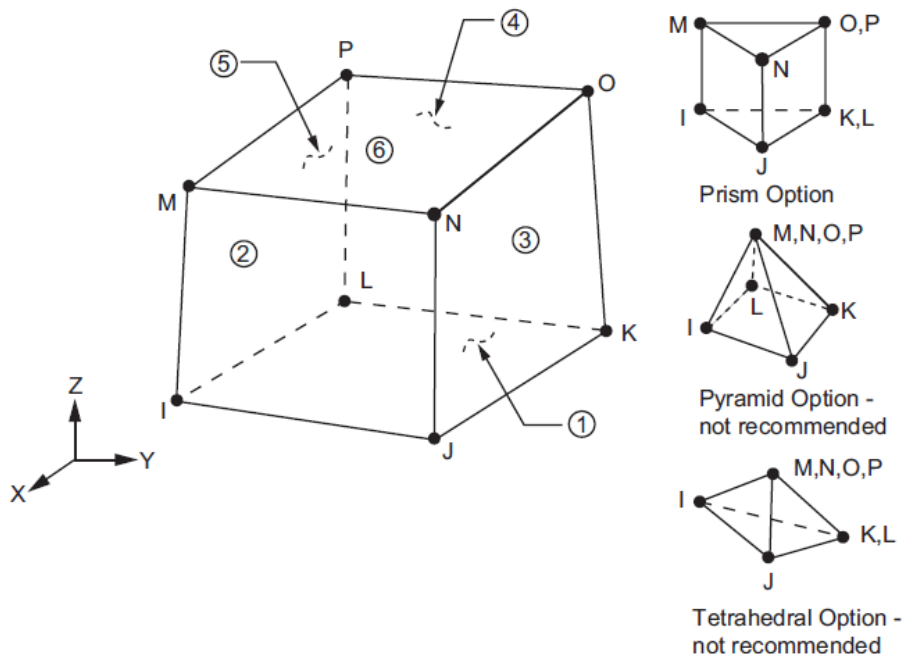
Slika 34: Končni element »SHELL181«

Na sliki 34 so prikazani geometrija elementa, lokacija vozlišč in koordinatni sistemi. Definiran je s štirimi vozlišči I, J, K in L ter prerezom lupine. »SHELL181« izračuna učinke porazdeljenih pritiskov. Omenjeni element se sme uporabiti za modeliranje kompozitnih lupin. Natančnost modeliranja kompozitnih lupin je osnovana na podlagi teorije prvega reda strižnih deformacij (običajno imenovana Mindlin-Reissnerjeva teorija lupin).

Pri podajanju lastnosti elementa so na voljo možnosti določanja debeline, materiala, orientacije in števila integracijskih točk (1, 3, 5, 7 ali 9) po debelini. Če je določena samo ena integracijska točka, se ta vedno nahaja na sredini med zgornjo in spodnjo površino. Element podpira tudi degeneracijo oziroma poenostavitev končnega elementa v trikotno obliko z združitvijo točk K in L. Uporaba takih elementov ni priporočljiva, razen v primeru zapolnitve mreže. Trikotnikom se moramo izogibati predvsem na mestih, kjer so pričakovane visoke vrednosti napetosti (Končni elementi, 2013).

4.4.2 SOLID185

Za štiri različna telesa (vijaki, distančnik, volna in tesnilo) je bil izbran element pod imenom »SOLID185«, ki se uporablja za 3-D modeliranje trdnih teles in je novejša različica elementa »SOLID45«. Ta tip elementov ima popolno definirano geometrijo z osmimi vozlišči (slika 35). Vsako vozlišče ima tri prostostne stopnje: pomik vozlišča v X, Y in Z smeri. Elementu se lahko poda lastnosti plastičnosti in hiperelastičnosti. »SOLID185« ima tudi zmožnost velikih pomikov in velikih deformacij. Poleg tega omogoča tudi opis deformiranja skoraj nestisljivega elastoplastičnega in nestisljivega hiperelastičnega materiala (Končni elementi, 2013).



Slika 35: Končni element »SOLID185«

Omenjeni element je na voljo v dveh oblikah: homogeni in večplastni. Homogeni osem-vozliščni »SOLID185«, ki je uporabljen v našem primeru, ima lahko obliko prizme, degeneriranega tetraedra in piramide. Zadnji dve obliki nista priporočljivi.

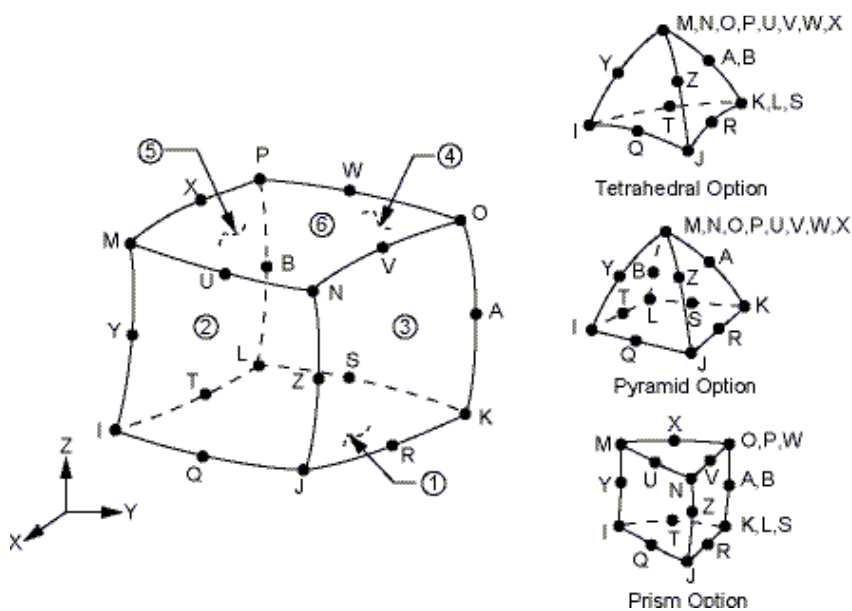
4.4.3 SOLID186 in SOLID187

Pri analizi zaradi spremembe temperature in nelinearni analizi (obremenitev vetra), sta bila uporabljena tudi dva tipa končnih elementov, ki imata oznako »SOLID186« in »SOLID187«.

»SOLID186« je dvajset-voziščni element za trdna telesa s kvadratično interpolacijo pomikov. V vsakem vozišču ima tri prostostne stopnje: pomike v x , y in z smeri. Omogoča materialne modele, kot so elastoplastičnost, hiperelastičnost, lezenje, ter velike pomike in deformacije. Prav tako ima mešano formulacijo za skoraj nestisljive elastoplastične materiale ter nestisljive hiperelastične materiale. Na voljo je v dveh oblikah: homogeni in večplastni. V našem primeru je uporabljena homogena oblika. Element nižjega reda od predhodnega, je element »SOLID185«.

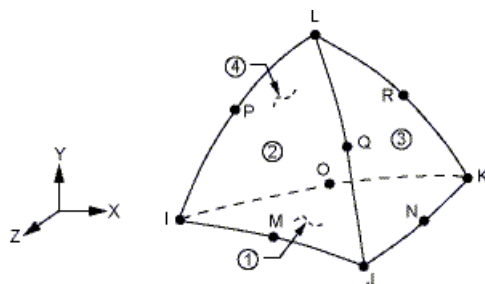
Temperatura je lahko vnešena kot obtežba v vozišča končnega elementa. Temperatura v vozišču $T(I)$ je podana v TUNIF (konstantna temperatura). Če so vse ostale temperature nespecificirane, so enake $T(I)$. V primeru, ko je v vseh vogalnih voziščih temperatura določena, je v vsakem vmesnem vozišču privzeta povprečna temperatura njegovih pripadajočih sosednjih vogalnih vozišč. Predpostavke in omejitve v elementu »SOLID186« so, da mora imeti volumen; tudi se ne sme popačiti tako, da bi imel dva ločena volumna, kar se zgodi ob nepravilnem številčenju vozišč elementa. Element mora biti na obeh straneh oštevilčen tako kot prikazuje slika 36 (ploskvi IJKL in MNOP sta lahko zamenjani). Če so na robovih odstranjena vmesna vozišča, se pomik spreminja linearno (Končni elementi, 2013).

Na sliki 36 so prikazane tudi oblike v katere se element lahko preoblikuje: tetraeder, piramida in prizma. Ko se element degenerira v tetraeder, klin ali piramido, se uporabi ustrezno funkcijo za preoblikovanje oblike. Piramido je potrebno uporabiti s previdnostjo.



Slika 36: Končni element »SOLID186« (Ansys)

»SOLID187« je zelo podoben elementu »SOLID186«, le da je deset-voziščni tetraeder (Končni elementi, 2013). Ima enake karakteristike, ki so že predhodno opisane.



Slika 37: Končni element »SOLID187« (Ansys)

4.4.4 Metode mreženja

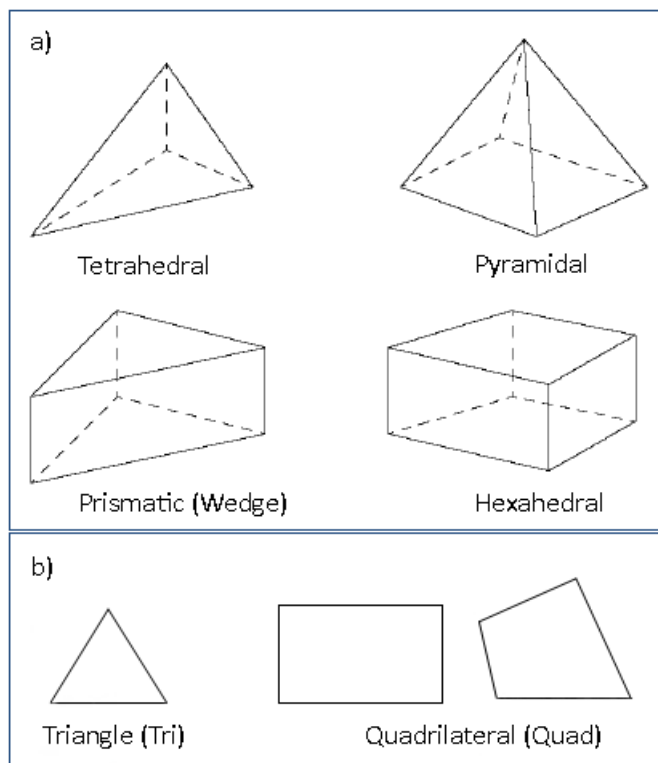
Metodo mreženja v programu ANSYS izberemo s funkcijo »Mesh Control → Method«, ki se nahaja v orodni vrstici. Za mreženje 2D geometrij so na voljo štiri različne metode:

- Automatic Method-Quad Dominant,
- Triangles,
- Uniform Quad,
- Uniform Quad/Tri.

Za mreženje 3D geometrij pa je na voljo pet različnih metod:

- Automatic,
- Tetrahedrons,
- Sweep,
- MultiZone,
- Hex Dominant.

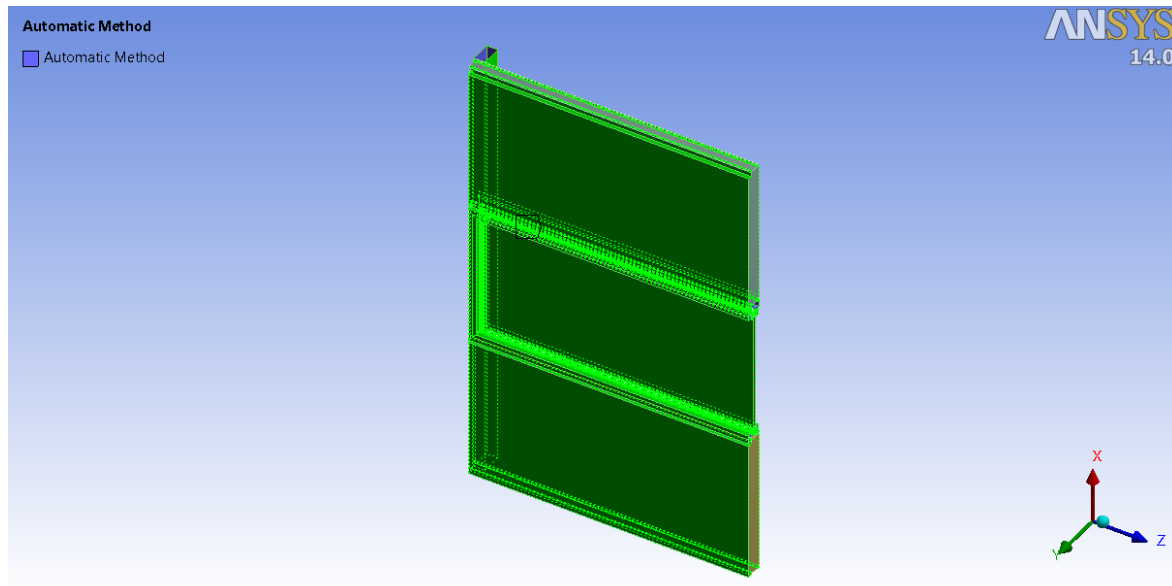
Oblike končnih elementov, ki so bile formirane pri mreženju 2D ali 3D geometrije oziroma celotnega sistema panel-okno-panel, so prikazane na sliki 38. Ustrezno mrežo končnih elementov lahko izrišemo avtomatsko s funkcijo »Generate Mesh«.



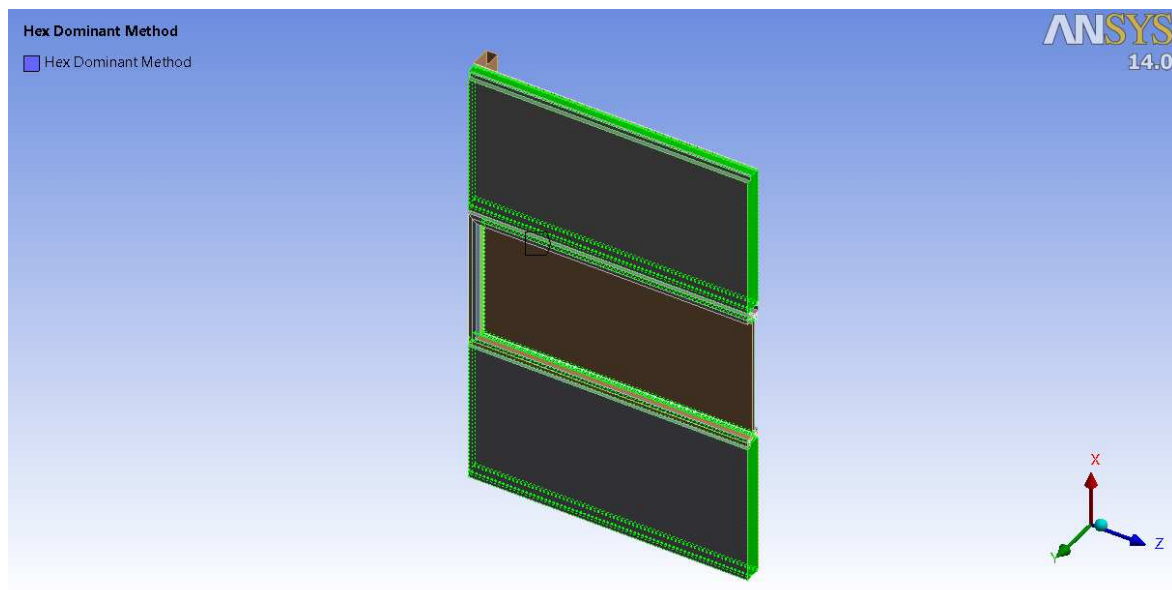
Slika 38: Možne oblike končnih elementov: a) 3D oblike in b) 2D oblike

Za diskretizacijo celotnega modela je bila uporabljena privzeta metoda »Automatic Method« z uporabo metode štiristranih oblik končnih elementov (»Quadrilateral«). Tu lahko pod lastnosti mreže »Free Face Mesh Type« izberemo možnost »All Quad« ali »Quad/Tri«. Ker je bila izbrana slednja možnost, se je pri prvem mreženju v treh telesih, in sicer v zgornji in spodnji mineralni volni ter distančniku, ustvarila mreža s končnimi elementi poljubne trikotne oblike.

Za kvalitetnejšo mrežo v mineralni volni in distančniku se je nato uporabila metoda »Hex Dominant Method«. Ta ustvari mrežo s heksaedri. Na sliki 39 in sliki 40 sta prikazani obe uporabljeni metodi določitve mreže končnih elementov. Za posamezno metodo so razvidni tudi izbrani sestavni deli sistema panel-okno-panel.



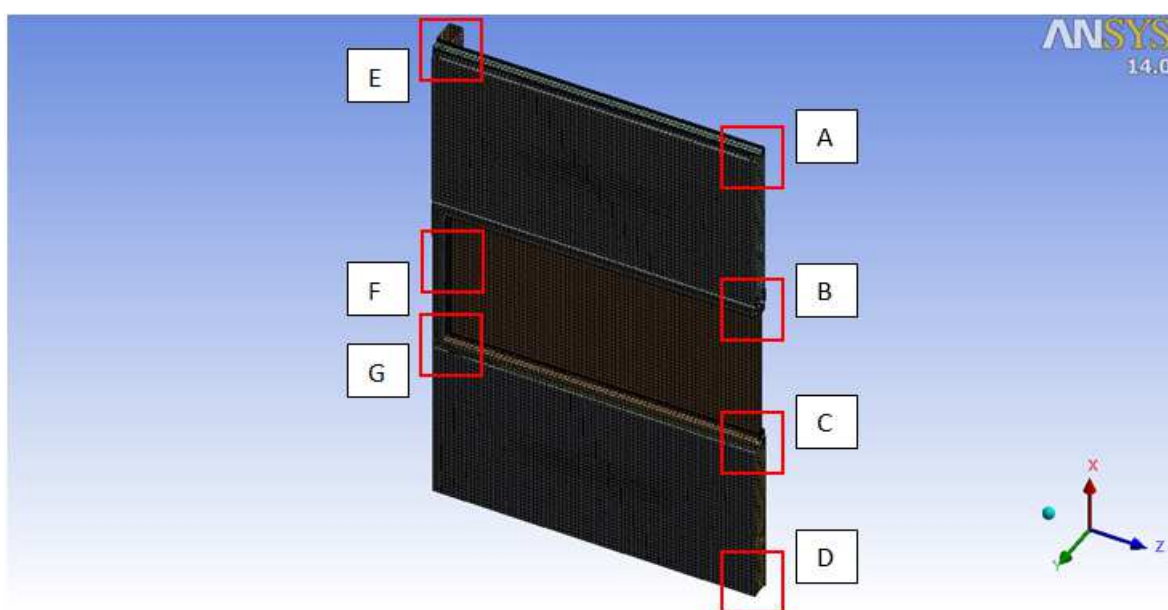
Slika 39: Privzeta metoda določitve mreže končnih elementov: Automatic Method



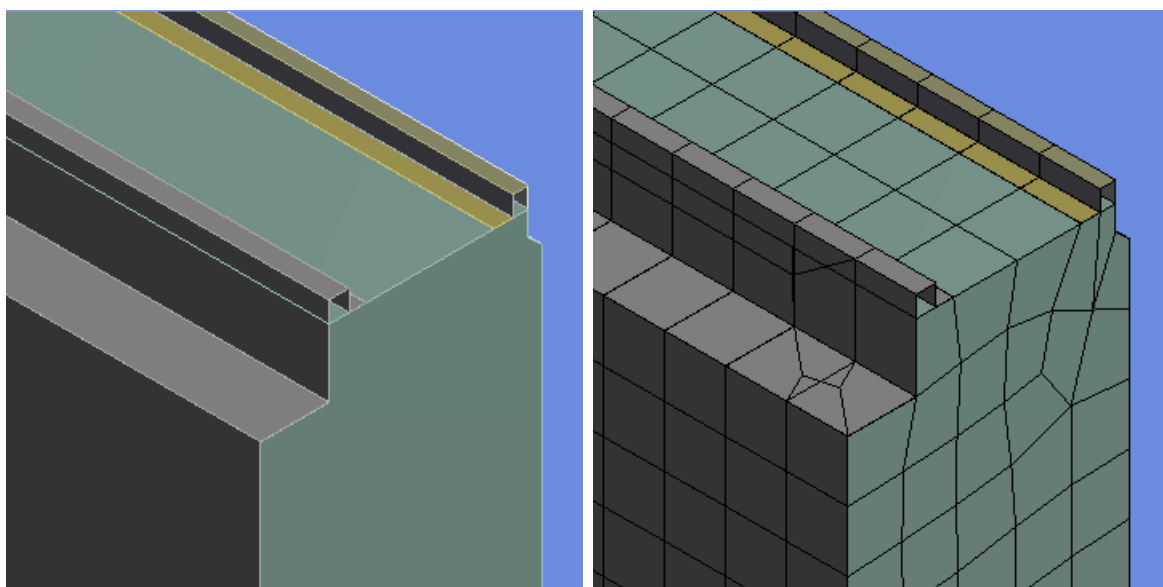
Slika 40: Dodatno izvedena metoda določitve mreže končnih elementov: Hex Dominant Method

4.5 Mreža končnih elementov za sistem panel-okno-panel

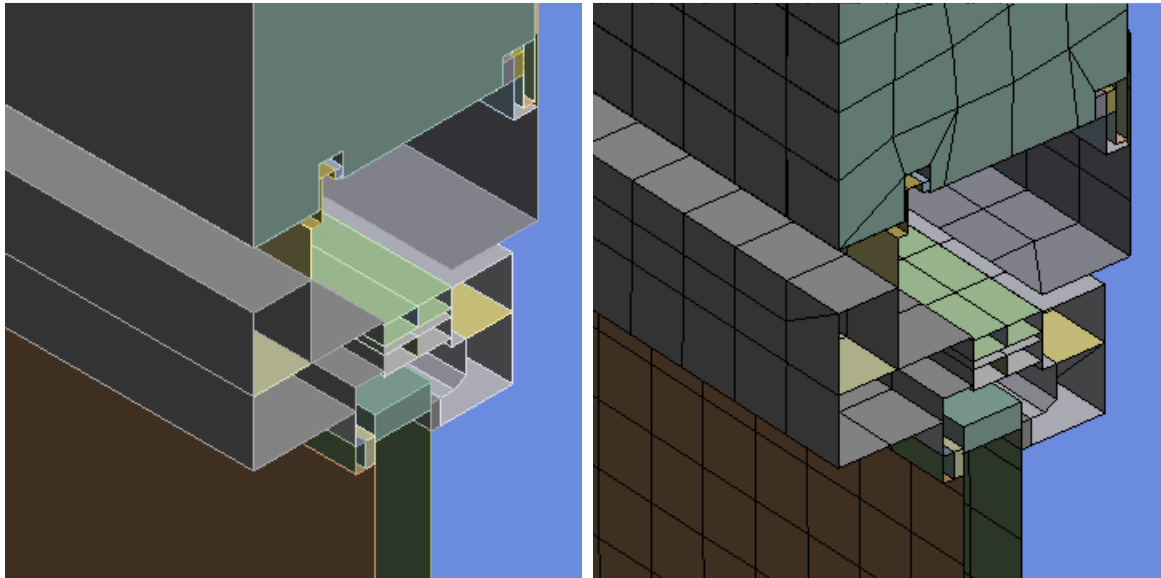
Program je zgeneriral 69622 predvsem štiri in osem vozliščnih končnih elementov, kar znaša skupaj 80555 vozlišč. Na sliki 41 je prikazana celotna mreža končnih elementov, ki jo je program izračunal na podlagi algoritma. Označena so tudi območja, katera so podrobno prikazana v nadaljevanju. Območje A prikazuje mrežo končnih elementov v skrajnem zgornjem robu fasadnega panela, kjer je viden stik pločevine in mineralne volne. V območju B in C je ponazorjeno stikovanje mreže končnih elementov zgornjega in spodnjega fasadnega panela z aluminijskim okenskim okvirjem. Območje D prikazuje mrežo v skrajnem spodnjem robu fasadnega panela, kjer je prav tako razviden stik pločevine in mineralne volne. Na mestu vpetja pa so prikazana območja E, F in G. Tu je ponazorjena mreža na stiku fasadnega panela in okenskega okvirja z vertikalnim nosilnim elementom.



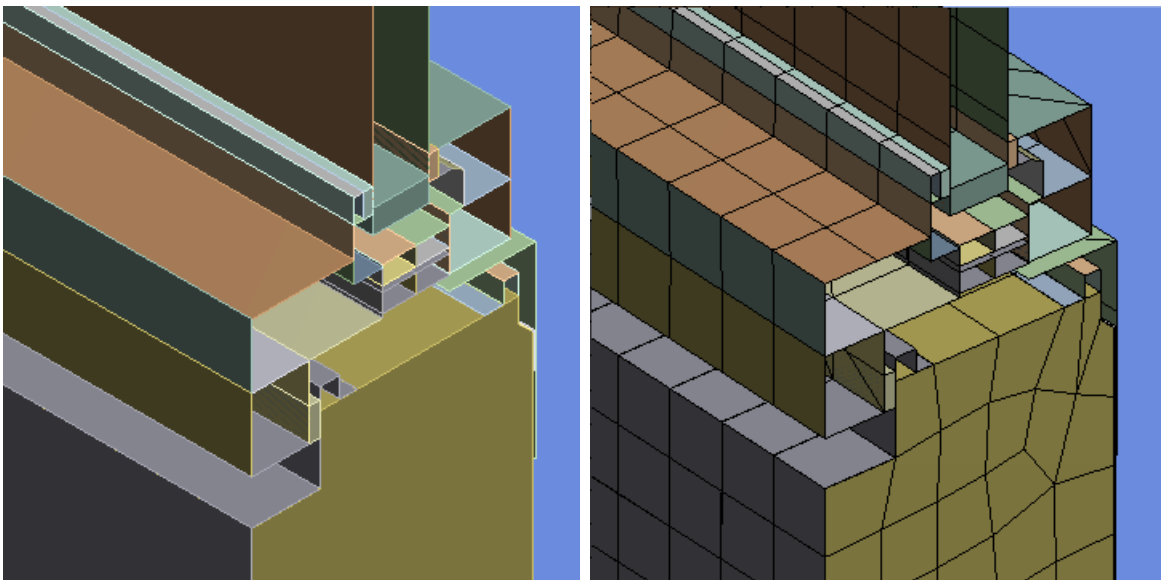
Slika 41: Prikaz celotne mreže končnih elementov sistema panel-okno-panel



Slika 42: Geometrija in mreža KE v območju A - zgornji rob fasadnega panela

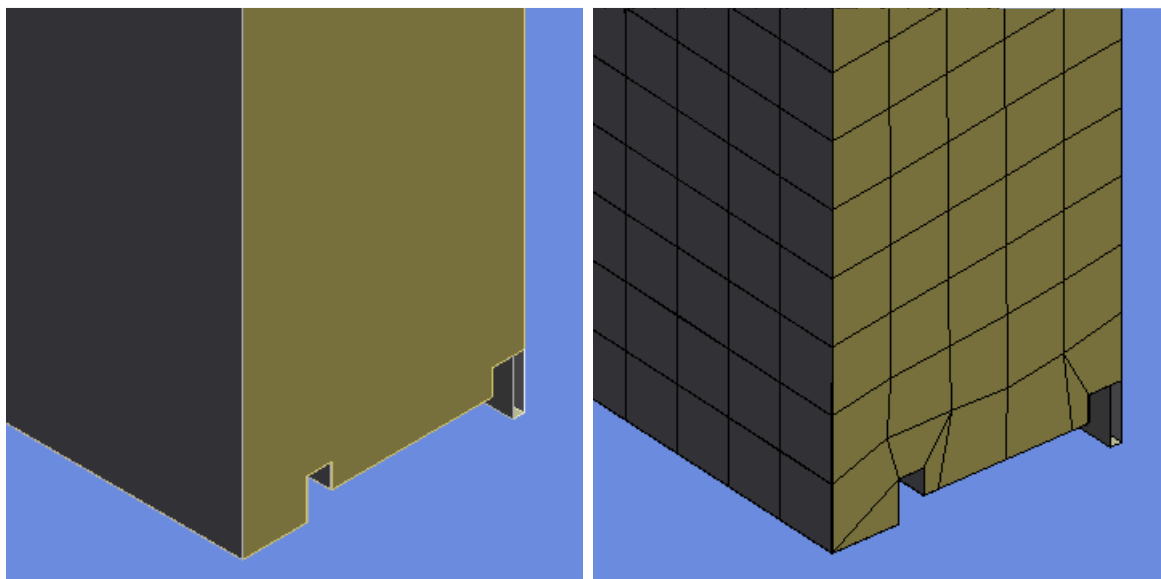


Slika 43: Geometrija in mreža KE v območju B - zgornji stik fasadnega panela in okenskega okvirja

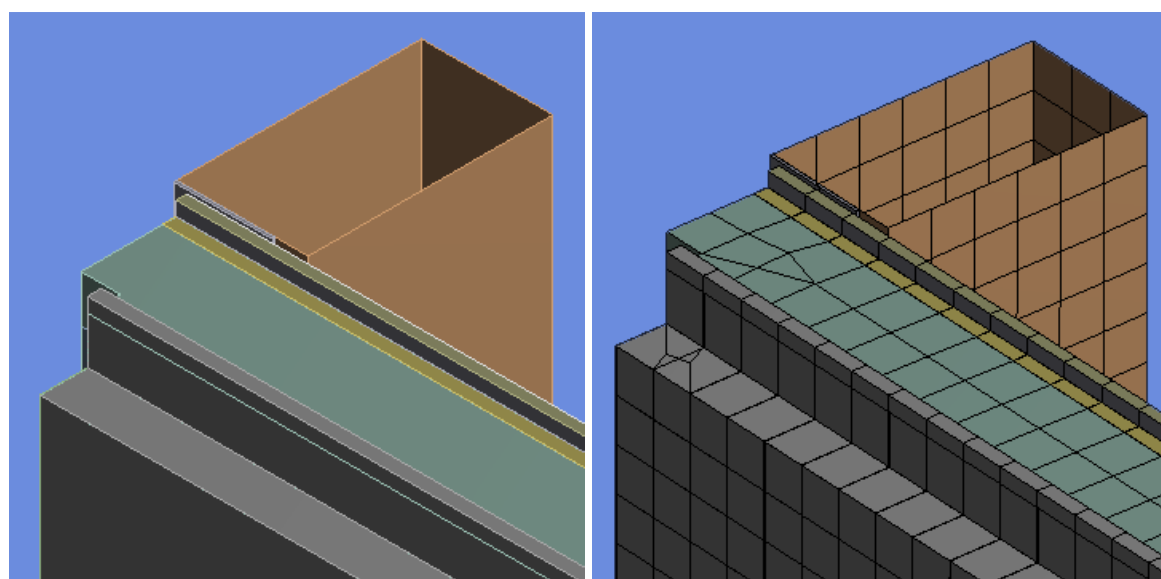


Slika 44: Geometrija in mreža KE v območju C - spodnji stik fasadnega panela in okenskega okvirja

Na območju B in C sta prikazani dve vrsti končnih elementov in sicer »shell« in »solid«. Za »shell« končne elemente je značilno, da se jih uporabi pri konstrukcijskih elementih, pri katerih je ena dimenzija v primerjavi z drugima dvema bistveno manjša. Iz zgornjih slik je razvidno, da so »shell« elementi uporabljeni za modeliranje ploskev, ki predstavljajo pločevino fasadnega panela, steklene površine (dvojna zasteklitev), notranje in zunanje letvice za steklo ter aluminijasti okenski okvir. V primeru modeliranja s »solid« elementi, imamo po debelini konstrukcijskih elementov večje število končnih elementov. To je nazorno prikazano na območjih A, B, C in D, kjer je po debelini mineralne volne uporabljeno različno število končnih elementov zaradi nestrukturirane mreže. Poleg mineralne volne so s »solid« elementi modelirana tudi vsa tesnila in distančnik. Po debelini tesnil in distančnika je uporabljen en »solid« končni element.



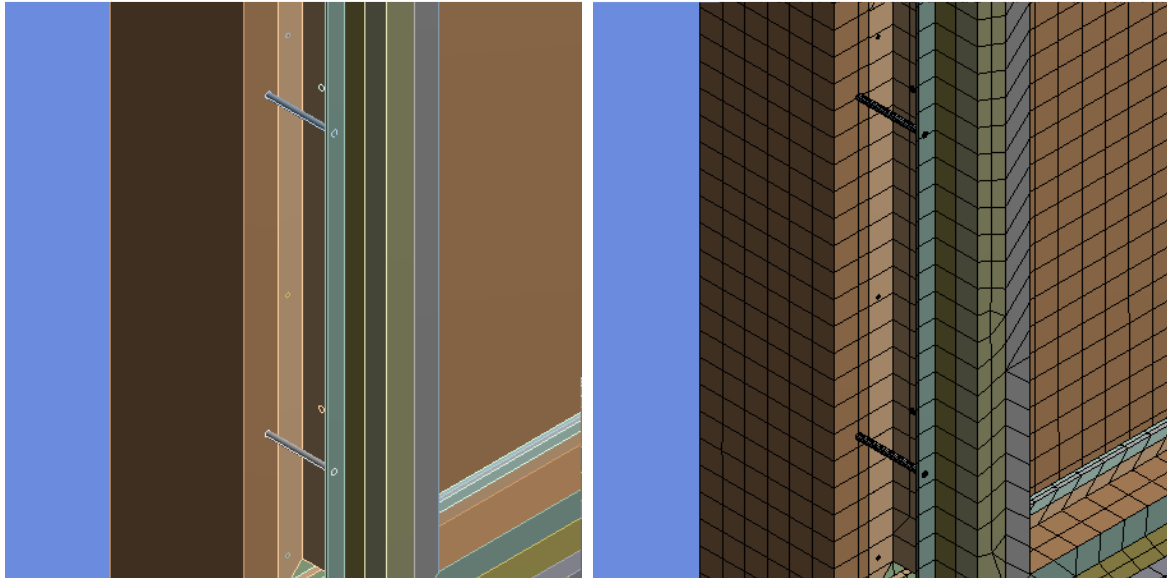
Slika 45: Geometrija in mreža KE v območju D – spodnji rob fasadnega panela



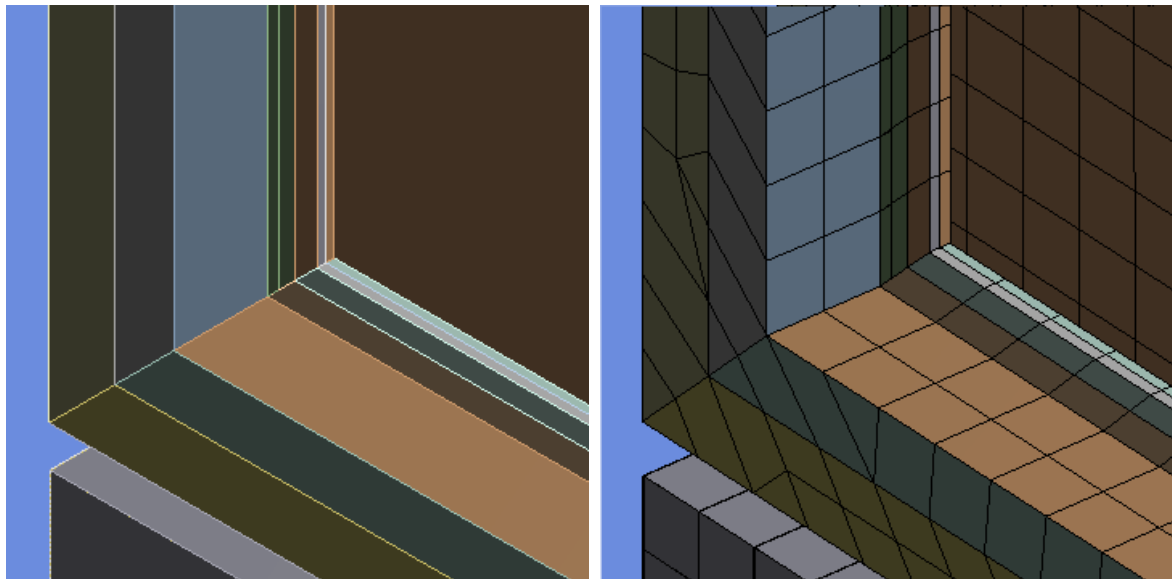
Slika 46: Geometrija in mreža KE v območju E - stik panela z vertikalnim nosilnim elementom

Vertikalni nosilni element, ki v X smeri meri 3050 mm, v Y smeri 150 mm ter v Z smeri 80 mm, je diskretiziran na 2124 končnih elementov. Spodnja plošča mineralne volne je razdeljena na 16987 končnih elementov, medtem ko je zgornja plošča sestavljena iz 17197 končnih elementov. Spodnja zunanja pločevina ima 3821 končnih elementov, zgornja pločevina pa ima 3874 končnih elementov, medtem ko notranja pločevina vsebuje 3744 končnih elementov. Ena steklena šipa je diskretizirana na 2442 končnih elementov, vmesni distančnik na 305 in celotni aluminijasti okenski okvir na 6128 končnih elementov. Plastika (2538 KE), tesnila (1150 KE) in vijaki (2020 KE) prispevajo skupaj 5708 končnih elementov. Ostane še nosilec okenske odprtine, ki pa je razdeljen na 1106 končnih elementov. Skupaj torej 69622 končnih elementov.

Na sliki 47 je prikazana geometrija in ustvarjena mreža na stiku okenskega okvirja z vertikalnim nosilnim elementom, kjer se vidi tudi del vijachenja, s pomočjo katerega je izvedeno pritrjevanje slednjih dveh elementov preko nosilca okenske odprtine. Na vertikalnem nosilnem elementu je lepo razvidna generirana strukturirana mreža, ki predstavlja KE pod imenom QUAD4.



Slika 47: Geometrija in mreža KE v območju F - stikovanje okenskega okvirja na nosilni element



Slika 48: Geometrija in mreža KE v območju G - okenski okvir, tesnilo in steklo

Program ANSYS je glede na geometrijo sistema panel-okno-panel sam določil privzeto največjo (25,960 mm) in najmanjšo (2 mm) vrednost končnega elementa, metode računanja mreže in tolerance. Program dopušča spreminjanje teh količin oziroma nastavitev s strani uporabnika, ki lahko po želji določa obliko in gostoto mreže po celotnem območju. Če je potrebno za boljše rezultate ustvariti boljše oziroma bolj gosto mrežo končnih elementov na določenih ploskvah, lahko to dosežemo na različne načine.

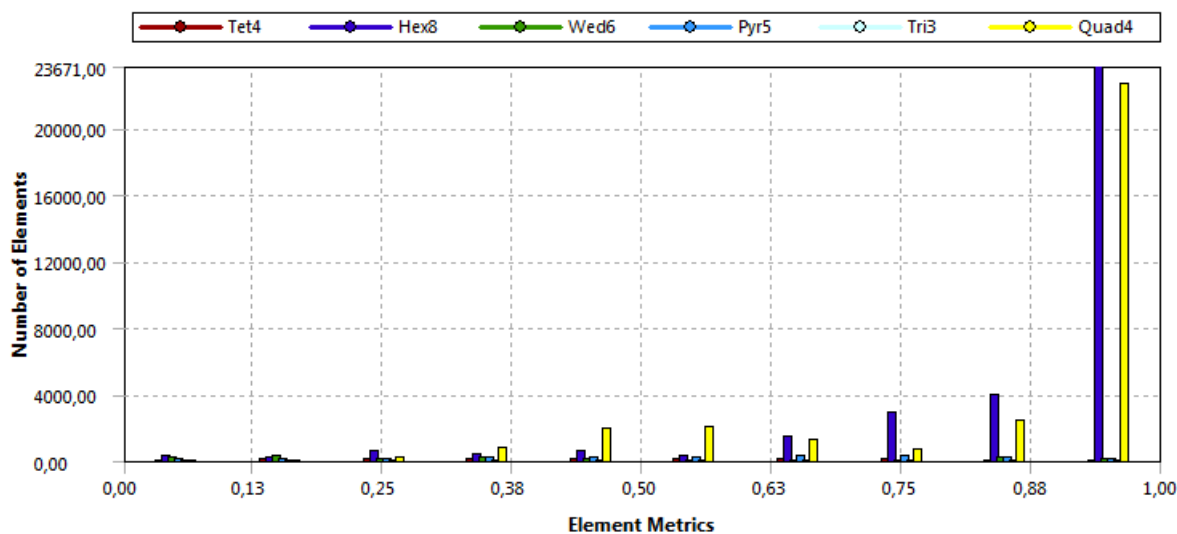
Ena od možnosti, ki jo program ponuja, je zgostitev mreže z določitvijo vrednosti »Max face size«. V kolikor bi bilo potrebno, bi lahko prav tako izbrali tudi tip končnih elementov, vendar je v našem primeru mreža zadovoljiva, saj jo sestavljajo predvsem štiri QUAD4 in osem vozliščni HEX8 končni elementi.

4.6 Ocena primernosti in kvalitete ustvarjene mreže

Ko imamo zgenerirano mrežo končnih elementov, je potrebno izvesti kontrolo njene kvalitete. Pri veliki količini ustvarjenih končnih elementov, je priporočljiva kontrola s pomočjo samega programa ANSYS, saj bi bila revizija s strani uporabnika zelo dolgotrajno delo. Program nam pod podrobnosti mreže t.j. »Details of mesh« podaja osnovne informacije o mreži. V zavihku »Mesh Metric« pa omogoča vpogled v merske informacije mreže in na ta način preračuna ter določi njeno kvaliteto v obliki histogramov. Na voljo imamo osem različnih kriterijev, kot so: kvaliteta elementov, razmerje stranic trikotnikov ali četverokotnikov, razmerje Jakobijana, oblikovni faktor, odklon paralelnosti, maksimalni kot v vogalu, poševnost oziroma nesimetričnost ter kvaliteta pravokotnosti. Ko imamo izbrano katerokoli od teh možnosti, se nam pod podrobnostmi mreže prikažejo minimalna, maksimalna in povprečna vrednost ter standardni odklon mreže, hkrati pa se pod oknom geometrije prikaže stolpčni grafikon, ki nam omogoča oceno ustvarjene mreže končnih elementov. V grafikonu je vsaka oblika končnega elementa, ki je zastopana v mreži sistema panel-okno-panel, predstavljena s svojim barvnim stolpcem. Slednjemu pripada določena ocena kvalitete in število ustvarjenih KE.

4.6.1 Kvaliteta končnih elementov

Na sliki 49 je grafično predstavljena ocena kvalitete oziroma primernosti mreže končnih elementov (»Element Quality«). Kvaliteta končnih elementov je na abscisi prikazana od minimalne do maksimalne vrednosti, preko celotne mreže, in je zastopana na X-osi. Na ordinati je število elementov znotraj posameznega intervala kvalitete (privzeto) ali delež celotne prostornine zastopanih elementov znotraj posameznega intervala kvalitete. Vedeti moramo, da ima lahko model veliko število slabo oblikovanih elementov, ki so omejeni na majhen volumen/površino. Celoten volumen teh elementov je lahko zanemarljiv v primerjavi z volumnom celotnega modela. Izkaže se, da je stolpič z nizkim faktorjem kvalitete lahko zanemarljiv.



Slika 49: Ocena kvalitete elementov celotnega modela

Iz legende na sliki 49 je razvidno, da je bilo ustvarjenih šest različnih oblik elementov (oblike so prikazane v poglavju 4.4.4, slika 38). Vidimo lahko tudi, da je bilo največ heksaedrov, ki imajo osem vozlišč ter 2D končnih elementov s štirimi vozlišči. Največ končnih elementov pripada najboljše kvaliteta. Maksimalna vrednost kvalitete ustvarjenih končnih elementov, ki jo poda program, znaša 1,000, medtem ko je minimalna vrednost 0,002. Povprečna vrednost kvalitete elementov v mreži pa znaša 0,869.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	80555
<input type="checkbox"/> Elements	69622
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	2,1932131520684E-03
<input type="checkbox"/> Max	0,999992662931094
<input type="checkbox"/> Average	0,869299086399281
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,215950288646422

Slika 50: Prikaz vrednosti za oceno kvalitete mreže v »Details of mesh« za celotno mrežo sistema

Faktor kvalitete elementa se izračuna za vsak končni element posebej. Kvaliteta elementov je prikazana številčno med 0 in 1. Ta izračun temelji na razmerju med prostornino elementa ter dolžino stranice. Vrednost 1 pomeni popolno kocko ali kvadrat medtem ko vrednost 0 pomeni, da ima element prostornino blizu nič.

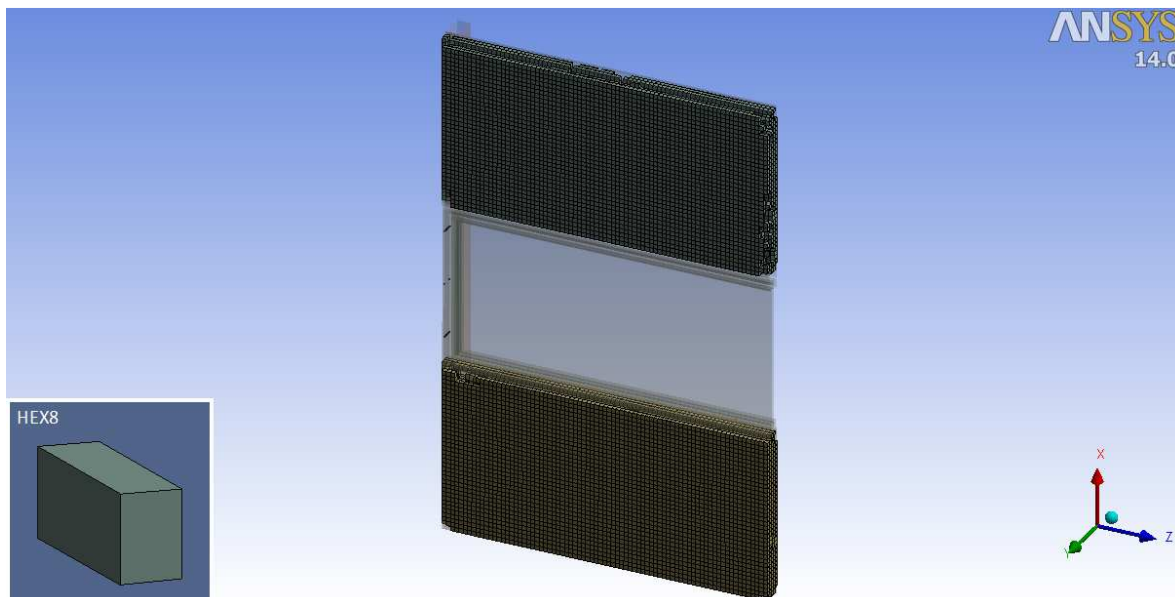
V preglednici 10 je prikazano število ustvarjenih končnih elementov, katerih skupno število znaša 62937, za interval [0,5 - 1,0]. Razberemo lahko, da sta pri vseh stopnjah kvalitete v največji meri zastopana HEX8 in QUAD4. Slednjima pripada tudi največje število ustvarjenih končnih elementov s kvaliteto 0,95. Pri tej kvaliteti ni bilo ustvarjenih nič končnih elementov TET4.

Preglednica 10: Število ustvarjenih KE glede na pripadajočo kvaliteto elementov

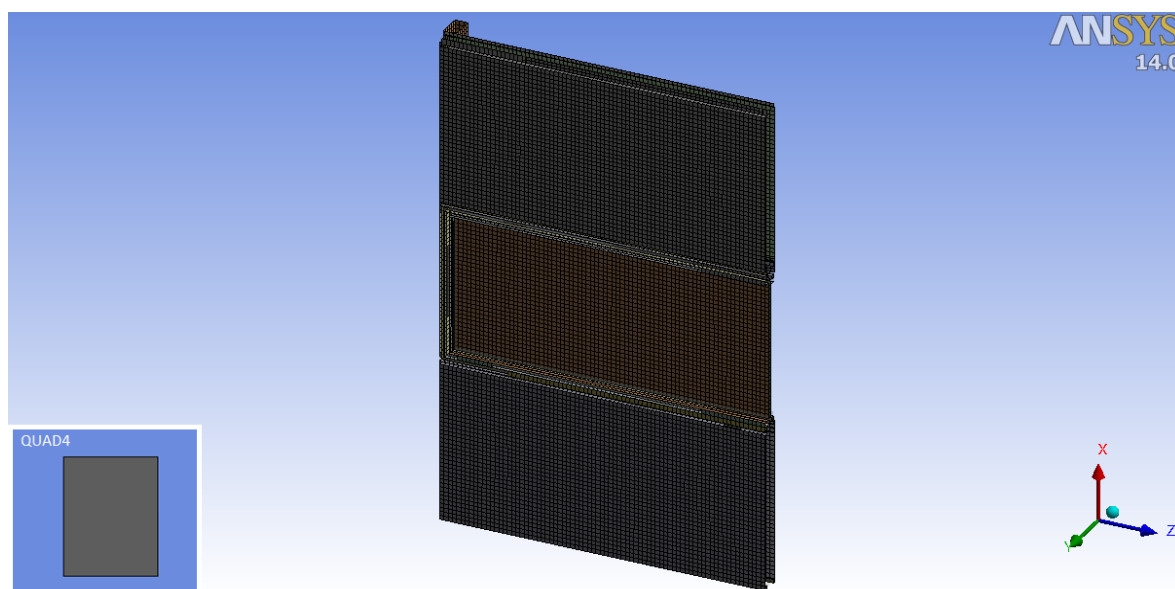
Kvaliteta KE Oblika KE	Število ustvarjenih končnih elementov				
	0,95	0,851	0,751	0,651	0,551
HEX8	23671	3930	2860	1410	295
QUAD4	22600	2440	695	1220	2030
WED6	102	197	34	20	33
PYR5	94	215	278	247	187
TRI3	32	42	13	7	9
TET4	0	21	75	122	58
Σ	46499	6845	3955	3026	2612

V nadaljevanju so slikovno prikazane (slika 51 do slika 54) vse oblike končnih elementov s pripadajočo kvaliteto 0,95, ki so zastopane v sistemu panel-okno-panel.

Iz slik je tudi razvidno, da deli geometrije, kjer ni prisotnih končnih elementov s pripadajočo kvaliteto, postanejo transparentni. Prav tako so na vsaki sliki (levo spodaj) ponazorjene tudi oblike končnih elementov, ki so ustvarjene v določenih segmentih modela.

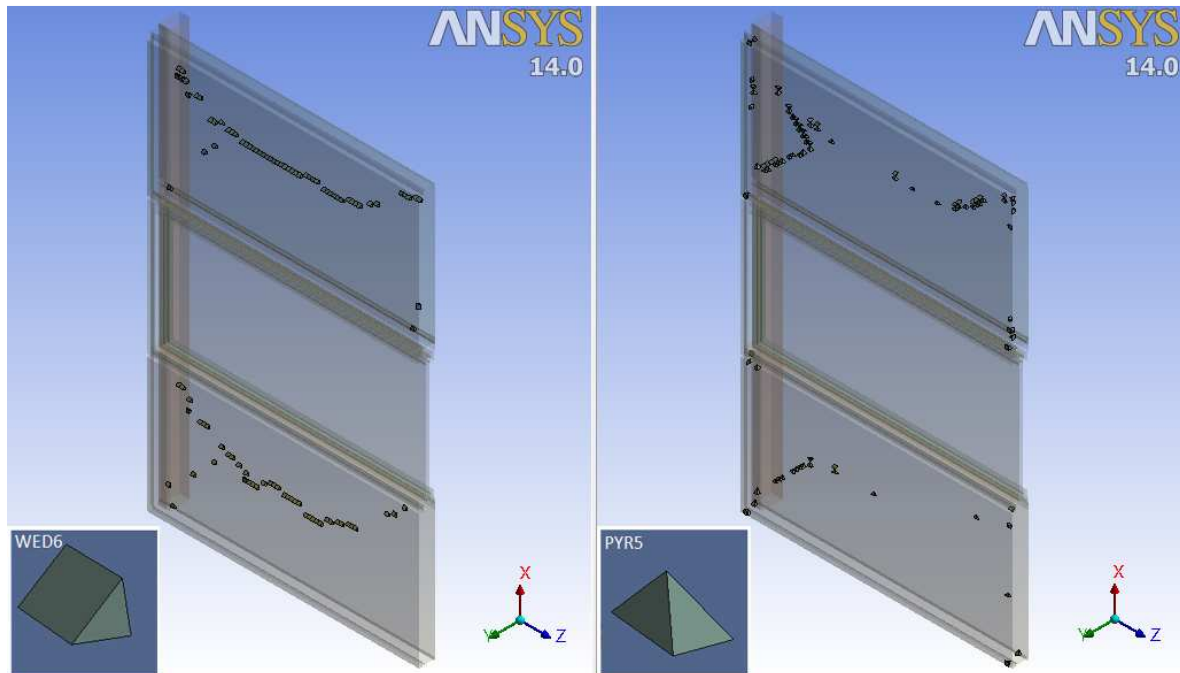


Slika 51: Ustvarjeni končni elementi oblike HEX8 (št. elementov: 23671)

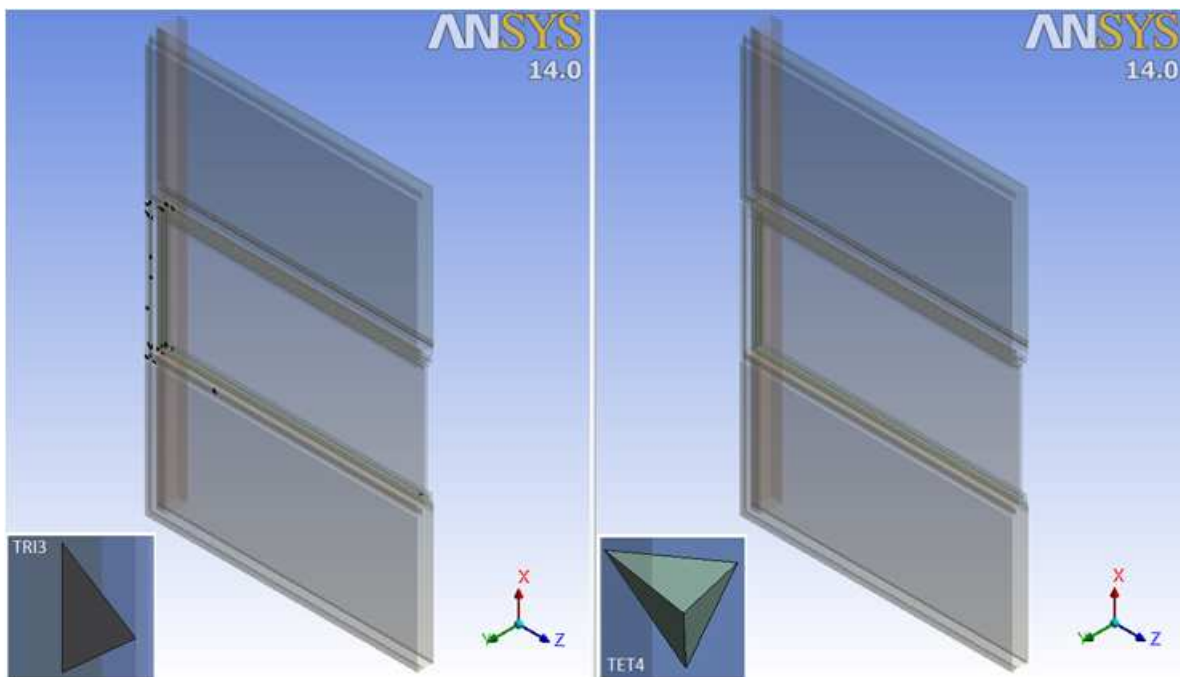


Slika 52: Ustvarjeni končni elementi oblike QUAD4 (št. elementov: 22600)

Na sliki 51 in sliki 52 so prikazani končni elementi Hex8 in Quad4 z najboljšo kvaliteto (0,95). Ti dve obliki KE sta na sliki 49 nanizani skrajno desno. Sta tudi največji po številu izmed ustvarjenih oblik KE v sistemu panel-okno-panel. Kot je razvidno iz zgornjih dveh slik, se nahaja končni element HEX8 večinoma v »solid« elementu in sicer mineralni volni ter QUAD4 v »shell« elementih, kot je pločevina, nosilec okenske odprtine ali aluminijasti okenski okvir.

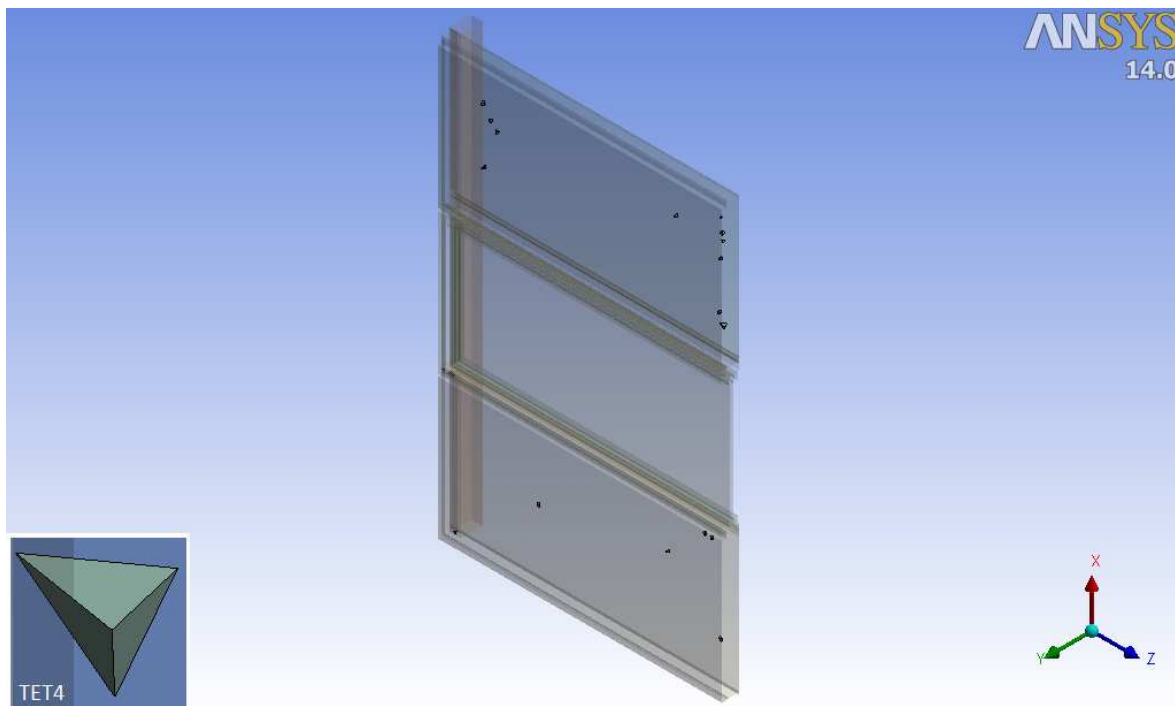


Slika 53: Ustvarjeni končni elementi oblike WED6 (št. elementov: 102) in PYR5 (št. elementov: 94)

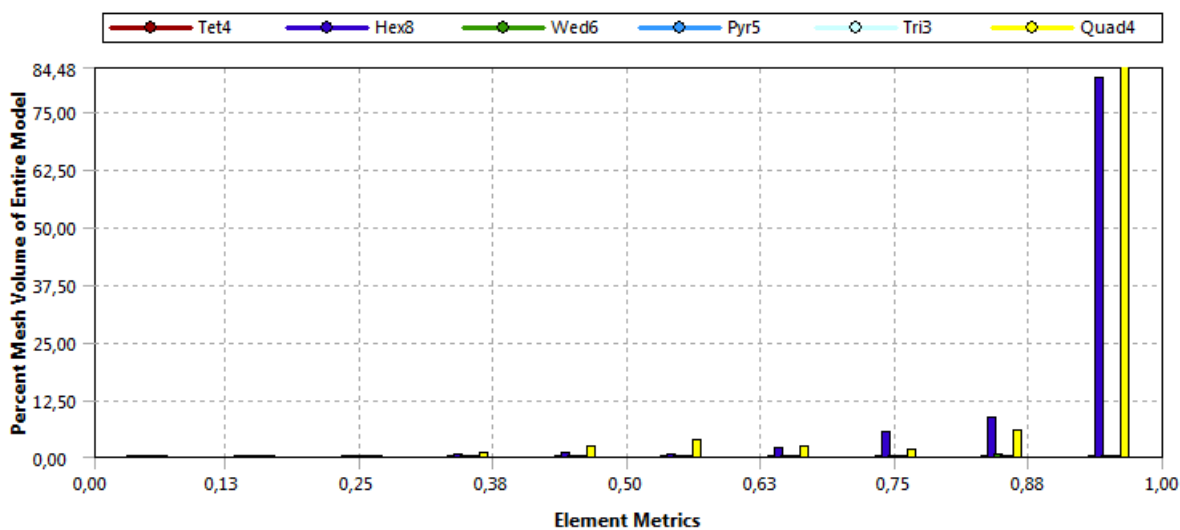


Slika 54: Ustvarjeni končni elementi oblike TRI3 (št. elementov: 32) in TET4 (št. elementov: 0)

Na sliki 54 desno je razvidno, da z kvaliteto 0,95 ni bilo ustvarjenih KE oblike QUAD4, posledično je celotna geometrija transparentna. Zato so prikazani na sliki 55, vendar s to razliko, da je njihova definirana kvaliteta nekoliko nižja. Ta znaša 0,851. Ustvarjenih je bilo 21 končnih elementov, nahajajo pa se samo v mineralni volni in predstavljajo 0,00635 % celotne prostornine sistema panel-okno-panel.



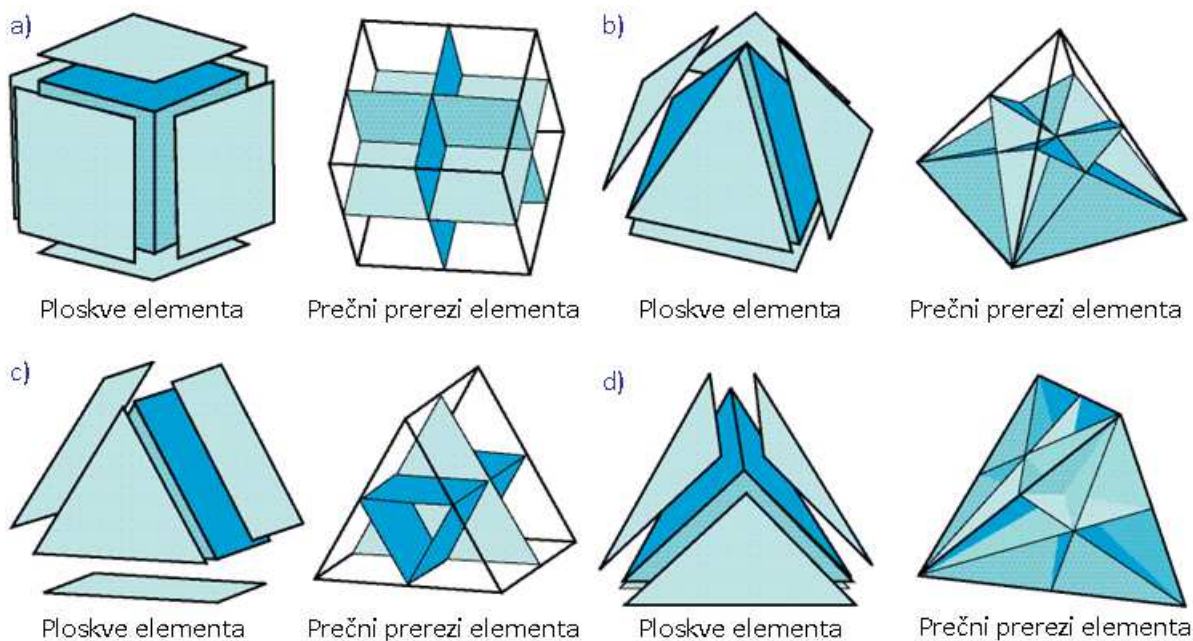
Slika 55: Ustvarjeni končni elementi oblike TET4 s kvaliteto elementov 0,851 (št. elementov: 21)



Slika 56: Ocena kvalitete elementov glede na delež prostornine mreže celotnega modela

Iz slike 56 razberemo, da končni elementi oblike QUAD4 pokrivajo kar 84,5 % celotne prostornine sistema panel-okno-panel, medtem ko končni elementi oblike HEX8 zapolnjujejo nekoliko manj, in sicer 81,9 % prostornine. To je ugoden podatek, saj jim je določena dobra kvaliteta, ki znaša 0,95 in pokrivajo največji del prostornine sistema. Elementi QUAD4 s kvaliteto 0,85 pokrivajo manjši delež prostornine 5,46 % in HEX8, ki pokriva 8,4 % prostornine. S kvaliteto 0,751 pa omenjena elementa pokrivata 1,48 % in 5,22 % prostornine modela, medtem ko s kvaliteto 0,651 zapolnita 2,14 % in 1,6 % prostornine. Preostali del prostornine pa pokrivajo tudi elementi drugih oblik, kar je razvidno iz slike 56.

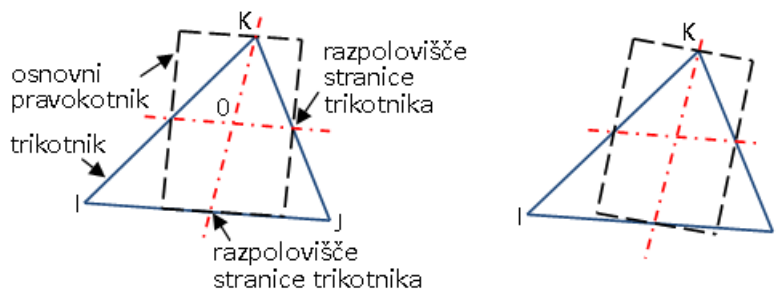
V nadaljevanju so prikazani tudi preostali kriteriji, na podlagi katerih se prav tako podaja oceno primernosti ustvarjene mreže in njene kvalitete. Testiranje oblik za 3-D telesa (kocka, piramida, klinasta oblika, tetraeder) se izvrši indirektno. Razmerje stranic, odklon paralelnosti in maksimalni kot v vogalu so izračunani na podlagi treh korakov. Vsaka od teh treh količin je ocenjena za vsako ploskev elementa posebej, bodisi je to trikotnik ali četverkotnik. Ker zaradi morebitnega popačenja nekaterih 3-D teles ni mogoče oceniti primernost elementa, se zato preko telesa konstruirajo prečni prerezi (slika 57). Rezultat ocene primernosti končnega elementa je najslabše izračunana dodeljena vrednost za katerokoli ploskev ali prečni prerez.



Slika 57: Prikaz ploskev in prečnih prerezov za a) kocka, b) piramida, c) klinasta oblika, d) tetraeder

4.6.2 Razmerje stranic

Razmerje stranic se za trikotni končni element izračuna z upoštevanjem samo vogalnih vozlišč elementa, tako da se najprej konstruira premico, ki poteka skozi vozlišče elementa in razpolovišče nasproti ležeče stranice. Nato konstruiramo drugo premico, ki poteka skozi razpolovišči preostalih dveh stranic. Na splošno ti dve premici nista pravokotni med seboj, niti nista pravokotni na katerokoli stranico trikotnika. Konstruiramo še dva pravokotnika, kot je prikazano na sliki 58. Ta postopek ponovimo, tako da uporabimo vsako od drugih dveh vozlišč kot vrh.



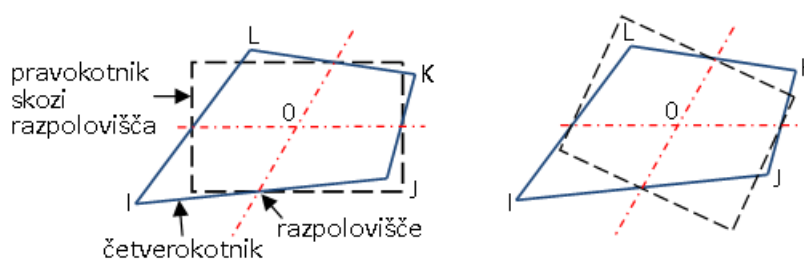
Slika 58: Postopek določitve razmerja stranic za trikotni končni element

Razmerje stranic za trikotnik je razmerje daljše stranice proti krajši stranici kateregakoli izmed šestih pravokotnikov, ki je najbolj raztegnjen, deljeno s kvadratnim korenom od 3. Najboljše razmerje stranic trikotnega elementa je 1 za enakostranični trikotnik. Poleg slednjega, je na sliki 59 prikazan tudi trikotnik, ki ima razmerje stranic 20.



Slika 59: Razmerje stranic za enakostranični in raztegnjen trikotnik

Razmerje stranic za štiristrani končni element se izračuna z upoštevanjem vogalnih vozlišč. Na začetku se konstruira premici, ki razpolovita nasprotno si ležeči stranici elementa in se srečata v centru elementa. Na splošno ti dve premici nista pravokotni med seboj in tudi ne na katerokoli stranico četverkotnika. Nato konstruiramo dva pravokotnika tako, da stranice pravokotnika potekajo skozi razpolovišča štiristranega končnega elementa. Razmerje stranic za štiristrani končni element je razmerje daljše stranice proti krajši stranici za tisti pravokotnik, ki je bolj raztegnjen po dolžini (FE modeler User guide ANSYS, 2013).

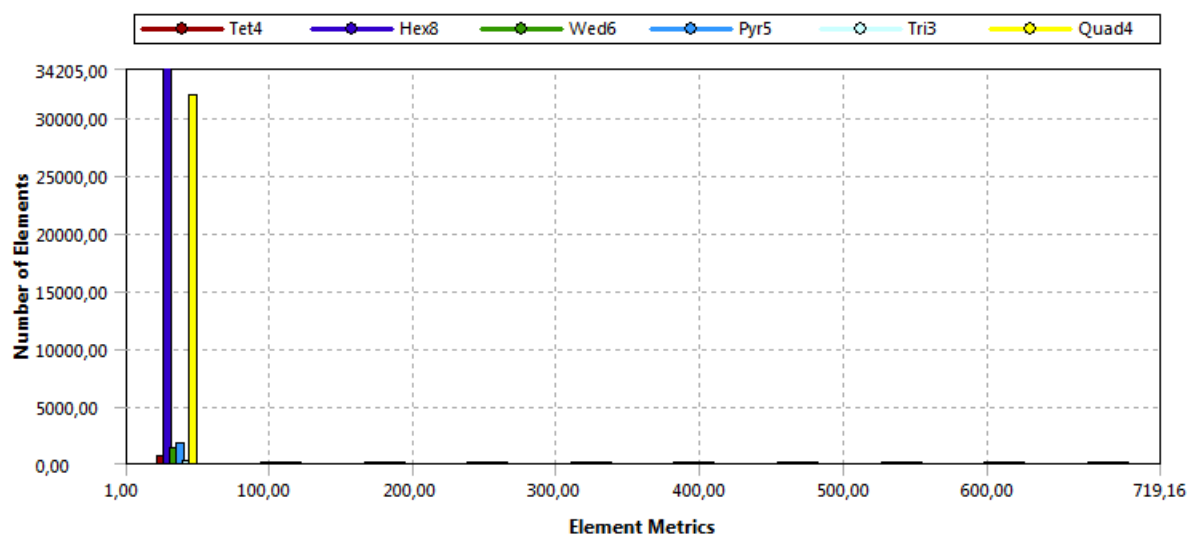


Slika 60: Postopek določitve razmerja stranic za štiristrani končni element

Najboljše možno razmerje stranic štiristranega elementa je 1 za kvadrat. Na sliki 61 je poleg slednjega prikazan tudi štiristrani končni element z razmerjem stranic 30. Oceno kvalitete končnih elementov, glede na kriterij razmerja stranic, ki jo lahko v programu ANSYS prikažemo v obliki histograma, je prikazana na sliki 62.



Slika 61: Razmerje stranic za kvadrat in raztegnjen pravokotnik

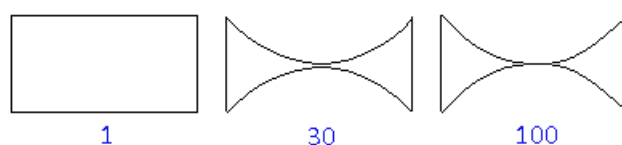


Slika 62: Ocena kvalitete glede na razmerje stranic

Večina končnih elementov ustvarjene mreže imajo izračunano razmerje stranic 36,9. To pomeni, da je kvaliteta elementov glede na ta kriterij ustrezna, saj program javi napako šele v primeru, ko je vrednost razmerja stranic v območju 1000 - 100000. V skupino z določeno kvaliteto 36,9 spada 34205 elementov HEX8, 31800 elementov QUAD4, 1690 elementov PYR5, 1180 elementov WED6 in 535 elementov TET4 ter 117 elementov TRI3. Največje razmerje stranic pa je določeno za en sam element PYR5 in sicer znaša 683.

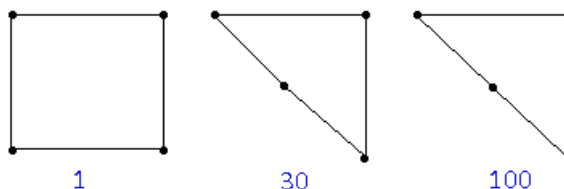
4.6.3 Razmerje Jacobijana

Razmerje Jacobijana se izračuna po določenih korakih. Pri 20-vozlíščni kocki se npr. za vsa vozlišča in težišče izračuna determinanto Jacobijanove matrike, ki jo imenujmo R_j . R_j predstavlja v teh točkah povezavo med naravnimi koordinatami elementa in koordinatami realnega prostora. Pri idealno oblikovanem elementu, je R_j konstantna po elementu. Razmerje Jacobijana elementa je razmerje maksimalne proti minimalni vrednosti R_j . Če sta maksimalni in minimalni vrednosti nasprotnega predznaka, je razmerje Jakobijana označeno z -100. To pomeni, da je element nesprejemljiv. Pri trikotnih elementih in tetraedrih znaša razmerje Jacobijana 1, če je vsako vmesno vozlišče umeščeno na sredini premice med ustreznima vogalnima vozliščema (ne glede na to kako je sicer element popačen). V kolikor bi se vmesna vozlišča na sredini stranice odstranila, bi se povečala vrednost razmerja Jacobijana. Pravokotnik ali paralelepiped, ki nima vmesnih vozlišč oziroma ima vmesna vozlišča na sredini stranice, ima vrednost razmerja Jacobijana 1. S premikom vmesnih vozlišč povzročimo povečanje razmerja Jacobijana. To je razvidno iz slike 63.

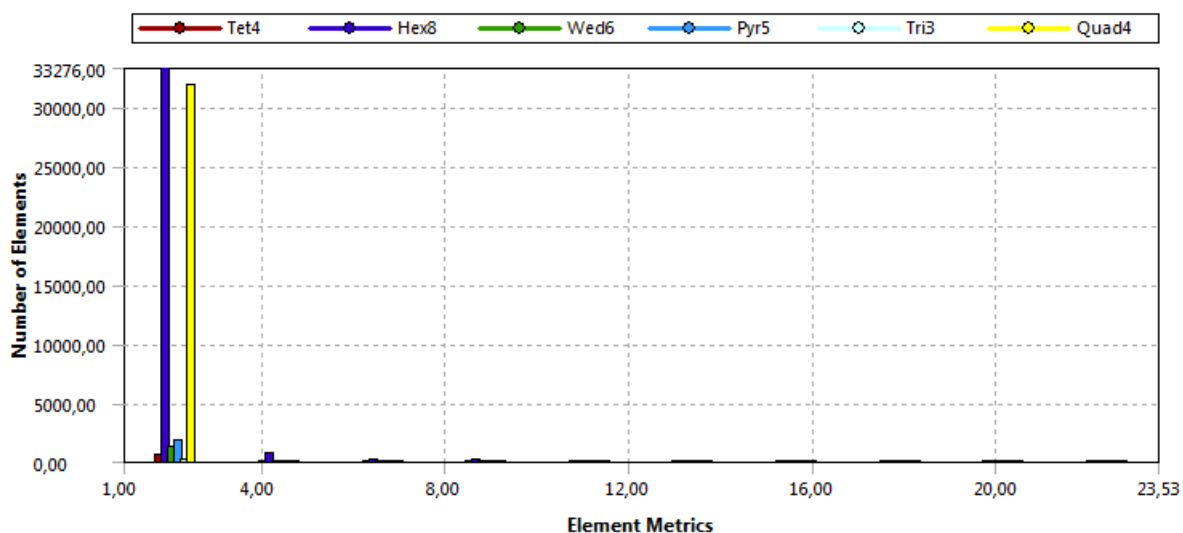


Slika 63: Razmerje Jacobijana za pravokotnik

Četverkotnik ali kocka imata razmerje 1, če sta si nasprotni stranici ali ploskvi paralelni in če so vsa vmesna vozlišča (če obstajajo) nameščena na sredini premice med ustreznima vogalnima vozliščema. V kolikor se vogalno vozlišče prestavi v bližino središča, se razmerje Jacobijana zviša. Vsako nadaljnje prestavljanje vozlišča bi pomenilo nesprejemljivost elementa (slika 64) (FE modeler User guide ANSYS, 2013).

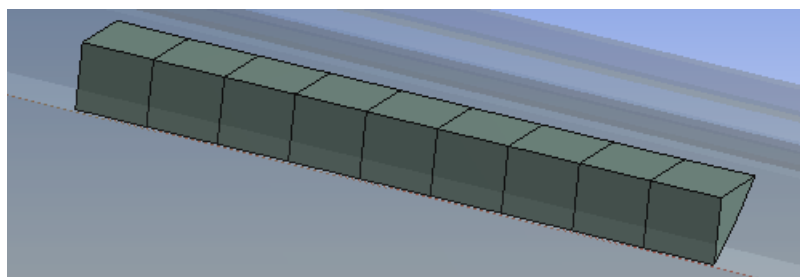


Slika 64: Razmerje Jacobijana za četverkotnik



Slika 65: Ocena kvalitete glede na razmerje Jacobiana

V mreži v največji meri zastopana elementa HEX8 (33276 elementov) in QUAD4 (31800 elementov) imata dobro razmerje Jacobijana, ki znaša 2,13 in pomeni, da so elementi ustrezno oblikovani ter sprejemljivi. Prav tako je tudi večje število drugih oblik elementov določenih z razmerjem 2,13. Največje razmerje Jacobijana, ki jo poda program znaša 22,4 in sicer za 9 elementov HEX8, ki se nahajajo v zgornji mineralni volni.

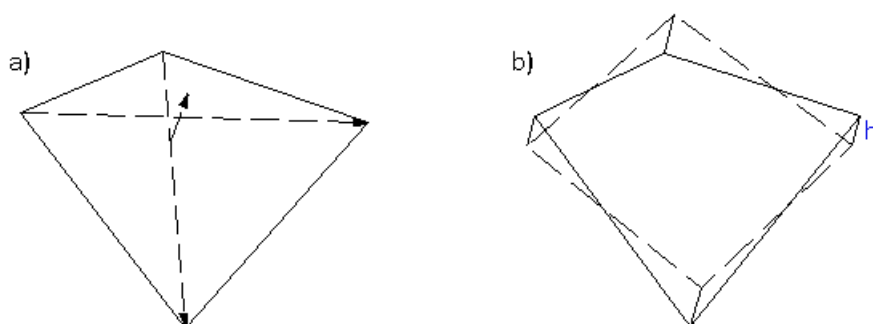


Slika 66: Elementi HEX8 z največjim razmerjem Jacobijana

4.6.4 Oblikovni faktor

Oblikovni faktor se izračuna in preveri za nekatere štirikotne »shell« elemente, štirikotne ploskve kock, elemente v obliki klina ter piramide. Visok faktor kaže na slabo obliko elementa in posledično tudi slabo obnašanje elementa ali preprosto opozori na napako v ustvarjeni mreži.

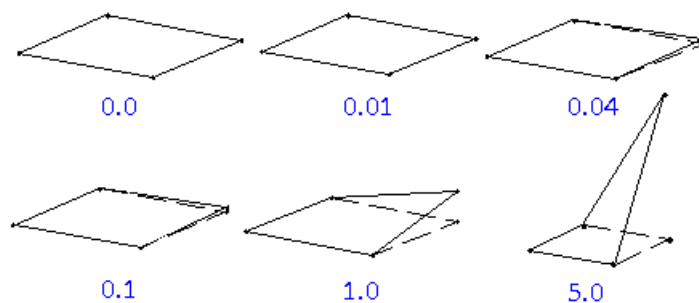
Oblikovni faktor pri štirikotnem »shell« elementu se izračuna s pomočjo lege njegovih vogalnih vozlišč. Najprej se izračuna normala elementa kot vektorski produkt dveh diagonal. Potem se določi projicirana površina elementa, glede na ravnino, ki je pravokotna na normalo (slika 67). Razlika v višini je ocenjena v smeri normale. Na sliki 67 (b) znaša ta višina $2h$. Zaradi načina izračuna srednje vrednosti normale, je h enaka v vseh štirih vozliščih. Za ravninske štirikotnike znaša ta razdalja 0.



Slika 67: Izračun srednje vrednosti normale elementa (a) in projekcija elementa na ravnino (b)

»Oblikovni faktor površine« (F_a^w) je za element izračunan kot sprememba višine stranice deljeno s kvadratnim korenom projicirane površine. Za vse »shell« elemente, ki imajo razpoložljivo debelino, se izračuna »oblikovni faktor debeline« kot sprememba stranice deljeno s povprečno debelino elementa. Vrednost tega faktorja zna biti bistveno višja od izračunanega oblikovnega faktorja površine (F_a^w). Najboljša možna vrednost oblikovnega faktorja štirikotnikov znaša 0, in sicer za ravninski štirikotnik.

Na sliki 68 so prikazani oblikovni faktorji za različne oblike »shell« elementov za četverokotnik z konstantno debelino 0,1. Pri faktorju 0,01 se ne vidi ukrivljenost elementa. Vidna postane šele pri oblikovnem faktorju 0,04.

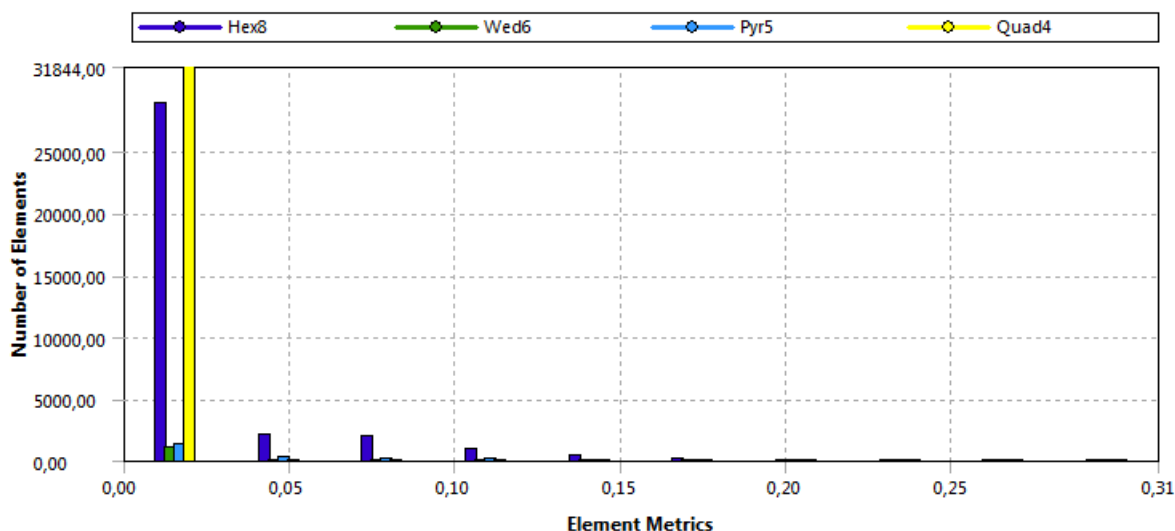


Slika 68: Oblikovni faktor za štirikotne "shell" elemente

Merodajni oblikovni faktor za 3-D telesa je največji od izračunanih oblikovnih faktorjev za 6 štirikotnih ploskev za kocko, 3 štirikotnih ploskev za element v obliki klina ter 1 štirikotne ploskve za piramido. Katerikoli kockasti element, ki ima vse ploskve ravne, ima faktor 0. Na sliki 69 je prikazano torzijsko zvijanje zgornje ploskve kocke za $22,5^\circ$ in 45° glede na osnovno ploskev, s čimer se doseže vrednost oblikovnega faktorja približno 0,2 in 0,4 (FE modeler User guide ANSYS, 2013).



Slika 69: Oblikovni faktor za 3-D telesa

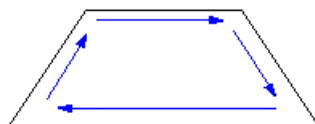


Slika 70: Ocena kvalitete glede na oblikovni faktor

Kot vidimo iz diagrama na sliki 70, je oblikovni faktor izračunan samo za 4 elemente, ki jih definirajo štirikotne ploskve (kocka, element v obliki klina, piramida in četverokotnik). Oblikovni faktor za štiristrani »shell« element (31844 elementov QUAD4) znaša 0,0156, kar je blizu 0,01 in manj od 0,04. To pomeni, da so elementi dobro oblikovani, kar je ovrednoteno s pomočjo slike 68. Prav tako znaša faktor 0,0156 za heksaedre (28800 elementov HEX8), za elemente v obliki klina (1010 elementov WED6) in piramide (1250 elementov PYR5). Naslednjih 2020 elementov HEX8 pa ima izračunan faktor 0,047 in 1930 elementov HEX8 faktor 0,078. Oceno primernost elementov (HEX8) lahko ovrednotimo s primerjavo oblikovnih faktorjev na sliki 69. Najslabša vrednost oblikovnega faktorja znaša 0,297 in sicer je izračunana za 3 elemente HEX8 in 1 sam element PYR5. Ta vrednost oblikovnega faktorja se nahaja med vrednostima 0,2 ter 0,4 (slika 69), za kateri je tudi prikazan ustrezno oblikovan 3-D element.

4.6.5 Odklon paralelnosti

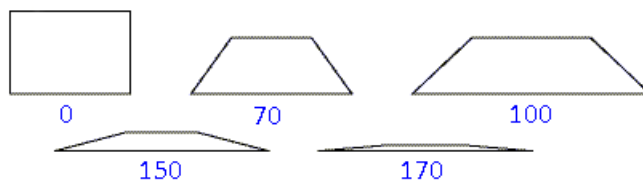
Za odklon paralelnosti, ki se izračuna za štiristrane ploskve, se zanemari vmesna vozlišča in uporabi samo vogalna vozlišča. Na začetku se konstruira enotske vektorje vzdolž vsake stranice, ki so urejeni v skladni smeri, kot je prikazano na sliki 71.



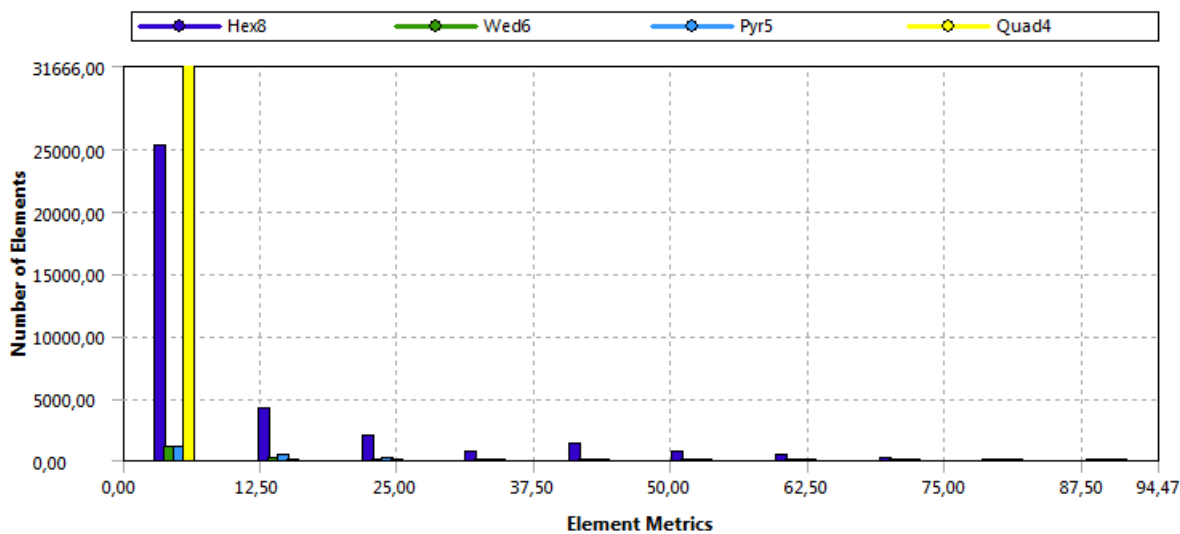
Slika 71: Enotski vektorji vzdolž stranic

Za vsak par nasproti ležečih se stranic se izračuna skalarni produkt enotskih vektorjev. Rezultat tega je kosinus kota med dvema enotskima vektorjema, pri čemer je kot v stopinjah. Odklon paralelnosti pa je večji od teh dveh kotov. Na zgornji sliki je skalarni produkt dveh horizontalnih enotskih vektorjev 1 in $\cos(1) = 0^\circ$. Skalarni produkt dveh vertikalnih vektorjev pa je 0,324, kar znaša $\arccos(0,324) = 70^\circ$. Torej znaša odklon paralelnosti slednjega elementa 70° .

Najboljši rezultat odklona je za pravokotnik in znaša 0° . Na sliki 72 so prikazani različni elementi s pripadajočimi odkloni v stopinjah (FE modeler User guide ANSYS, 2013).



Slika 72: Odkloni paralelnosti za različne elemente v stopinjah

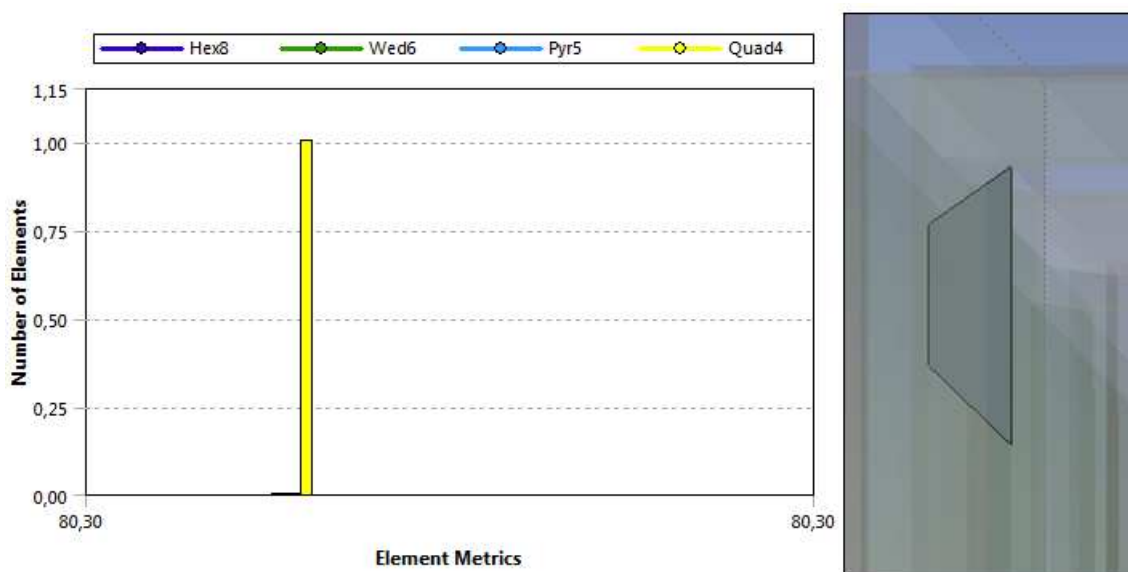


Slika 73: Odklon paralelnosti za sistem

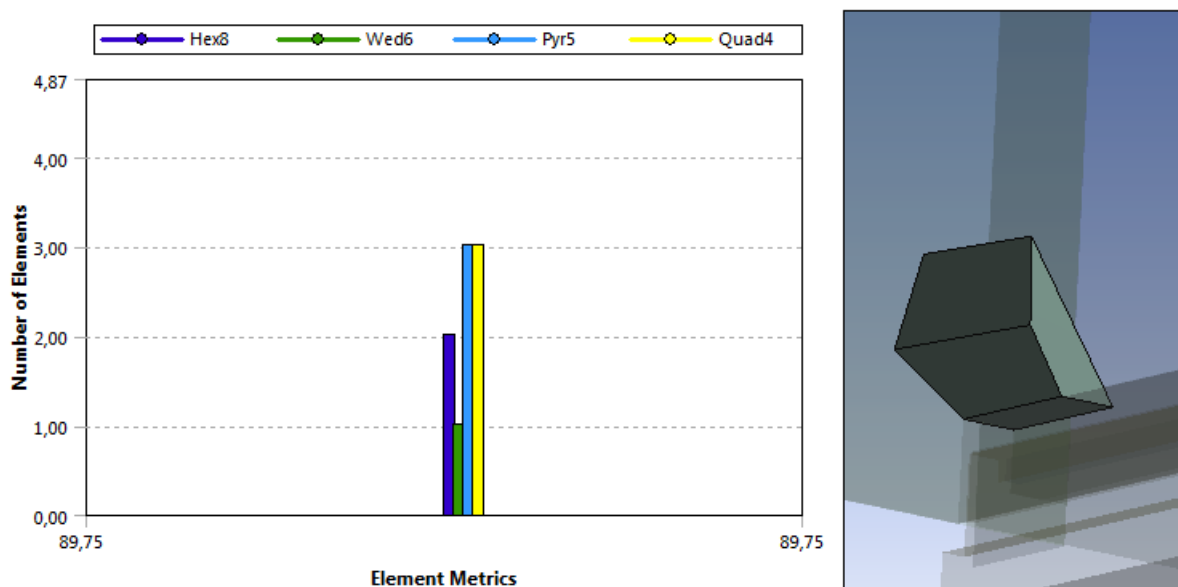
Iz diagrama razberemo, da ima večina elementov minimalni odklon paralelnosti, ki znaša $4,72^\circ$. To je odličen rezultat, saj le malo odstopa od odklona paralelnosti idealnega pravokotnega elementa.

V to skupino spada 31666 elementov QUAD4, 25200 elementov HEX8, 1030 elementov WED6 in nekoliko manj piramidnih elementov PYR5. 4150 elementov HEX8 ima še odklon $14,2^\circ$. Prav tako pa ima element HEX8 še odklone $23,6^\circ$ (1920 elem.), $33,1^\circ$ (620 elem.), $42,5^\circ$ (1240 elem.), 52° (601 elem.) in $61,4^\circ$ (399 elem.). V te skupine spada tudi manjše število elementov drugih oblik.

Samo en element (QUAD4) v sistemu panel-okno-panel ima odklon paralelnosti, ki znaša $80,3^\circ$. To lahko vidimo na sliki 74, kjer je prikazan diagram (levo) in element (desno). Na sliki 75 je prikazan diagram odklona paralelnosti (levo) in geometrija elementa HEX8 (desno). Slednjemu pripada največji odklon, ki znaša $89,75^\circ$. Iz diagrama lahko razberemo, da tej skupini odklona pripadajo trije elementi PYR5 in QUAD4, dva elementa HEX8 ter en element WED6.



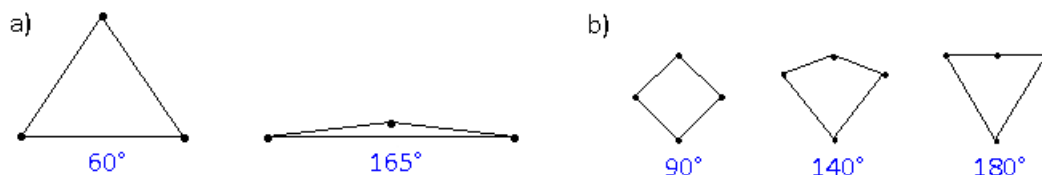
Slika 74: Odklon paralelnosti $80,3^\circ$ za en element QUAD 4 in prikaz geometrije samega elementa



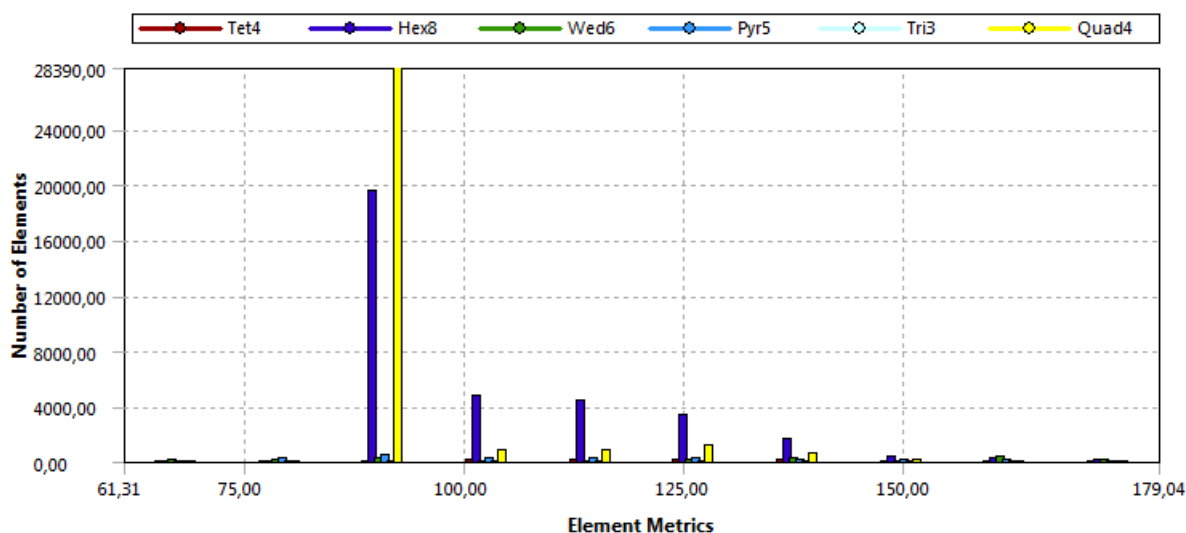
Slika 75: Prikaz skupine elementov z odklonom paralelnosti $89,75^\circ$ in geometrija elementa HEX8

4.6.6 Maksimalni kot v vogalu

Maksimalni kot med sosednjima stranicama je izračunan s pomočjo lege vogalnih vozlišč v 3-D prostoru. Če obstajajo vmesna vozlišča, jih zanemarimo. Najboljši možni rezultat maksimalnega kota pri trikotnem elementu znaša 60° , t.j. pri enakostraničnem trikotniku. Na sliki 76 (a) je prikazan trikoten element, kjer znaša maksimalni kot 165° . Najboljša možni rezultat maksimalnega kota pri štirikotnih elementih pa je pri pravokotniku, ki znaša 90° . Na sliki 76 (b) so prikazani štirikotni elementi z maksimalnim kotom 90° , 140° in 180° (FE modeler User guide ANSYS, 2013).



Slika 76: Maksimalni kot pri trikotnih a) in štirikotnih elementih b)

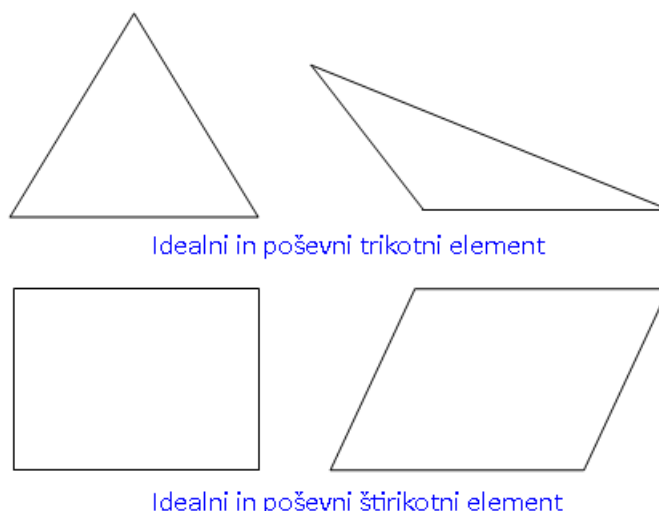


Slika 77: Maksimalni kot v vogalu

Elementoma (QUAD4 in HEX8), ki sta v sistemu panel-okno-panel zastopana v največji meri, pripada izračunan maksimalni kot $90,7^\circ$, kar je zelo dober podatek. To pomeni, da je element oblike skoraj pravilni heksaeder oziroma kocka ali kvader. Podobno velja za štirikotni element QUAD4, ki je pravokotnik ali kvadrat. Največji izračunani kot v vogalu znaša 173° , ki pripada 157 elementom HEX8, 146 elementom WED6, 50 elementom PYR5 in 20 elementom TET4.

4.6.7 Poševnost

Poševnost je eden izmed primarnih kriterijev za določitev kvalitete končnih elementov ustvarjene mreže. Poševnost določa kako blizu smo idealni (t.j. enakostraničnemu ali enakokotnemu elementu) obliki ploskve ali telesa. Na sliki 78 sta prikazana idealna in poševnokotna končna elementa z obliko trikotnika ter pravokotnika.



Slika 78: Idealna in poševnokotna trikotna ter pravokotna oblika končnega elementa

Glede na definicijo poševnosti, vrednost 0 naznanja enakostraničnost elementa (najboljše), medtem ko vrednost 1 nakazuje v celoti degeneriran element (najslabše). Zelo poševni elementi so neprimerni.

S pomočjo spodnje preglednice lahko razvrstimo kvalitete ustvarjenih končnih elementov glede na kriterij poševnosti.

Preglednica 11: Ocena kvalitete elementa glede na kriterij poševnosti

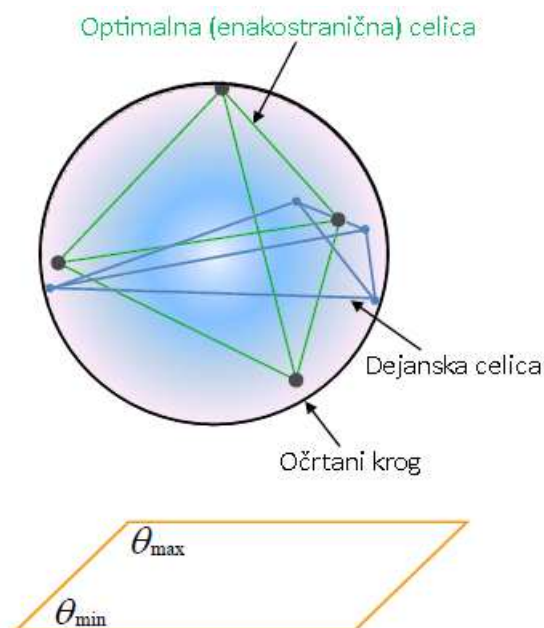
Vrednost poševnosti	Kvaliteta elementa
1	nesprejemljivo
0,9 - <1	slabo
0,75 – 0,9	sprejemljivo
0,5 – 0,75	dobro
0,25 – 0,5	zelo dobro
>0 – 0,25	odlično
0	idealno (enakostraničnost)

Za določitev kvalitete elementa glede na kriterij poševnosti obstajata dve metodi. Metoda, ki temelji na enakostranični prostornini (primerna za trikotnike in tetraedre) ter metoda, ki temelji na odklonu od normalnega enakostraničnega kota. Slednja metoda se uporabi pri vseh oblikah elementov, kot so na primer piramide in prizme.

Po metodi, ki temelji na enakostraničnem odklonu prostornine, je kriterij poševnosti definiran kot:

$$\text{poševnost} = \frac{\text{najboljša velikost elementa} - \text{velikost elementa}}{\text{najboljša velikost elementa}} \quad (7)$$

kjer je najboljša oziroma optimalna velikost elementa definirana kot velikost enakostraničnega elementa z enakim radijem očrtanega kroga (slika 79).



Slika 79: Kriterij poševnosti določen po metodi enakostraničnega odklona prostornine

Kvalitetna mreža ima vrednost za poševnost približno 0,1 za 2-D in 0,4 za 3-D elemente. Preglednica 11 podaja splošno pojasnitev zveze med vrednostmi poševnosti in kvaliteto elementov. V 2-D naj bi bili vsi elementi dobri ali boljši od slednjih. Prisotnost elementov, ki so primerni ali slabši od slednjih naznanijo slabo postavitev vozlišč. V 3-D pa naj bi bila večina elementov dobrih ali boljših od slednjih, vendar pa je na splošno lahko prisoten tudi majhen delež primernih elementov in celo nekaj slabih elementov.

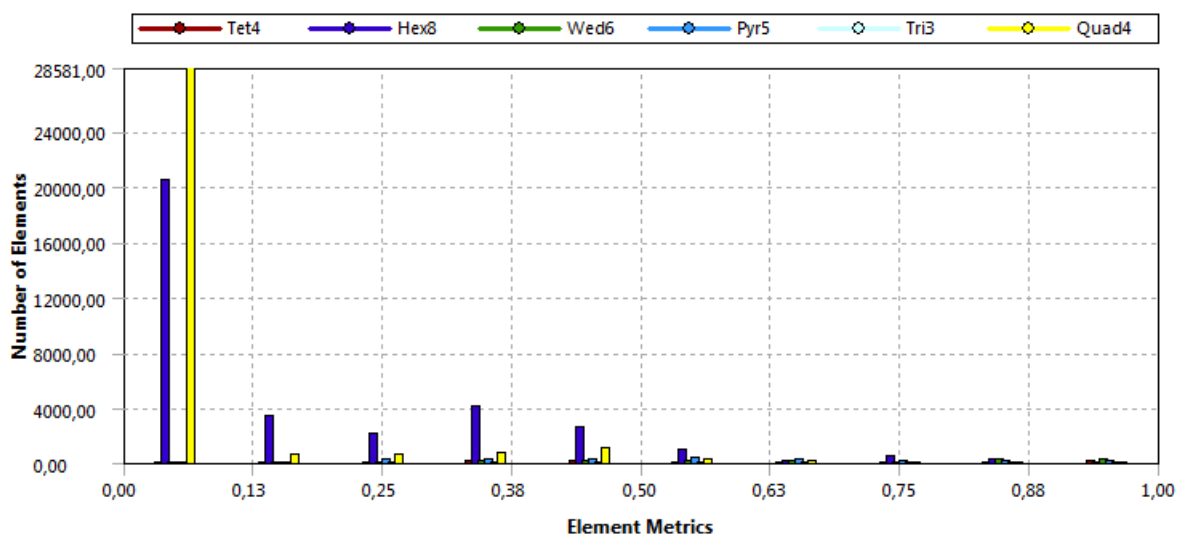
Ta metoda se uporabi za določitev kvalitete za katerikoli končni element v mreži, ki vsebuje elemente trikotne oblike. Za končne elemente v obliki klina («edge») in piramidne elemente, ki sta vsebujeta kombinacijo obeh oblik (trikotno in štirikotno), se uporabi obe prej navedeni metodi za določitev merila kvalitete glede poševnosti. Rezultat kvalitete elementa je največja vrednost poševnosti.

Po metodi odklona od normalnega kota, je poševnost definirana v splošnem kot:

$$poševnost = \max \left[\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right], \quad (8)$$

kjer je θ_{\max} največji kot v elementu, θ_{\min} najmanjši kot v elementu in θ_e kot pri enakokotnem elementu (t.j. 60° za trikotni in 90° za štirikotni končni element).

Za piramidni element je rezultat največja vrednost izmed poševnosti vseh sestavnih ploskev elementa. V idealni piramidi (poševnost = 0) ena izmed štirih ploskev trikotnih oblik predstavlja enakostranični trikotnik (in enakokotni) ter osnovna štiristrana ploskev, ki je kvadrat (FE modeler User guide ANSYS, 2013).



Slika 80: Poševnost elementov v sistemu

Na sliki 80 je razvidno, da je za največ elementov določena poševnost, ki znaša 0,05, kar pomeni, da spadajo v skupino elementov z odlično kvaliteto. Ta vrednost kriterija je določena za 20400 elementov HEX8, 28581 elementov QUAD4, 35 elementov WED6 in 8 elementov TRI3.

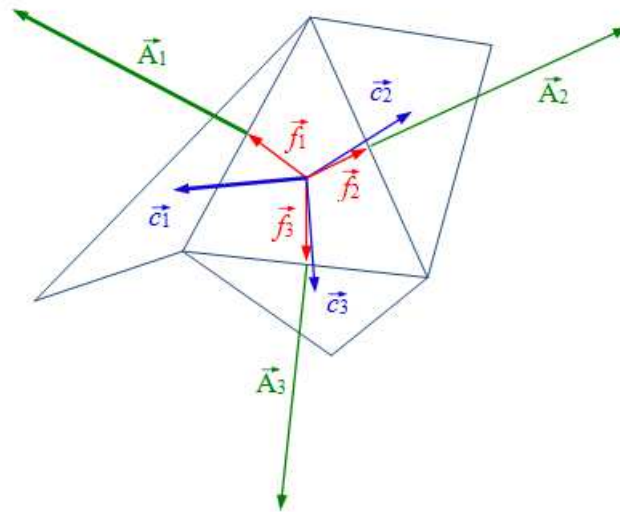
S pomočjo preglednice 11 in grafikona, ki ga poda ANSYS lahko ovrednotimo kvaliteto končnih elementov glede na kriterij poševnosti. Tako lahko razberemo, da v razred sprejemljive kvalitete, ki je večja od vrednosti 0,75, spada 1,74 % končnih elementov, kar znaša majhen odstotek glede na celotno količino ustvarjenih končnih elementov. 4,43 % končnih elementov je ocenjenih z dobro kvaliteto, saj spadajo v območje z oceno 0,5 - 0,75. Zelo dobro oblikovanih elementov glede kriterija poševnosti je 17,5 % (12200 končnih elementov). V skupino odlično oblikovanih elementov pa spada skupaj 53126 končnih elementov, kar znaša 76,3 %.

4.6.8 Kvaliteta pravokotnosti

Območje kvalitete pravokotnosti znaša med 0 in 1, kjer je vrednost 0 najslabša in vrednost 1 najboljša. Izračunana je s pomočjo vektorja normale celice, vektorja, ki poteka od središča celice proti središču vsake od sosednjih celic ter vektorja od središča celice proti vsaki ploskvi. Na sliki 81 so ponazorjeni vsi vektorji s pomočjo katerih se izračuna kvaliteto pravokotnosti za celico.

Preglednica 12: Ocena kvalitete elementa glede na njegovo pravokotnost

Vrednost pravokotnosti	Kvaliteta elementa
0,95 – 1,0	odlično
0,70 – 0,95	zelo dobro
0,20 – 0,69	dobro
0,15 – 0,20	sprejemljivo
0,001 – 0,14	slabo
0 – 0,001	nesprejemljivo



Slika 81: Uporabljeni vektorji za izračun kvalitete pravokotnosti celice

Kvaliteta pravokotnosti za celico je določena kot minimalna vrednost od naslednjih količin, izračunanih za vsako ploskev i s pomočjo: $\frac{\bar{A}_i \cdot \bar{f}_i}{|\bar{A}_i| \cdot |\bar{f}_i|}$, kjer je \bar{A}_i vektor normale ploskve i in \bar{f}_i vektor

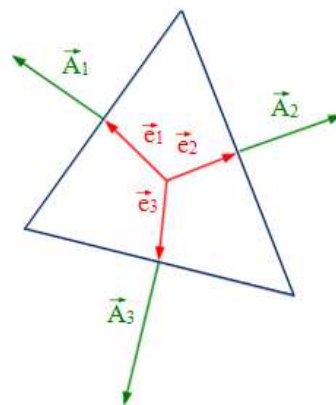
od središča celice proti središču i -te ploskve ter $\frac{\bar{A}_i \cdot \bar{c}_i}{|\bar{A}_i| \cdot |\bar{c}_i|}$, kjer je \bar{A}_i vektor normale ploskve i in \bar{c}_i

vektor od središča celice proti središču sosednjih celic, ki si delijo ploskev.

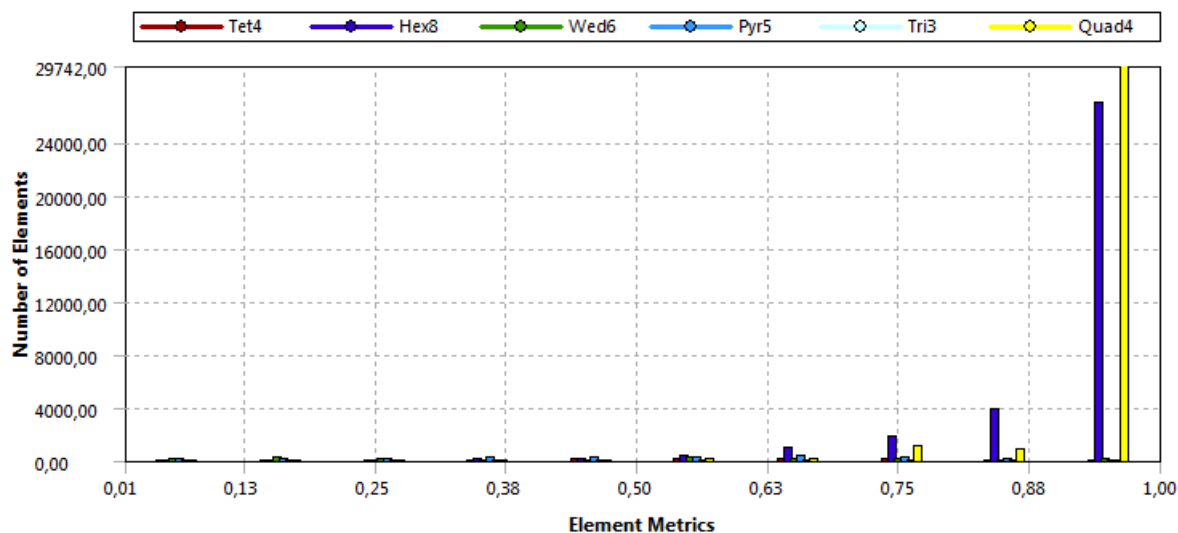
Kvaliteta pravokotnosti za ploskve je izračunana z uporabo vektorja normale stranice in vektorja, ki poteka od središča ploskve proti razpolovišču vsake stranice. Na sliki 82 so prikazani vektorji, s pomočjo katerih je določena kvaliteta pravokotnosti ploskve. Podobno kot pri določitvi kvalitete pravokotnosti za celico, se izračuna kvaliteta za ploskev. Izračunana je kot minimalna vrednost izmed

izračunanih količin za vsako stranico i : $\frac{\bar{A}_i \cdot \bar{e}_i}{|\bar{A}_i| \cdot |\bar{e}_i|}$, kjer je \bar{A}_i vektor normale stranice i in \bar{e}_i vektor od

središča ploskve proti razpolovišči stranice i (FE modeler User guide ANSYS, 2013).



Slika 82: Uporabljeni vektorji za izračun kvalitete pravokotnosti ploskve



Slika 83: Kvaliteta pravokotnosti

Iz slike 83 razberemo, da je kvaliteta pravokotnosti odlična, saj je večina končnih elementov ocenjena z vrednostjo 0,951 kar je blizu vrednosti 1. Vrednost 0,951 je določena za 29742 končnih elementov oblike QUAD4 in za 26900 končnih elementov oblike HEX8. Naslednji oceni znašata 0,852, kar pomeni zelo dobro kvaliteto za 822 elementov QUAD4 ter 3890 elementov HEX8, in 0,753 za 1030 in 1810 elementov (QUAD4 in HEX8).

Na podlagi ocene prej omenjenih kriterijev kakovosti končnih elementov, ki jih je podal program, lahko ugotovimo, da je ustvarjena mreža končnih elementov ustrezna. En izpolnjen kriterij kvalitete končnih elementov je potreben ne pa tudi zadosten pogoj. Zato so bili preverjeni vsi kriteriji za določitev kvalitete mreže, saj je dobra mreža pogoj za pridobitev dobrih rezultatov.

Iz prvega diagrama (slika 49), kjer je prikazana kvaliteta končnih elementov lahko razberemo, da je 82,3 % končnih elementov ocenjenih s kvaliteto v območju od 0,751 - 0,95. Od tega je kar 67 % končnih elementov ocenjenih s kvaliteto 0,95. Zaključim lahko, da ima kvaliteto večjo od 0,55 dobrih 90 % vseh končnih elementov, kar je dober rezultat. Od slednjih ima slabšo kvaliteto, t.j. 0,551 in 0,651 določeno manjše število končnih elementov, kar znaša 3,75 in 4,35 % vseh ustvarjenih končnih elementov.

Če pogledamo kriterij kvalitete mreže določen glede na razmerje stranic, lahko ugotovimo, da ima razmerje stranic z vrednostjo 36,9 kar 99,86 % vseh končnih elementov. Medtem ko ima nekoliko manjše število končnih elementov, t.j. 98,67 %, kvaliteto 2,13 glede razmerja Jacobijana.

Oblikovni faktor, ki je izračunan samo za končne elemente, ki so definirani z vsaj eno štirikotno ploskvijo (to so štiri oblike KE), znaša 0,0156. To je zelo dobro, če ga primerjamo s podanimi vrednostmi v priročniku programa. Določen je za 45,74 % vseh končnih elementov, ki so QUAD4, in 43,32 % vseh končnih elementov, ki so 3-D telesa, kar skupaj znaša skoraj 90 % vseh ustvarjenih končnih elementov. Prav tako je samo za štiri oblike elementov izračunana kvaliteta paralelnosti, ki znaša 4,72° za 84,62 % vseh elementov.

Najboljši maksimalni kot pri štirikotnih elementih, $90,7^\circ$, pripada skoraj 70 % končnim elementom. Za trikotne končne elemente pa je najboljši maksimalni kot 60° , kateremu je v našem primeru približanih zelo majhno število elementov (0,15 %). Glede kriterija poševnosti je določena odlična kvaliteta 76,3 % končnim elementom ter dobra kvaliteta 17,5 %, kar skupaj znaša skoraj 94 % kvalitetnih končnih elementov. Odlična kvaliteta pravokotnosti je izračunana za kar 81,5 % končnih elementov, in sicer znaša 0,951, kar je zelo blizu najboljši vrednosti 1. Naj omenim še, da v praksi ni priporočena uporaba elementov z nizko kvaliteto pravokotnosti in visokimi vrednostmi poševnosti. Na splošno se priporoča minimalno kvaliteto pravokotnosti, ki je večja od vrednosti 0,1 ali maksimalno poševnost $< 0,95$.

Zgoraj naštetá dejstva potrjujejo, da je ustvarjena mreža glede na veliko število končnih elementov res dobro narejena. Seveda pa je potrebno po opravljenih analizah tudi preveriti morebitna opozorila ali napake, ki jih poda program. Z opozorili nas program obvesti, da je geometrija določenega končnega elementa ali povezava med slednjimi še v dopustni meji.

4.7 Stikovanje mrež iz različnih končnih elementov med seboj

Ko se dve površini (ploskvi) dotikata, pravimo, da sta v stiku (kontaktu). Za takšni površini velja:

- končni elementi ene površine ne prebijajo končnih elementov druge površine,
- preko stika se prenašajo normalne tlačne sile in tangencialne trenjske sile,
- preko stika se pogosto ne prenašajo normalne natezne napetosti.

ANSYS Mechanical (Workbench) ima na voljo nastavitve za opis stikovanja ploskev. Ko je geometrija modela uvožena iz programa CATIA v ANSYS, program ANSYS samodejno izvrši stikovanje med posameznimi deli modela. Ugotovi, če se kakšni ploskvi dotikata in vzpostavi stik med njima, ki preprečuje prehod ene skozi drugo.

Če gre za srednjo ploskev tankega telesa (lupine), ki je blizu srednji ploskvi druge lupine, bo, če lupini ležita druga nad drugo (in se dotikata), nastala »zračnost« med srednjima ploskvama. Velikost »zračnosti« je pogosto večja od tolerance, ki se uporablja v avtomatičnem ustvarjanju kontaktnih parov ploskev. Takrat je toleranco pri ustvarjanju kontaktnih parov treba povečati ali pa ročno ustvariti kontaktni par.

Program ponuja nekaj različnih algoritmov za stikovanje:

- kazenska metoda (Pure Penalty),
- metoda z Lagrangevimi množitelji (Augmented Lagrange),
- Normal Lagrange in
- MPC.

Prva dva algoritma temeljita na kazenski kontaktni formulaciji, ki izhaja iz:

$$F_{normal} = k_{normal} \cdot x_{penetration} \quad (9)$$

Ključnega pomena pri določanju kontaktne sile F_{normal} predstavlja koeficient kontaktne togosti k_{normal} . Višja ko je, manjša je globina penetracije $x_{penetration}$ (slika 84). Idealna bi bila neskončna vrednost k_{normal} , pri kateri potem ne bi bilo penetracije. To numerično ni mogoče, vendar že zelo majhna dovoljena penetracija daje dovolj dobre rezultate. Želimo imeti dovolj veliko togost, da je penetracija (in tudi zdrs) sprejemljivo majhna, vendar dovolj nizko togost, da bo numerično reševanje enačb še dobro pogojeno.



Slika 84: Formiranje stika po metodi »Augmented Lagrange«

Glavna razlika med kazensko metodo in v našem primeru uporabljeno metodo Lagrangevih množiteljev, je ta, da zadnji člen (λ) dodatno povečuje kontaktno silo:

$$F_{normal} = k_{normal} \cdot x_{penetration} + \lambda \quad (10)$$

Zaradi dodatnega člena λ je metoda Lagrangevih množiteljev manj občutljiva na velikost koeficienta kontaktne togosti k_{normal} in, v primerjavi s kazensko metodo, običajno vodi tudi do boljše pogojenosti enačb. Vendar pa je pri nekaterih analizah lahko potrebna dodatna iteracija, še posebej, če deformirana mreža postane preveč popačena.

Kontaktni tlak je določen z:

$$P = \begin{cases} 0, & \text{če } u_n > 0 \\ K_n u_n + \lambda_{i+1}, & \text{če } u_n \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

kjer :

$$\lambda_{i+1} = \begin{cases} \lambda_i + K_n u_n, & \text{če } |u_n| > \varepsilon \\ \lambda_i, & \text{če } |u_n| < \varepsilon \end{cases} \quad (12)$$

pri čemer je:

P normalni kontaktni pritisk,

K_n normalna kontaktna togost,

u_n velikost kontaktne reže,

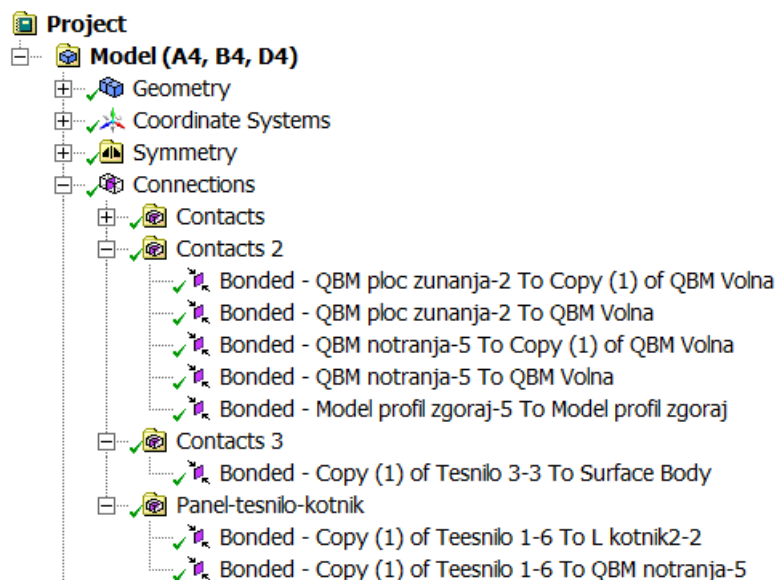
ε maksimalna dopustna penetracija in

λ_i komponenta Lagrangevega množitelja pri i -ti iteraciji. Izračuna se za vsak element.

Pri ustvarjanju kontaktov program Ansys samodejno poda vrednosti za: normalno kontaktno togost (FKN), maksimalno dopustno penetracijo ($TOLN$) in maksimalni dopustni zdrs ($SLTOL$). Sprijemna togost (FKS , »Sticking stiffness«) je lahko določena na osnovi maksimalnega dovoljenega zdrsa ($SLTOL$) in normalne kontaktne sile. ANSYS na podlagi karakteristik materialov določi ustrezno togost kontakta (FKN). Osnovana je na modulu elastičnosti E in na velikosti spodaj ležečega elementa. ANSYS samodejno določi privzeto vrednost tangentne (drsne, sprijemne) togosti kontakta, ki je odvisna od materiala spodaj ležečega elementa in normalne kontaktne togosti (Kontakti, 2013).

Izvedba kontaktov med posameznimi ploskvami modela se lahko izvrši ročno ali samodejno. S slednjim načinom lahko prihranimo ogromno časa, zato je bilo v našem primeru stikovanje izvršeno s pomočjo samodejnega ustvarjanja kontaktov »Create Automatic Connections«. Ukaz se izvede v drevesni strukturi pod zavihkom imenovanim »Connections«. Potem je treba pogledati pravilnost izvedenih stikovanj. Lahko se zgodi, da se vsi konstrukcijski elementi popolnoma ne stikajo, kar je lahko posledica prevelike »zračnosti« med ploskvami ali neustrezne tolerance. Za uspešno modeliranje konstrukcije je potrebno podrobno pregledati vse kontakte.

Po izvedbi prve linearne analize je bilo razvidno, da niso bile izvedene vse povezave med elementi konstrukcijskega sistema panel-okno-panel. Vidna je bila napaka pri ustvarjanju stika v fasadnem panelu, saj je pločevina odstopila od mineralne volne tako v zgornjem kot v spodnjem panelu. Tako je bilo potrebno ustvariti nove kontakte z ročno nastavitvijo. Ustvarjene povezave so prikazane spodaj na sliki 85, in sicer pod drugo in tretjo skupino povezav »Contacts 2« in »Contacts 3« ter skupino »Panel-tesnilo-kotnik«.



Slika 85: Prikazana izvedba kontaktov v drevesni strukturi

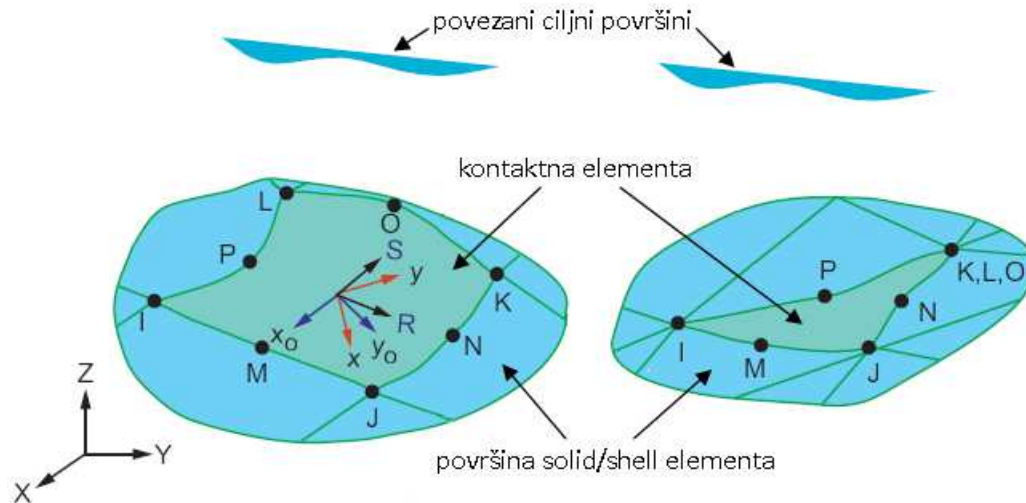
Stik v zgornjem in spodnjem fasadnem panelu izvedemo tako, da izberemo kontaktno telo »Contact Bodies«. To je zunanja pločevina, ki jo želimo stikovati (»bonded«) na ciljno telo »Target Bodies«, ki je v tem primeru mineralna volna. Ko je kontaktno mesto formirano kot »bonded«, ni več omogočenega medsebojnega zdrsa ali ločitve med površinama. Lahko si predstavljamo, da sta površini kontaktnega in ciljnega telesa zlepljeni. Na podoben način smo ustvarili tudi stike med notranjo pločevino in mineralno volno na zgornjem ter spodnjem fasadnem elementu.

Pri ročni nastavitvi kontaktnega para je zelo pomembna pravilna označba kontaktne in ciljne površine. Običajno je kontaktna površina telesa, ki je opisana z elementom imenovanim »CONTA174«, prikazana rdeče, medtem ko je ciljna površina telesa, ki je opisana z elementom »TARGE170«, prikazana z modro barvo. Kontaktna in ciljna površina skupaj tvorita kontaktni par.

4.7.1 CONTA174

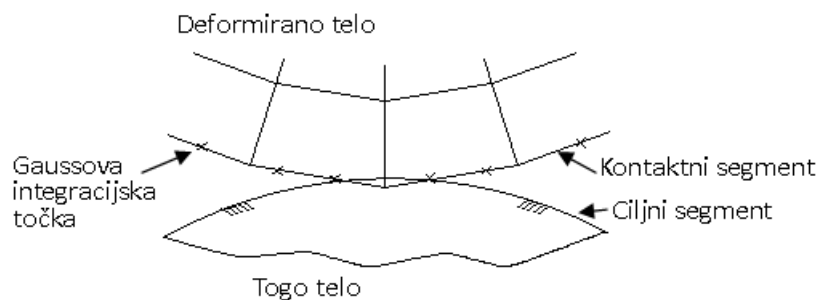
Element »CONTA174« se uporabi za opis kontakta med 3-D ciljno površino (opisano z elementom »TARGE170«) in kontaktno površino, ki je opisana s tem elementom. Kontaktna površina je lahko na eni ali obeh straneh lupinastih elementov.

Je element, ki je enakega reda kot osnovni spodaj ležeči element. Kontaktni element višjega reda se lahko ujema tudi s spodaj ležečimi elementi, ki so nižjega reda, če se izpustijo vmesna vozlišča. Element »CONTA174« je kompatibilen z vozlišči vzdolž robov in ima enake karakteristike geometrije (3-D, 8-vozljiščni element) kot spodaj ležeči element. Predstavlja zunanjo stično površino »solid« ali »shell« elementa, s katero je povezan. Kontakt se pojavi, ko element prodre v »TARGE170« na določeni ciljni površini (Kontaktne elementi, 2013).



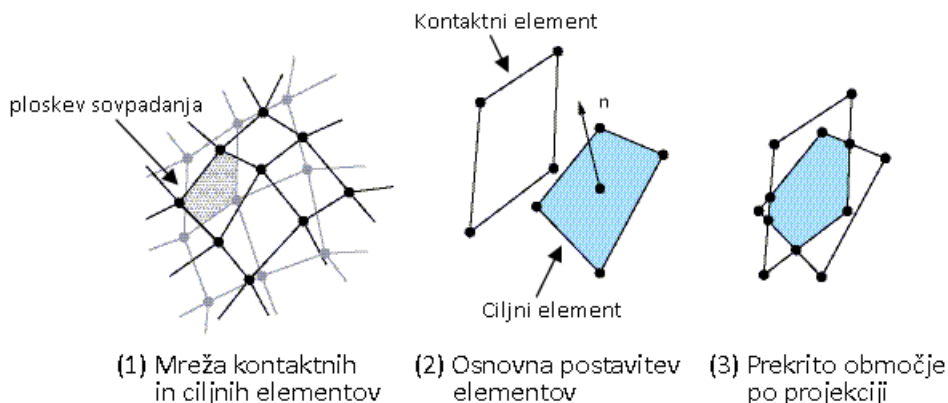
Slika 86: Geometrija elementa »CONTA174«

Element »CONTA174« je kontaktni element, s pomočjo katerega lahko povežemo dve površini med seboj. Zaznavne kontaktne točke se nahajajo ali v vozliščnih ali v Gaussovih točkah. Tako je penetracija kontaktnega elementa omejena na nekaj točk. Običajno Gaussove točke zagotovijo bolj točne rezultate, kot če uporabimo vozlišča.



Slika 87: Zaznane kontaktne točke na Gaussovih točkah

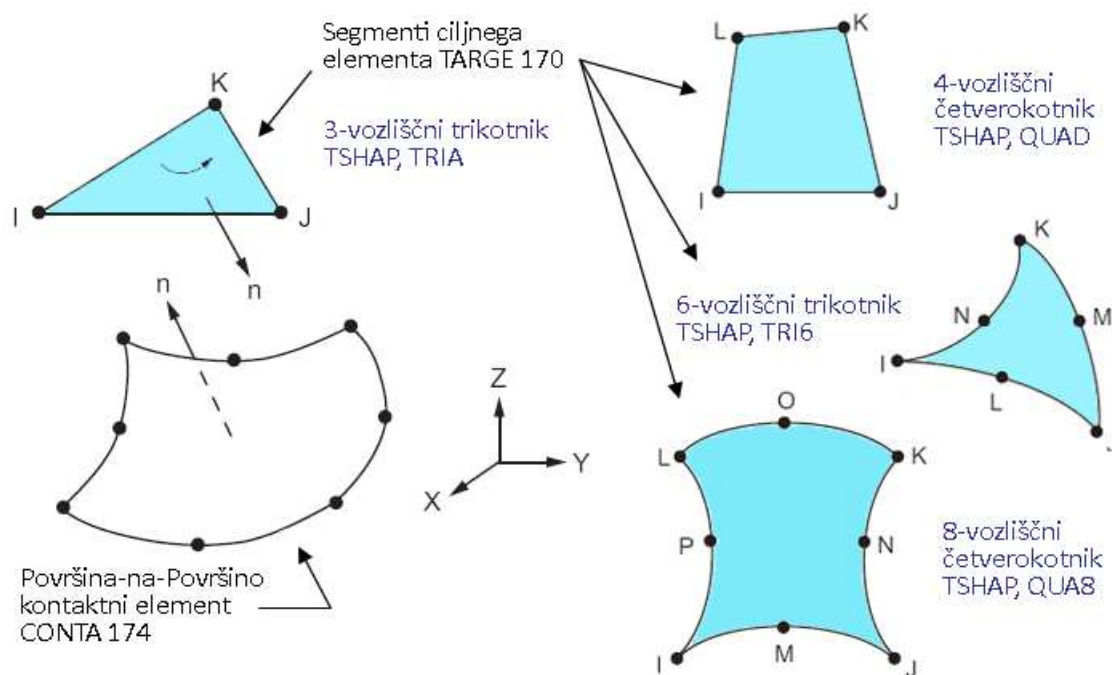
Metoda projekcije površine je na voljo za 3-D elemente, kot je na primer »CONTA174«. Je metoda, ki na splošno nudi enakomernejšo porazdelitev napetosti (za kontaktni element in spodaj ležeči element) kot druge možnosti zaznave kontaktov.



Slika 88: Površina-Projekcija-Osnova kontakta

4.7.2 TARGE170

»TARGE170« se uporabi za 3-D ciljne elemente, ki se povežejo s kontaktnimi elementi »CONTA174«. Kot sem že opisala, kontaktni elementi pokrijejo 3-D, lupinaste in linijske elemente in so potencialno v stiku s ciljno površino, diskretizirano s ciljnimi elementi »TARGE170«, preko niza konstant.



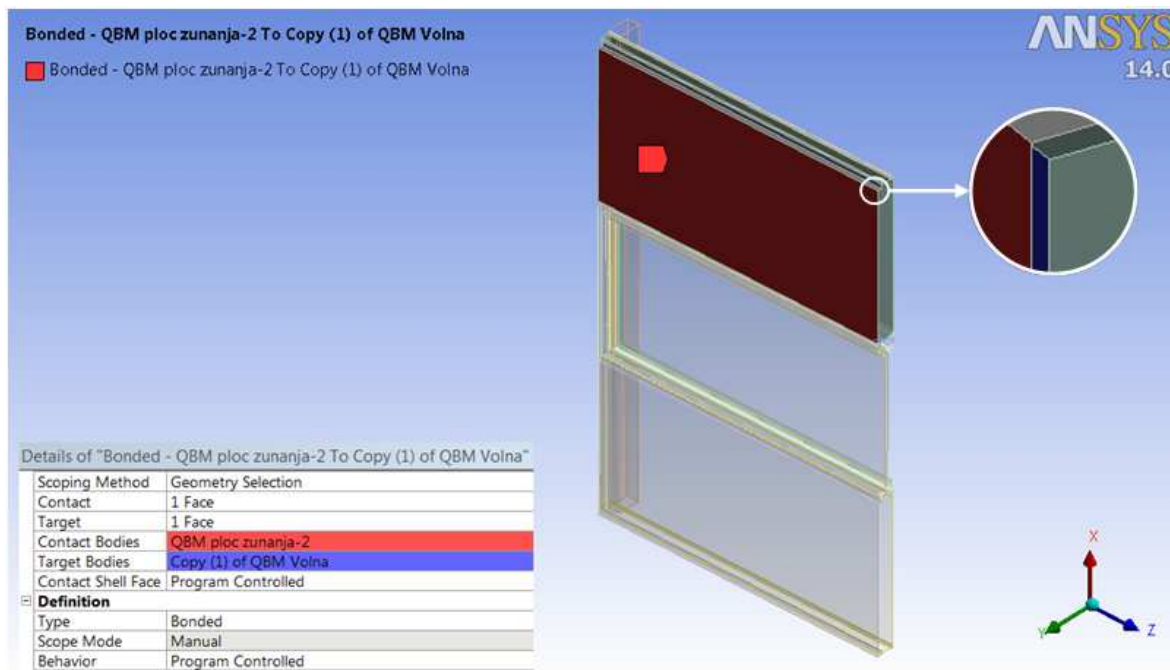
Slika 89: Geometrija in različni tipi elementa »TARGE170«

Ciljna površina je lahko tako toga kot deformabilna. Za modeliranje zvez togo-deformabilnih kontaktov, je toga površina tista, ki mora predstavljati ciljno površino. Za deformabilno-deformabilne kontakte, mora ena od deformabilnih površin ležati na ciljni površini.

Vsaka ciljna površina je lahko povezana samo z eno kontaktno površino in obratno. Nekaj kontaktnih elementov lahko tvori kontaktno površino in pride v kontakt s podobno ciljno površino. Na sliki 89 so prikazani razpoložljivi tipi segmentov za element »TARGE170«. Splošni 3-D površinski segmenti (3-vozljiščni in 6-vozljiščni trikotniki, ter 4-vozljiščni in 8-vozljiščni četrkotniki) in preprosti segmenti (valj, stožec in krogla) so lahko stikovani s 3-D površina-na-površino kontaktnimi elementi (»CONTA173«, »CONTA174«), 3-D vozljišče-na-površino kontaktnimi elementi (»CONTA175«) in 3-D linijo-na-površino kontaktnimi elementi (»CONTA177«). Za osnovni 3-D površinski segment (trikotni in četrkotni tip segmenta), morajo biti vozljišča razporejena tako, da je zunanja normala ciljne površine definirana po desnem pravilu. (Kontaktne elementi, 2013).

4.7.3 Nekaj kontaktnih parov v sistemu panel-okno-panel

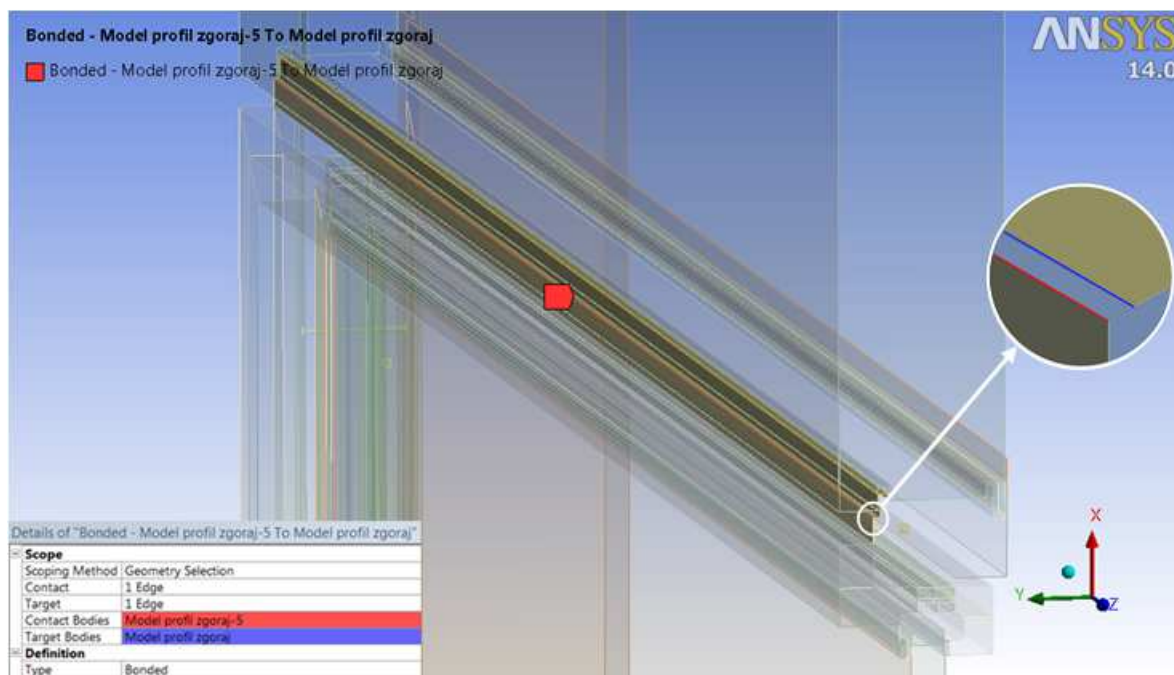
Na sliki 90 je prikazana izvedba stika med pločevino fasadnega panela in mineralno volno, ki se je izvedla z ročno nastavitvijo kontaktne (definirana z rdečo barvo) in ciljne površine (definirana z modro barvo).



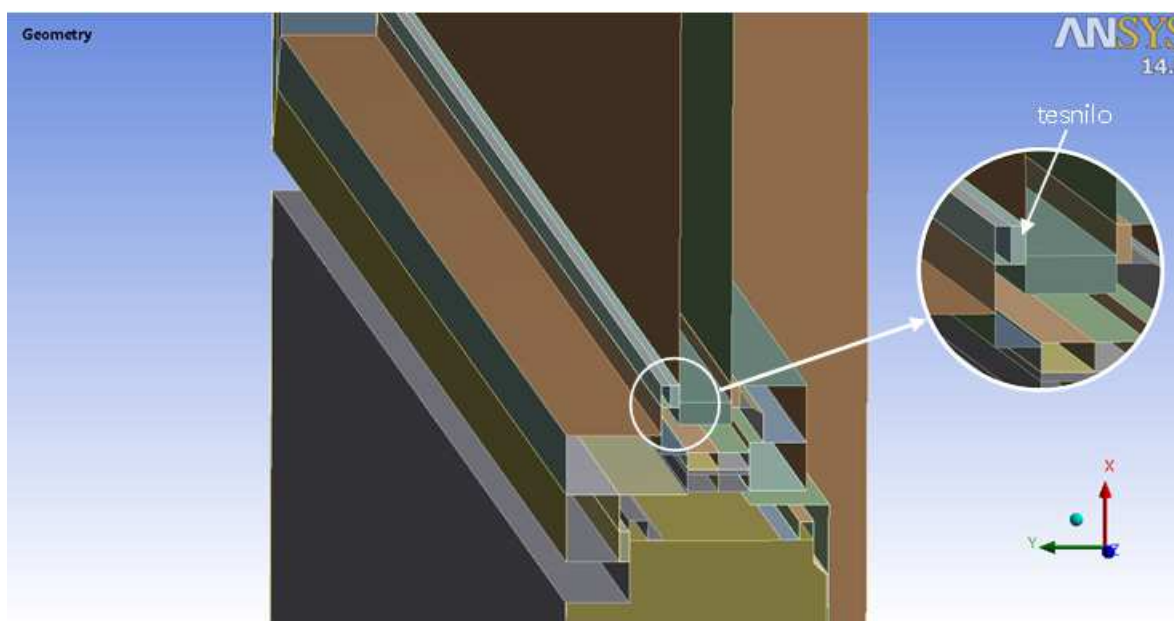
Slika 90: Prikaz ročne nastavitve kontakta med pločevino fasadnega elementa in mineralne volne

»Vrh« vsake od izbranih površin telesa se zgodi na ploskvi v Y smeri (razvidno na sliki 90), in sicer v globalnem koordinatnem sistemu. Zato kontaktna (rdeča) in ciljna (modra) površina nista obrnjeni druga proti drugi. Če želimo dobiti delovanje kontaktnega para, lahko nastavev v podrobnostih za stik lupinaste ploskve bodisi ostane kot "Nadzor Programa" ali pa sami določimo zgornji in spodnji del, tako da sta rdeča kontaktna stran in modra ciljna stran obrnjeni druga proti drugi.

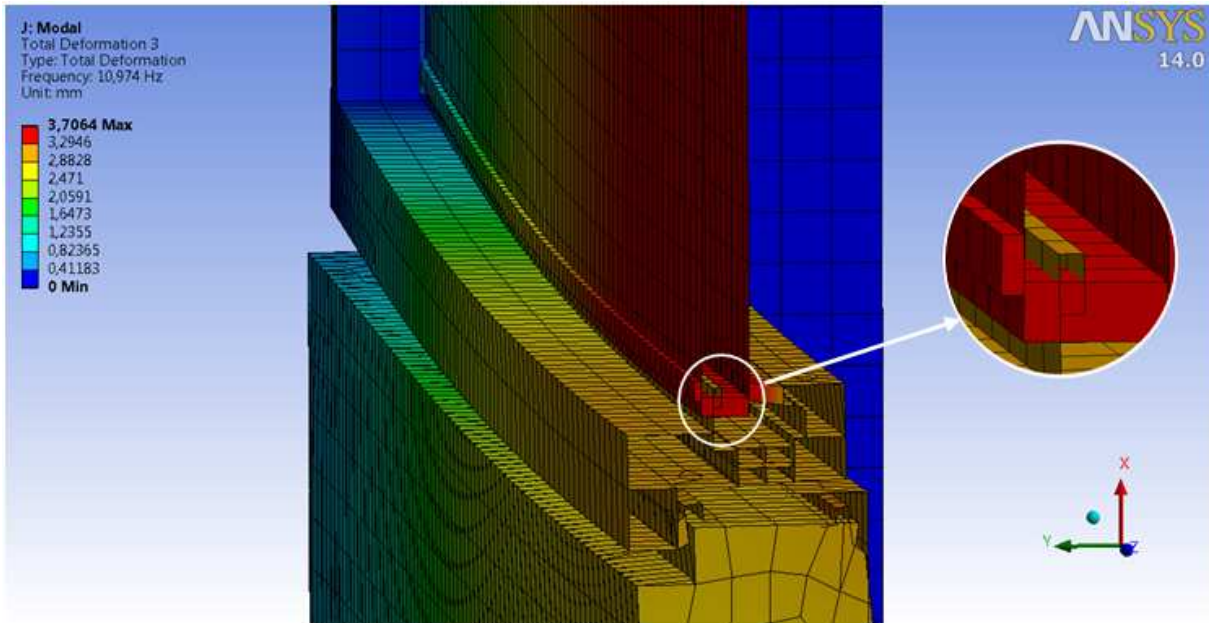
Pri pregledovanju prvih rezultatov linearne uklonske analize se je izkazalo, da je bil neustrezno formiran kontakt v zgornjem delu okenskega okvirja. Razvidna je bila ločitev dveh slojev elementa, zato je bilo potrebno ustvariti povezavo (slika 91). Prav tako se je izkazalo, da ni bil izveden kontakt tesnila z zunanjim okenskim okvirjem, ki se nahaja na spodnjem delu okvirja v neposredni bližini distančnika (slika 92). Po izvršitvi prve modalne analize je bilo nazorno razvidno, da je aluminijasti del okenskega okvirja prodril v distančnik preko tesnila (slika 93), zato je bila tudi tu potrebna ročna nastavev kontakta, ki je prikazana na sliki 94.



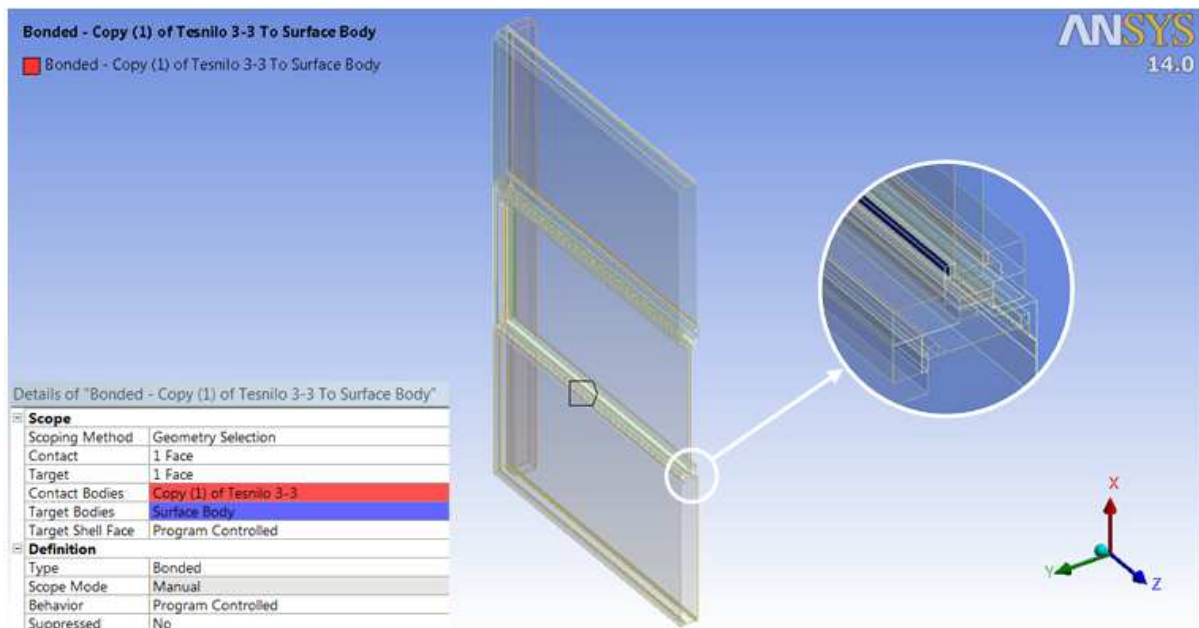
Slika 91: Prikaz ročne nastavitve kontakta v zgornjem delu okenskega okvirja



Slika 92: Prikaz detajla, kjer je vidno pravilno stikovanje tesnila v spodnjem delu okenskega okvirja



Slika 93: Prikaz napake po samodejni izvedbi kontakta



Slika 94: Prikaz ročne nastavitve kontakta tesnila v spodnjem delu okenskega okvirja

V nastavitvah opredelimo podatke o kontaktnem paru, tako da je tip kontakta nastavljen kot vezani »Bonded«, ki dovoljuje tako simetrični stik, ki temelji na formulaciji »penalty« in asimetrični stik z vsemi možnimi formulacijami. Zunanja vozlišča teles bodo povezana s ploskvami drugih teles, če je razdalja med zunanjimi vozlišči in ploskvijo manjša od vrednosti tolerance, ki jo določimo. Če to velja, potem program avtomatično zazna stikovana vozlišča ploskve med samo izvedbo analize.

4.8 Izvedene analize

V nalogi so bile izvedene naslednje analize:

- linearno elastična analiza,
- linearna uklonska analiza,
- modalna analiza in
- geometrijska in materialna nelinearna analiza.

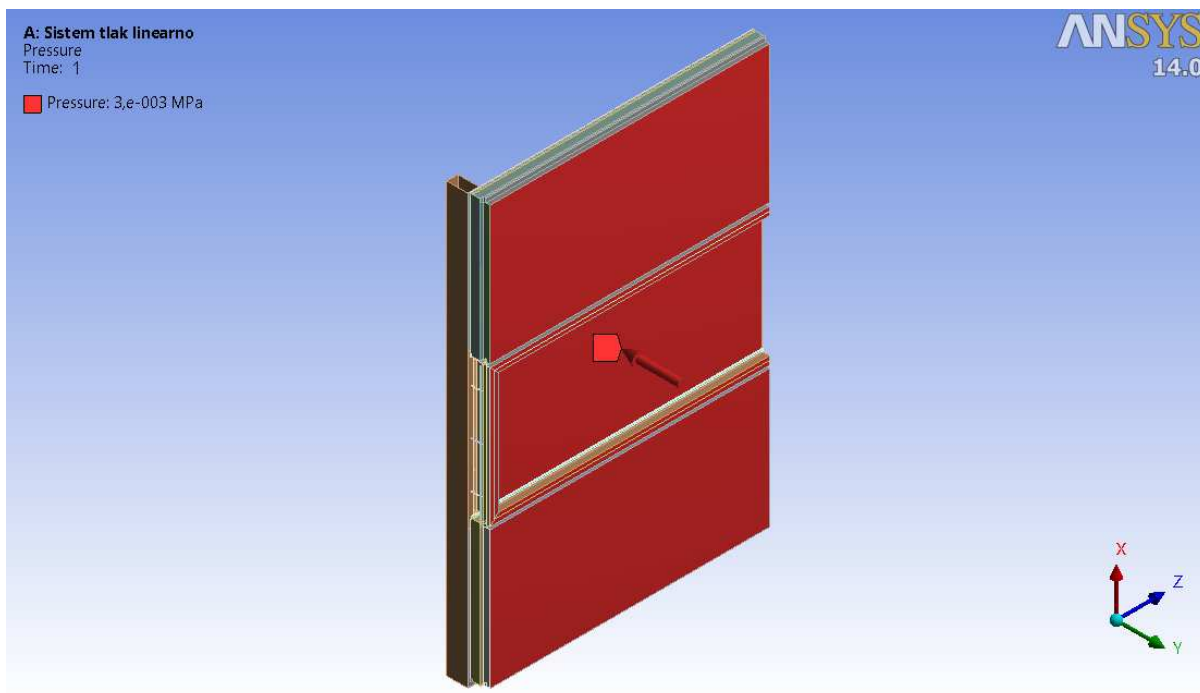
V nadaljevanju so prikazani rezultati izvedenih analiz. Grafično so predstavljene vrednosti za pomike in von Misesove napetosti na zunanji ter notranji strani sistema panel-okno-panel. Zaradi boljšega in lažjega pregleda rezultatov so na slikah prikazane vrednosti za napetosti in pomike le v določenih točkah, medtem ko je interpretacija bolj podrobna.

5 LINEARNO ELASTIČNA ANALIZA

V tem poglavju podajamo rezultate linearno elastičnih analiz za tri vrste obremenitev. Pri metalih (jeklo, aluminij) in poliamidu je von Misesova napetost tista, ki jo primerjamo z napetostjo na meji tečenja, da preverimo, če bi pri podani obremenitvi prišlo do plastičnega tečenja materiala. Pri krhkih materialih (steklo) je prva glavna normalna napetost tista, ki jo gledamo in primerjamo z napetostjo loma, da preverimo, če bi pri podani obremenitvi material počil. Pri mineralni volni sta glavna normalna napetost in strižna napetost tisti, ki ju gledamo in primerjamo z laboratorijskimi testi določeno tlačno in strižno trdnostjo mineralne volne.

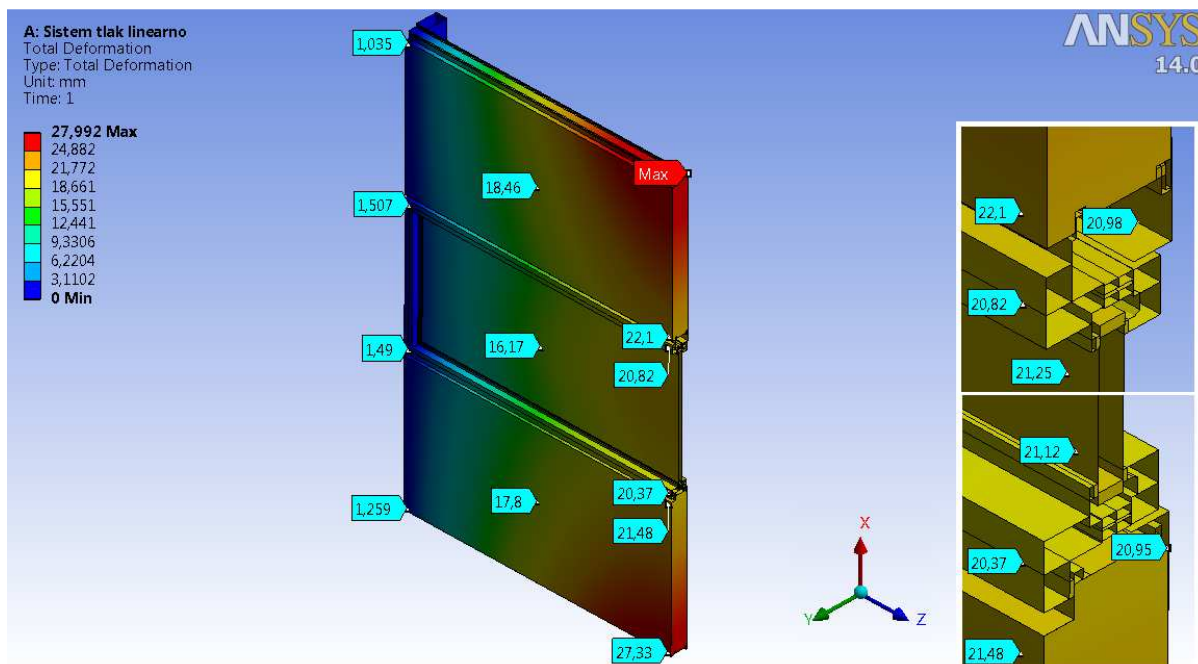
5.1 Obremenitev zaradi vetra – tlak

Na sliki 95 je prikazana obremenitev zaradi enakomernega pritiska vetra, ki deluje na zunanje površine sistema panel-okno-panel in znaša 3000 N/m^2 oziroma $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$. Kot je razvidno iz slike, deluje površinska obtežba v negativni Y smeri.

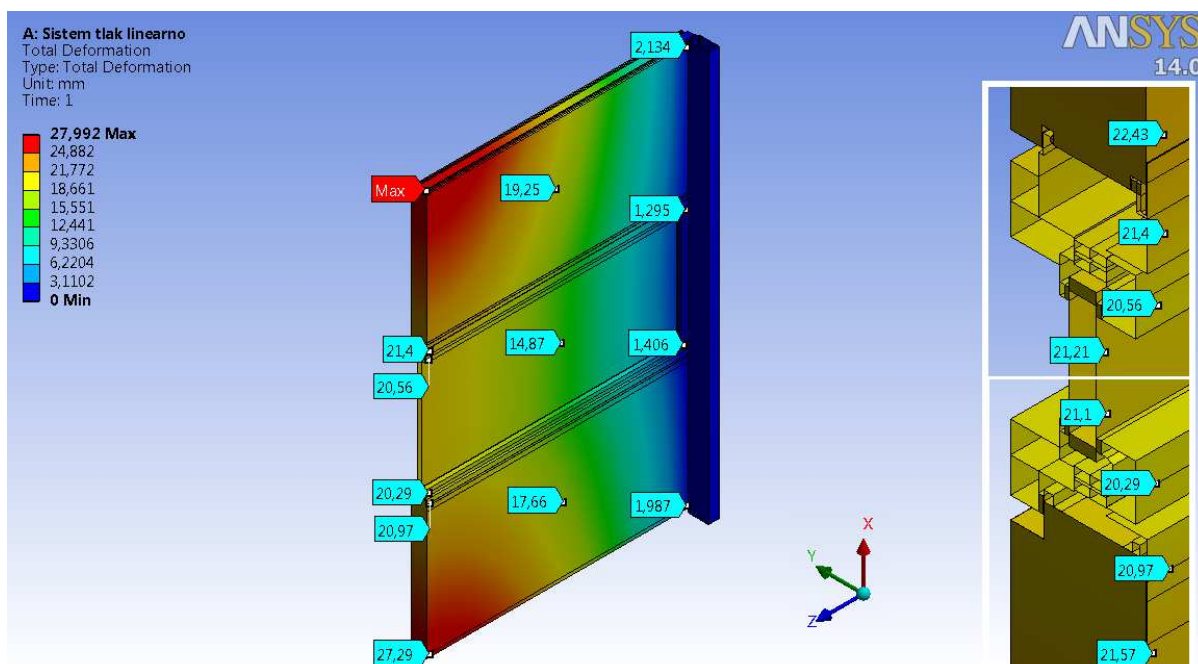


Slika 95: Prikaz obremenitve zaradi vetra - tlak

5.1.1 Pomiki



Slika 96: Pomiki na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - tlak

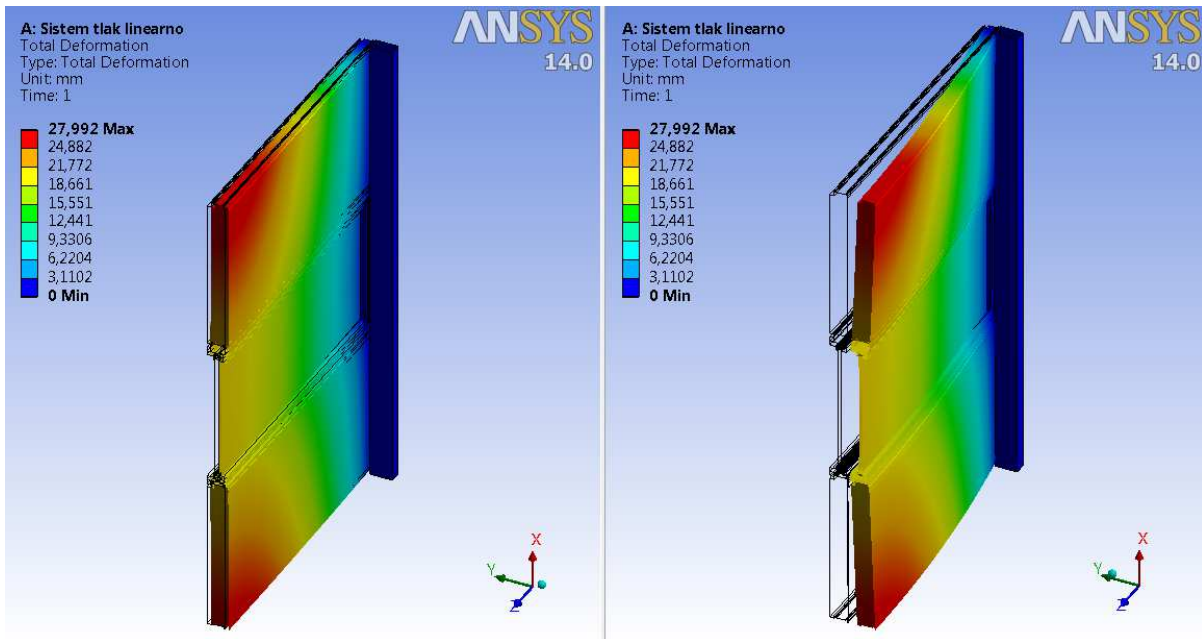


Slika 97: Pomiki na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - tlak

Kot je bilo pričakovati, so največji pomiki na osrednjem delu sistema na dolžini 2 m (slika 96). Na podlagi barvnega polja v legendi vidimo, da maksimalni pomik znaša 28,0 mm. Nahaja se na zgornjem vogalu zgoraj ležečega fasadnega elementa. Skoraj enak pomik (27,3 mm) je dosežen na spodnjem vogalu spodaj ležečega fasadnega elementa. Verjetno bi dobili na omenjenih mestih manjše pomike, če bi bili modelirani tudi sosednji fasadni elementi. Slednji bi nekoliko omejili pomike na vmesnih stikih v sistemu.

Pomiki so v splošnem večji na zunanji strani, saj deluje obtežba neposredno na zunanje površine konstrukcijskega sklopa. Na notranji strani so pomiki manjši zaradi raznosa obtežbe po kompozitni strukturi. Zelo majhni pomiki so v območju vpetja oziroma na mestu nosilnega vertikalnega elementa. Če gledamo pomike na fasadnem elementu in oknu, razberemo, da so pomiki na slednjem manjši od pomikov na panelu. To je nazorno vidno na 1 m dolžine. Na osrednjem delu sistema znaša največji pomik na okenskem okvirju okoli 21,7 mm (na skrajnem zgornjem robu), medtem ko znaša pomik stekla največ okoli 22,3 mm (na sredini).

Na sliki 98 je prikazana deformirana oblika sistema panel-okno-panel. Zaradi obremenitve vetra delujočega kot tlak na zunanje površine, se sistem pričakovano pomakne navznoter. Na levi strani slike je prikazana deformirana oblika v naravnem merilu, se pravi da je povečava 1,0, medtem ko je na desni strani slike prikazana deformirana oblika v povečanem merilu, kjer znaša povečava 6,6. Iz slednjega prikaza sta lepo vidna največja pomika v osrednjem delu na dolžini 2 m, in sicer na skrajnem zgornjem ter spodnjem vogalu fasadnih elementov (rdeče barvno polje). Razvidno je tudi, da je v območju okenskega okvirja manjši pomik. Slednje je posledica večje togosti aluminijastega okenskega okvirja od fasadnega elementa.

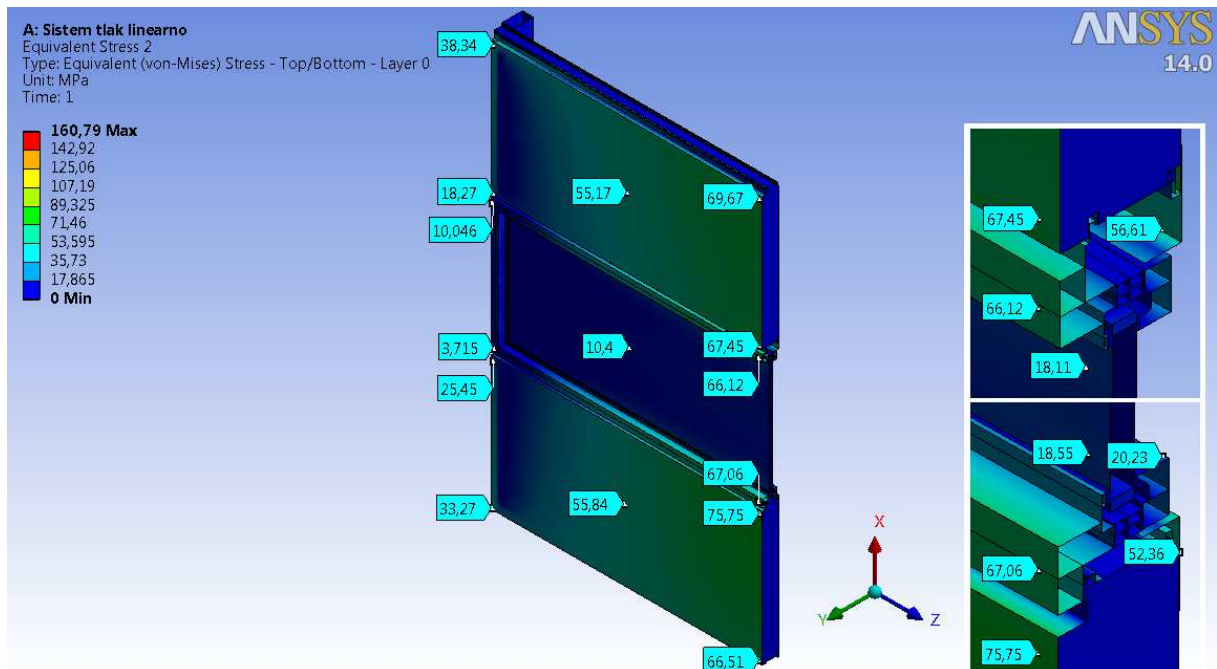


Slika 98: Prikaz deformirane oblike zaradi vetra - tlak (v naravnem in povečanem merilu)

Glede na obravnavano analizo, lahko iz slednjih podatkov zaključim, da je aluminijasti okenski okvir bolj tog od samega fasadnega elementa. Se pravi, da okenski element dobro prenaša obremenitev vetra in dodatno ne obremenjuje sosednjih fasadnih elementov. Verjetno botruje k temu tudi razvejana struktura okenskega okvirja. Se pravi, da je fasadni element tisti, v katerem se bodo prej pojavile šibke točke, predvsem na tanki profilirani pločevini.

5.1.2 Von Misesove napetosti

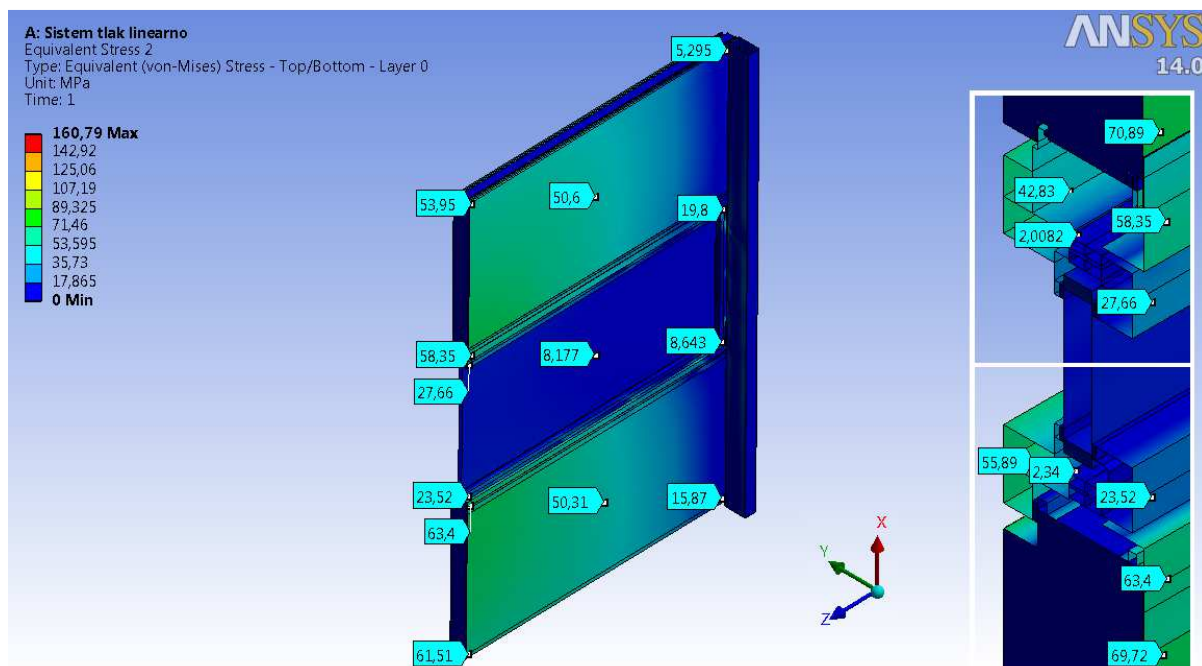
Iz slike 99, na kateri so prikazane von Misesove napetosti na zunanji površini obravnavanega sistema, lahko razberemo, da so največje napetosti v profilirani pločevini fasadnega panela, tako na zgornjem kot na spodnjem fasadnem elementu. Pri izvedenih laboratorijskih testih, izvršenih samo na fasadnih panelih, je bilo kritično mesto ravno v osrednjem delu panela, kjer je prišlo do gubanja tanke profilirane pločevine. Iz testov določena napetost gubanja pločevine za debelino panela 120 mm znaša 130 MPa (Test Qbiss One, 2012).



Slika 99: Von Misesove napetosti na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - tlak

Na desni strani slike 99 so prikazane napetosti na stiku okenskega okvirja s fasadnima paneloma. Iz tega detajla lahko razvidimo višje napetosti v pločevini fasadnega elementa kot na preostalih sestavnih elementih sistema panel-okno-panel. Najvišja tlačna napetost v pločevini zgoraj ležečega panela se nahaja v bližini okenskega okvirja in znaša 72,3 MPa, kar je manj od napetosti gubanja pločevine. V pločevini spodaj ležečega panela pa se najvišja tlačna napetost prav tako nahaja v bližini okenskega okvirja, s tem, da je nekoliko višja in znaša 75,8 MPa. Tako je tudi v pločevini spodaj ležečega fasadnega panela najvišja dosežena napetost manjša od napetosti gubanja pločevine (130 MPa). Približno na dolžini 1 m se napetosti v pločevini gibljejo okoli 55,0 MPa. Če pogledamo napetosti ob vpetju, lahko razberemo, da so tu napetosti v pločevini nekoliko manjše. Gibljejo se v območju 18,3 MPa - 38,3 MPa na zgoraj ležečem panelu in v območju 25,5 MPa - 33,3 MPa na spodaj ležečem panelu.

Iz poteka napetosti v osrednjem delu sistema je razvidno, da so napetosti v pločevini panela (75,8 MPa) višje od napetosti v aluminijastem okenskem okvirju, ki se gibljejo okoli 66,1 MPa na zgornjem delu in 67,1 MPa na spodnjem delu okvirja.



Slika 100: Von Misesove napetosti na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - tlak

Na notranji strani celotnega sistema so napetosti nekoliko manjše. Tu veter povzroča natezne napetosti, katere lahko primerjamo z napetostmi na meji tečenja materialov. Na sliki 100 desno sta prikazana oba stika okenskega okvirja s fasadnima elementoma na osrednjem delu sistema panel-okno-panel. Iz slednjega detajla lahko razberemo, da v L kotniku napetosti dosežejo vrednosti okoli 58,4 MPa zgoraj in 63,4 MPa spodaj, katere ne presežejo napetosti tečenja jekla kvalitete S235. Na nosilcu okenske odprtine so v splošnem napetosti višje za približno 30 do 38 MPa od vrednosti na okenskem okvirju. Največja napetost v L kotniku pa je dosežena ob vpetju. Višje napetosti v pločevini obeh panelov se pojavijo v bližini L kotnika in dosežejo vrednosti okoli 70,9 MPa ter 69,7 MPa. Te ne dosežejo napetosti tečenja jekla, ki znaša v tem primeru 280 MPa (Test Qbiss One, 2012). Najvišja vrednost napetosti v pločevini tako doseže zgolj dobrih 25 % vrednosti napetosti na meji tečenja jekla.

Velik padec napetosti na notranji strani je viden v okenskem okvirju, saj so tu za več kot polovico manjše napetosti kot na zunanji strani okvirja. Napetosti v zgornjem delu se gibljejo okoli 27,7 MPa, medtem ko se na spodnjem delu gibljejo okoli 23,5 MPa. Če slednje vrednosti primerjamo z napetostjo tečenja aluminija, ki znaša 120 MPa (Materialne lastnosti Aluminium Alloy 6063-T6, 2013), lahko ugotovimo, da so v okvirju dosežene napetosti manjše. To pomeni, da ne pride do nepovratnih deformacij aluminijastega okvirja. Najvišja napetost tako predstavlja zgolj 23 % napetosti tečenja aluminija. V plastiki, ki je sestavni del okenskega okvirja, so napetosti minimalne. Napetosti se gibljejo okoli 2,7 MPa in ne dosežejo napetosti tečenja poliamida, ki znaša 30 MPa (Materialne lastnosti PA66 GF 25, 2013).

Iz rezultatov je torej razvidno, da pri obremenitvi vetra, ki deluje kot tlak (3000 N/m^2), napetosti v pločevini fasadnega panela ne presežejo napetosti gubanja pločevine. V našem primeru na tem elementu dosežejo tlačne napetosti vrednost največ okoli 75,8 MPa. Prav tako ni dosežena napetost tečenja v elementih iz metalov in tudi ne v elementu iz poliamida. Izjema so vijaki, ki se plastificirajo.

Na splošno lahko iz slike 99 in slike 100 ugotovimo, da so najmanjše dosežene napetosti poleg vertikalnega nosilnega elementa v plastiki in steklu, ki sta sestavna elementa okna. Višje napetosti so na aluminijastem okenskem okvirju in L kotniku ter največje na pločevini fasadnega panela.

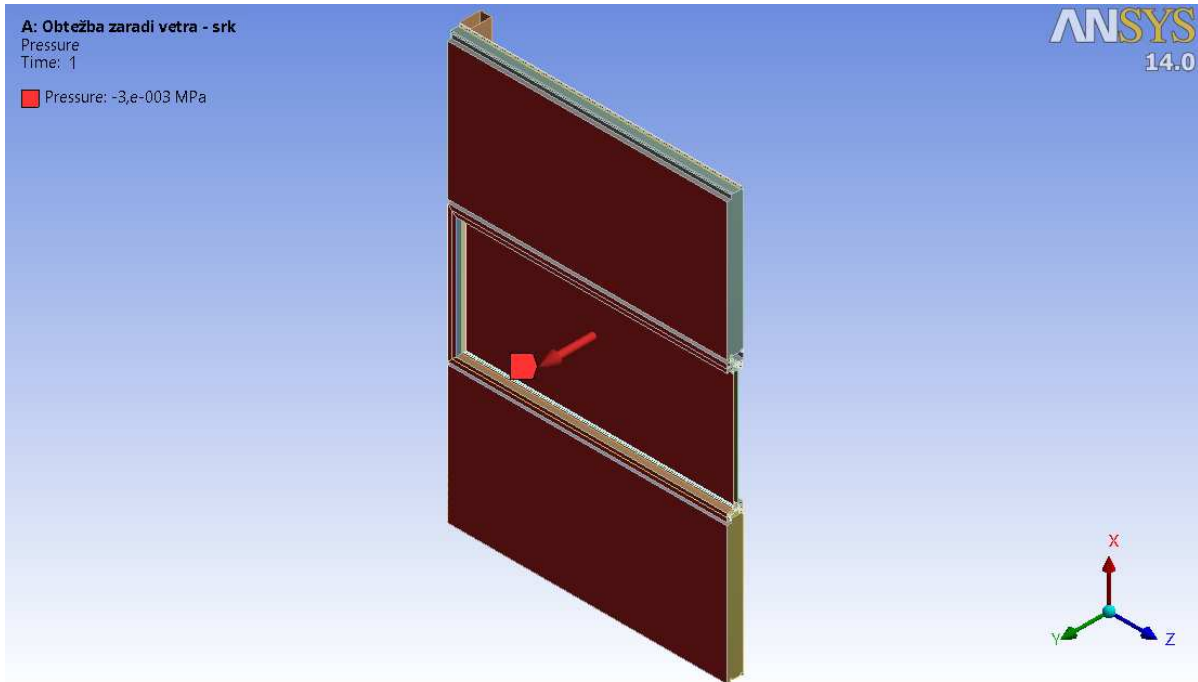
5.1.3 Glavne normalne napetosti

V steklu je največja glavna natezna napetost dosežena na notranji stekleni površini, in sicer v osrednjem delu sistema panel-okno-panel. Ta znaša 13,3 MPa. V območju vpetja, na zunanji stekleni površini, je dosežena največja glavna tlačna napetost 15,1 MPa (absolutna vrednost). V osrednjem delu fasadnega sistema se glavne tlačne napetosti gibljejo okoli 14,3 MPa (absolutna vrednost). Vrednosti ne presežejo upogibne trdnosti stekla (25 - 120 MPa) niti tlačne trdnosti stekla (700 - 900 MPa). Slednje materialne karakteristike so odvisne od vrste vgrajenega stekla (Grobovšek, 2013).

V volni se v osrednjem delu sistema panel-okno-panel glavne tlačne napetosti gibljejo okoli 0,004 MPa, na dolžini 1 m okoli 0,027 MPa in v območju vpetja okoli 0,043 MPa. V omenjenih območjih fasadnega panela vrednosti niso dosegle tlačne trdnosti volne, ki znaša 0,1 MPa (Popit s sod., 2003). Ob vpetju na notranji strani fasadnega sistema je na majhnem območju spodnjega vogala (spodaj ležeči panel) prekoračena tlačna nosilnost volne. Tu glavne tlačne napetosti znašajo okoli 0,16 MPa. Prav tako je na tem območju, vendar na zunanji strani panela, presežena strižna trdnost volne 0,068 MPa (Popit s sod., 2003). Strižne napetosti tu dosežejo vrednost okoli 0,11 MPa. Na preostalem območju panela so strižne napetosti nižje. V osrednjem delu fasadnega sistema dosežejo vrednosti okoli 0,0023 MPa, na dolžini 1 m znašajo okoli 0,026 MPa in v bližini vpetja okoli 0,045 MPa.

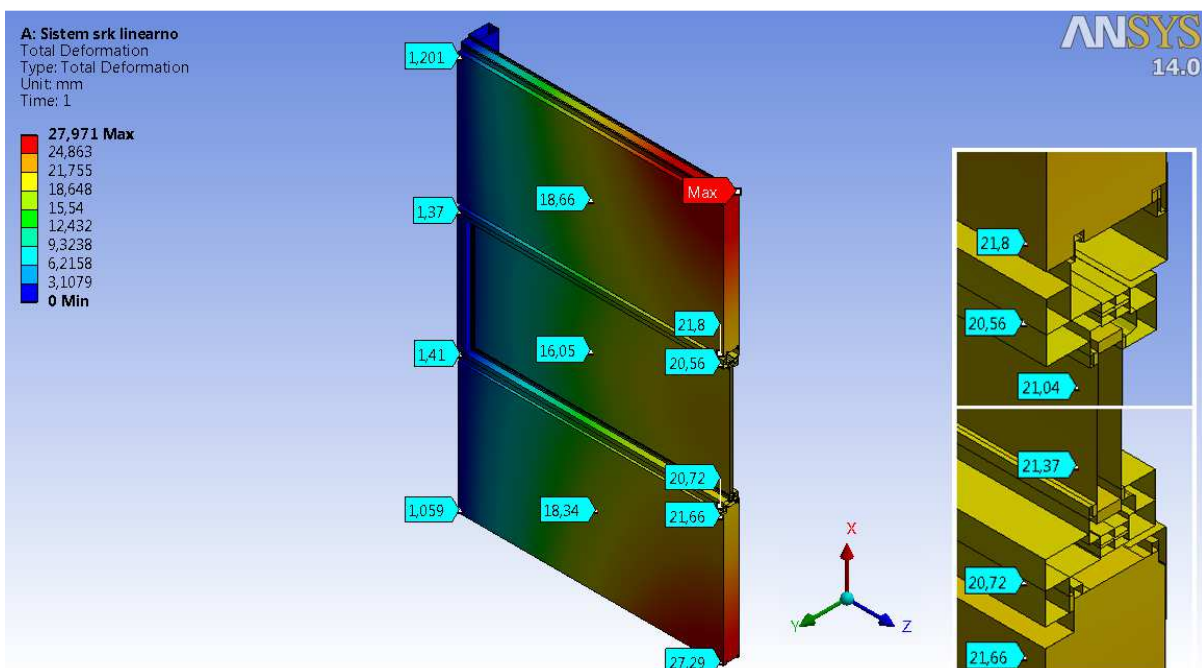
5.2 Obremenitev zaradi vetra – srk

Na sliki 101 je prikazana obremenitev zaradi vetra - srk. Usmerjen je stran od obremenjene ploskve in je negativnega predznaka. Vrednost obremenitve vetra znaša 3000 N/m^2 oziroma $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$. Kot je razvidno iz slike, deluje površinska obtežba v pozitivni Y smeri.



Slika 101: Prikaz obremenitve zaradi vetra - srk

5.2.1 Pomiki

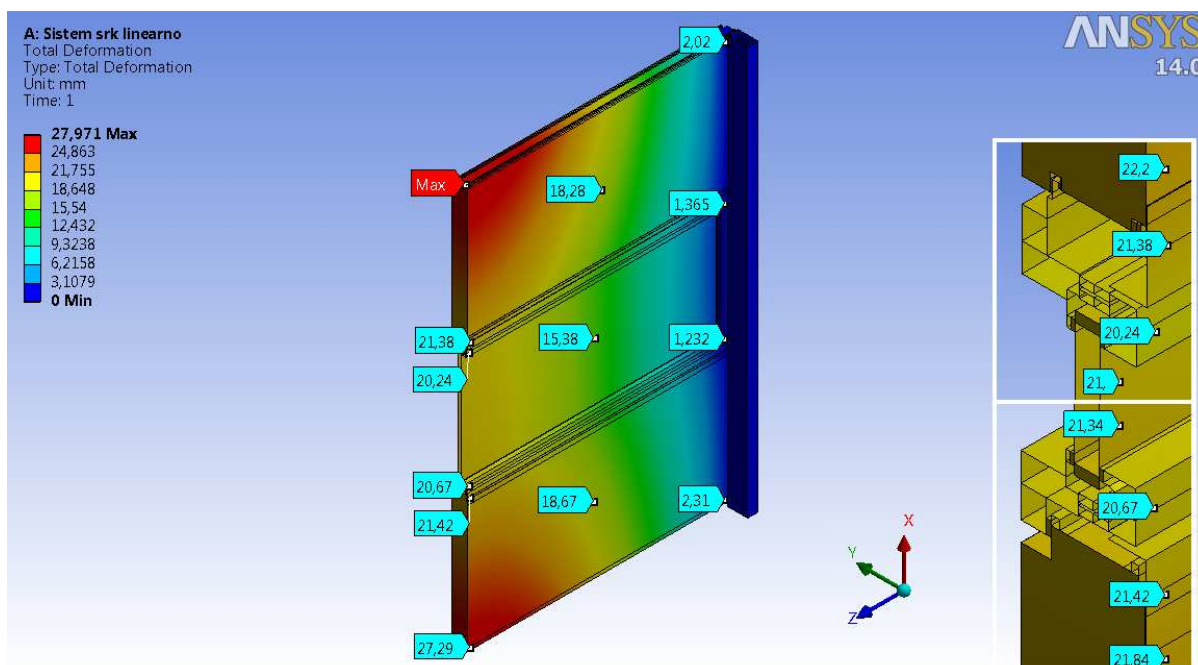


Slika 102: Pomiki na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - srk

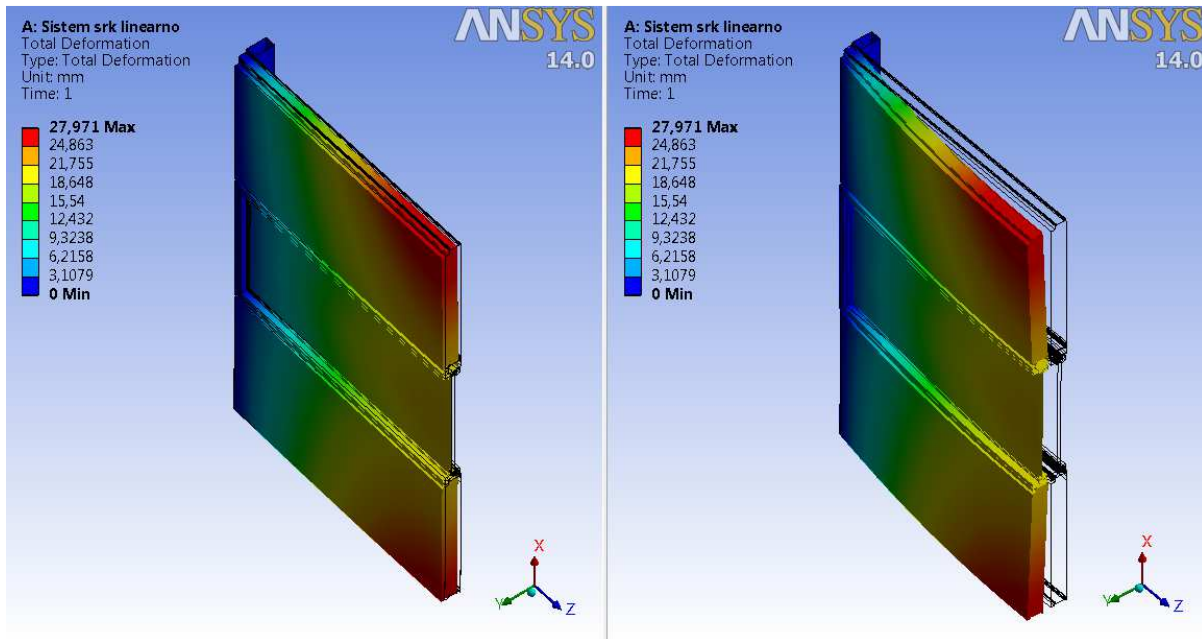
Na sliki 102 so prikazane vrednosti pomikov na zunanji strani obravnavanega sistema panel-okno-panel. Največje pomike je bilo pričakovati v polju, se pravi na osrednjem delu sistema na dolžini dveh metrov. Iz barvne sheme na sistemu (slika 102) je razvidno, da se najbolj premakneta fasadna panela v skrajnem zgornjem in spodnjem vogalu. Maksimalni pomik, ki je dosežen na zgoraj ležečem fasadnem panelu, je enak 28,0 mm. Skoraj enak pomik je dosežen na drugi strani na spodnjem panelu (27,3 mm). Iz detajla na sliki je razvidno, da so pomiki na stiku okenskega okvirja s fasadnima paneloma zelo podobni in se gibljejo v povprečju okoli vrednosti 21,0 mm. Na osrednjem delu sistema so na polovici višine obeh panelov doseženi pomiki okoli 25,0 mm. Na stekleni površini se največji pomik nahaja na sredini celotne dolžine fasadnega sistema, t.j. na 2 m in znaša približno 22,3 mm.

Iz slike 102 je razvidno, da so pomiki na aluminijastem okenskem okvirju (20,7 mm) za približno 1 mm manjši od pomikov na fasadnem elementu. So si pa pomiki na stiku zelo blizu in se gibljejo v povprečju okoli vrednosti 21,0 mm. Največji pomik na okenskem okvirju znaša okoli 20,75 mm, in sicer na spodnjem delu okvirja, kar je za le dobrih 7,0 mm manjši pomik od maksimalnega pomika na celotnem sistemu. Iz rezultatov je razvidno, da so na sredini sistema (pri 2 m) pomiki steklene površine večji kot na okvirju. To je pričakovano, saj okensko steklo ni togo vpeto v okvir in tudi tesnila zaradi svoje stisljivosti omogočajo minimalne pomike.

Iz slike 103 razberemo tudi, da se pomiki na nosilcu okenske odprtine minimalno razlikujejo (približno 1 mm) od pomikov na aluminijastem okenskem okvirju in panelu. So pa pomiki na fasadnem panelu večji od pomikov nosilca okenskega okvirja. To je lahko posledica tudi večje togosti okenskega okvirja zaradi same razvejane strukture. Iz slike 102 in slike 103 je razvidno, da so pomiki v območju vpetja seveda najmanjši.



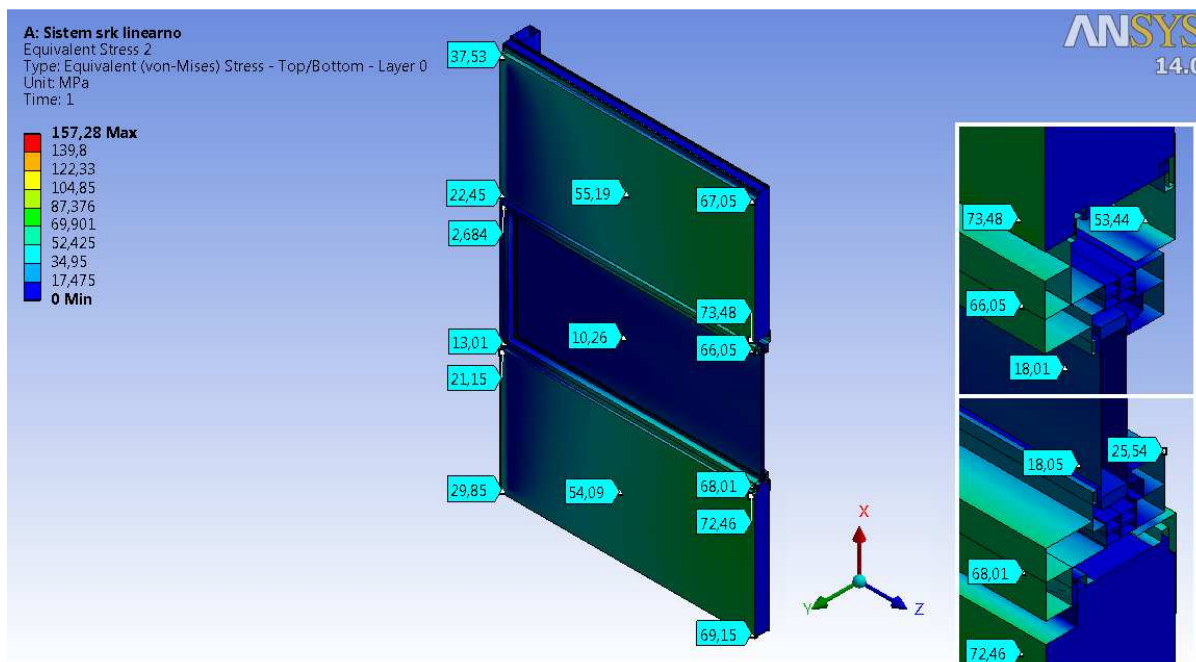
Slika 103: Pomiki na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra -srk



Slika 104: Prikaz deformirane oblike zaradi vetra - srk (v naravnem in povečanem merilu)

Na sliki 104 je prikazana deformirana oblika sistema panel-okno-panel. Zaradi obremenitve vetra - srk se sistem pričakovano pomakne navzven. Na levi sliki je prikazano deformiranje v naravnem merilu. To pomeni, da znaša povečava deformirane oblike 1,0. Na desni sliki pa je zaradi lažje predstave prikazano deformiranje v povečanem merilu pri povečavi 6,6. Iz slednje slike sta lepo vidna največja pomika, ki se nahajata na osrednjem delu (pri 2 m) na skrajnem zgornjem ter spodnjem vogalu celotnega sistema. Iz povečanega prikaza je razvidno tudi, da je v območju stika okenskega okvirja s fasadnima paneloma res manjši pomik glede na pomik v fasadnem elementu. To pomeni, da je na tem stikovanem delu sistem nekoliko bolj tog od skrajnih robov panela.

5.2.2 Von Misesove napetosti



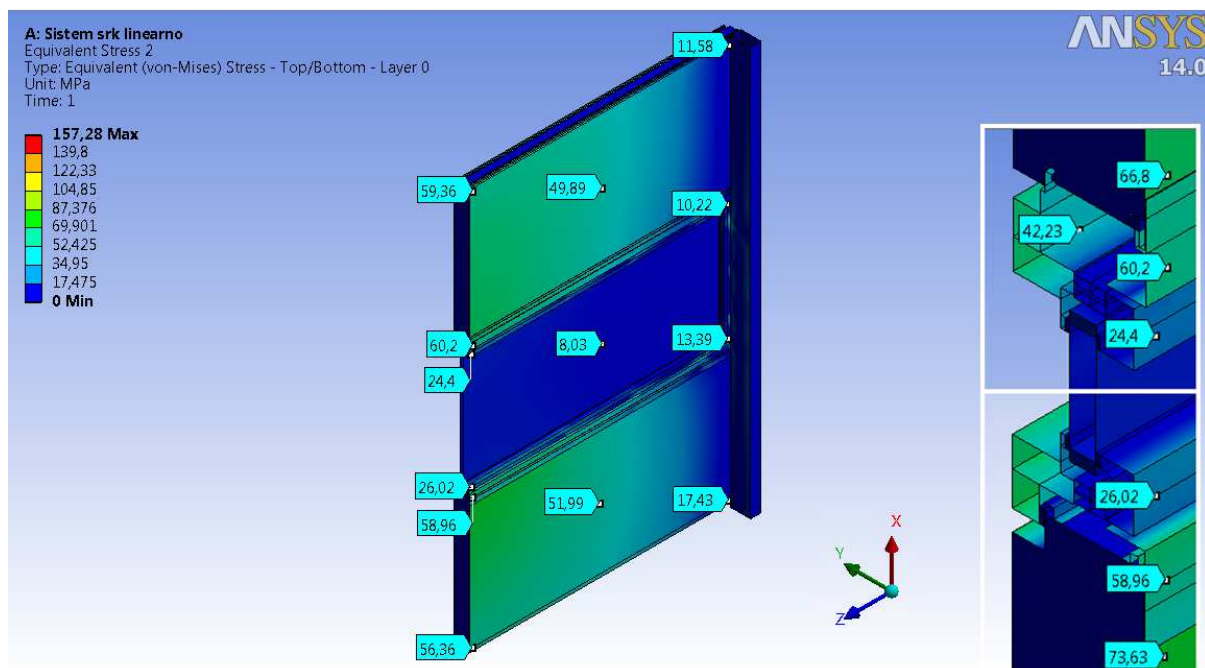
Slika 105: Von Misesove napetosti na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra -srk

V primeru obremenitve s srkom, so napetosti večje na zunanji strani sistema, kjer veter povzroča natezne napetosti. Iz slike 105 na kateri so prikazane von Misesove napetosti na zunanji strani obravnavanega sistema je razvidno, da so večje napetosti v profilirani pločevini fasadnega panela, tako na zgornjem kot na spodnjem elementu. Na desni strani slike je prikazan detajl obeh stikov okenskega okvirja s fasadnima paneloma na osrednjem delu sistema panel-okno-panel (na dolžini 2 m) z doseženimi napetostmi. Iz slednjega detajla lahko razberemo, da so največje napetosti dosežene v pločevini fasadnega panela. V pločevini zgoraj ležečega panela so dosežene največje napetosti 73,5 MPa, medtem ko je v pločevini spodaj ležečega panela dosežena napetost 74,6 MPa. Slednje vrednosti ne dosežejo napetosti tečenja jekla, ki v tem primeru znaša 280 MPa (Test Qbiss One, 2012). Največja vrednost predstavlja približno 26,6 % vrednosti napetosti tečenja jekla.

Na osrednjem delu celotnega sistema, se pravi na 2 m, je v aluminijastem okvirju dosežena največja napetost 66,8 MPa (zgornji del) in 70,3 MPa (spodnji del). Napetosti v okvirju ne dosežejo napetosti tečenja aluminija, ki znaša 120 MPa (Materialne lastnosti Aluminium Alloy 6063-T6, 2013), kar pomeni, da ne pride do nepovratnih deformacij aluminijastega okvirja. Kot je razvidno iz poteka napetosti v osrednjem delu sistema na sliki 105 desno, so napetosti v okvirju (66,1 MPa in 68,0 MPa) tudi manjše od napetosti v pločevini panela (72,5 MPa in 73,5 MPa), ki se nahajajo v bližini okenskega okvirja.

Največja dosežena napetost 2,7 MPa v plastiki prav tako ne doseže napetosti tečenja poliamida, ki znaša 30 MPa (Materialne lastnosti PA66 GF 25, 2013). Minimalne napetosti so torej dosežene v plastiki, ki je sestavni del okenskega okvirja, medtem ko so najmanjše Von Misesove napetosti dosežene v vertikalnem nosilnem elementu.

Iz rezultatov je bilo ugotovljeno, da v nobenem elementu sistema panel-okno-panel, ki je iz metalnega elementa ne pride do plastičnega tečenja. Izjema so le vijaki, ki se plastificirajo.



Slika 106: Von Misesove napetosti na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - srk

Iz slike 106 je razvidno, da so napetosti na notranji strani po celotnem območju nekoliko nižje kot na zunanji strani. Tu veter povzroča tlačne napetosti. Iz detajla na sliki desno ugotovimo, da so napetosti na notranji strani najvišje na osrednjem delu celotnega sistema, in sicer v pločevini fasadnega panela.

V pločevini zgoraj ležečega panela znaša najvišja tlačna napetost 66,8 MPa in v pločevini spodaj ležečega panela 73,6 MPa, ki so v bližini okenskega okvirja. Slednje vrednosti ne dosežejo napetosti gubanja pločevine, ki znaša 130 MPa. Višje napetosti so dosežene v pločevini spodaj ležečega panela. Prav tako so višje napetosti (60,2 MPa in 59,0 MPa) dosežene na nosilcu okenske odprtine. Iz detajla na sliki 106 lahko razberemo velik padec napetosti v okenskem okvirju, saj so napetosti na notranji strani okvirja (24,4 MPa in 26,0 MPa) za več kot polovico manjše od napetosti na zunanji strani okvirja (66,1 MPa in 68,0 MPa).

Na osrednjem delu sistema so višje napetosti v aluminijastem okenskem okvirju in L kotniku ter najvišje v pločevini fasadnega panela. Iz rezultatov je tudi razvidno, da pri obremenitvi vetra, ki deluje kot srk (3000 N/m^2), napetosti v pločevini fasadnega panela (73,6 MPa) ne presežejo napetosti gubanja pločevine 130 MPa. V povprečju so vrednosti von Misesovih napetosti v fasadnem elementu višje kot na preostalih elementih celotnega sistema.

5.2.3 Glavne normalne napetosti

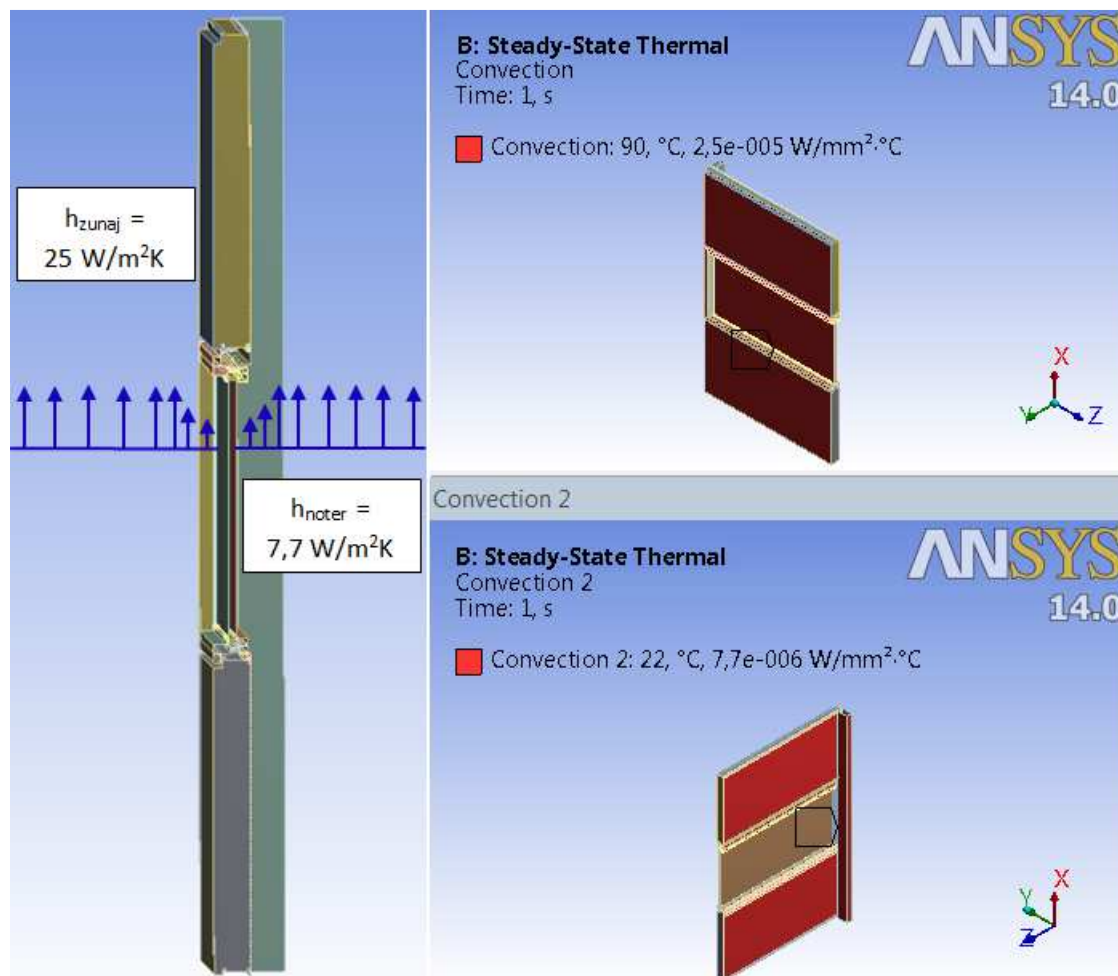
Največja glavna natezna napetost v steklu je dosežena v območju vpetja, in sicer na zunanji stekleni površini. Ta znaša 15,1 MPa. V osrednjem delu sistema panel-okno-panel (t.j. na 2 m) se glavne natezne napetosti gibljejo okoli 14,3 MPa. V tem območju (na 2 m) je dosežena največja glavna tlačna napetost 13,0 MPa (absolutna vrednost), in sicer na notranji stekleni površini. Dosežene vrednosti ne dosežejo upogibne (25 - 120 MPa (Grobovšek, 2013)) niti tlačne trdnosti (700 - 900 MPa (Grobovšek, 2013)) stekla.

V mineralni volni se v osrednjem delu sistema glavne tlačne napetosti gibljejo okoli 0,0033 MPa, na dolžini 1 m okoli 0,024 MPa in v območju vpetja okoli 0,022 MPa. Slednje vrednosti niso dosegle tlačne trdnosti volne, ki znaša 0,1 MPa (Popit s sod., 2003). Na spodnjem vogalu na zunanji strani spodaj ležečega panela pa so glavne tlačne napetosti, ki znašajo okoli 0,13 MPa presegle tlačno nosilnost mineralne volne. Strižne napetosti v volni se v osrednjem delu fasadnega sistema gibljejo okoli 0,002 MPa, na dolžini 1 m okoli 0,023 MPa in v bližini vpetja 0,056 MPa. Na zunanji strani panela ob vpetju je v spodnjem vogalu dosežena največja strižna napetost v volni, ki znaša 0,11 MPa. Ta preseže strižno trdnost volne, ki znaša 0,068 MPa (Popit s sod., 2003).

5.3 Obremenitev zaradi temperature

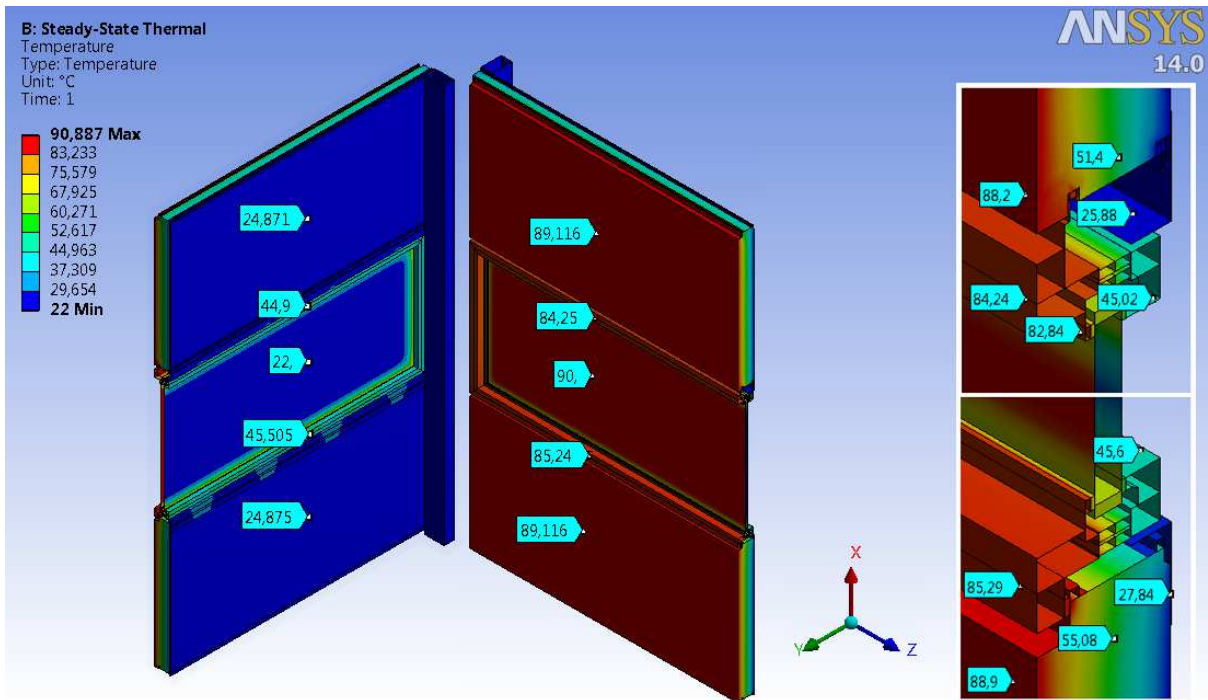
Za izvedbo statične analize zaradi temperaturne obremenitve, smo predhodno izvedli stacionarno toplotno analizo. To pomeni, da smo predpostavili, da se s časom temperaturna porazdelitev po sistemu ne spreminja. Prenos toplote skozi sestavljen konstrukcijski sklop se izvrši s kondukcijo. Zaradi gibanja zračnih delcev pa prihaja do prenosa toplote med površino konstrukcijskega sistema in zrakom ter obratno s konvekcijo. Površina konstrukcijskega sklopa ima običajno višjo ali nižjo temperaturo kot okoliški zrak. V programu je bilo potrebno podati koeficiente toplotne prestopnosti h (enota je W/m^2K), ki so prikazani na sliki 107. Na zunanji strani je toplotna prestopnost višja zaradi povečanega prehoda toplote z učinkovanjem vetra v termični mejni plasti, intenzivnejšega strujanja zraka, večje višine stene itd. Podali smo tudi referenčno temperaturo, ki znaša 22 °C ter vrednosti toplotne prevodnosti za vse materiale, ki se nahajajo v konstrukcijskem sklopu.

Dokument EN 14509: Revision 1 (2012) navaja, da se pločevina temnih barv na zunanji strani segreje tudi na temperaturo 90°C. Namesto da bi predpisali temperaturo zunaje površine sistema, smo podali temperaturo zraka na zunanji strani, in sicer 90 °C, in temperaturo notranjega zraka 22 °C. Tako smo dobili primer, ko se vse površine fasadnih elementov na južni ali zahodni strani zaradi temnih barv segrejejo na zelo visoke temperature. Predpostavili smo tudi, da je steklo zatemnjeno, tako da se tudi ta površina lahko segreje na zgoraj določeno temperaturo. Zavedamo se, da gre za zelo grobe predpostavke in da bi bilo potrebno natančneje določiti vhodne podatke za stacionarno analizo, zato tudi rezultate vzamemo kot grob približek realnemu stanju v sistemu zaradi ekstremne zunanje temperature.

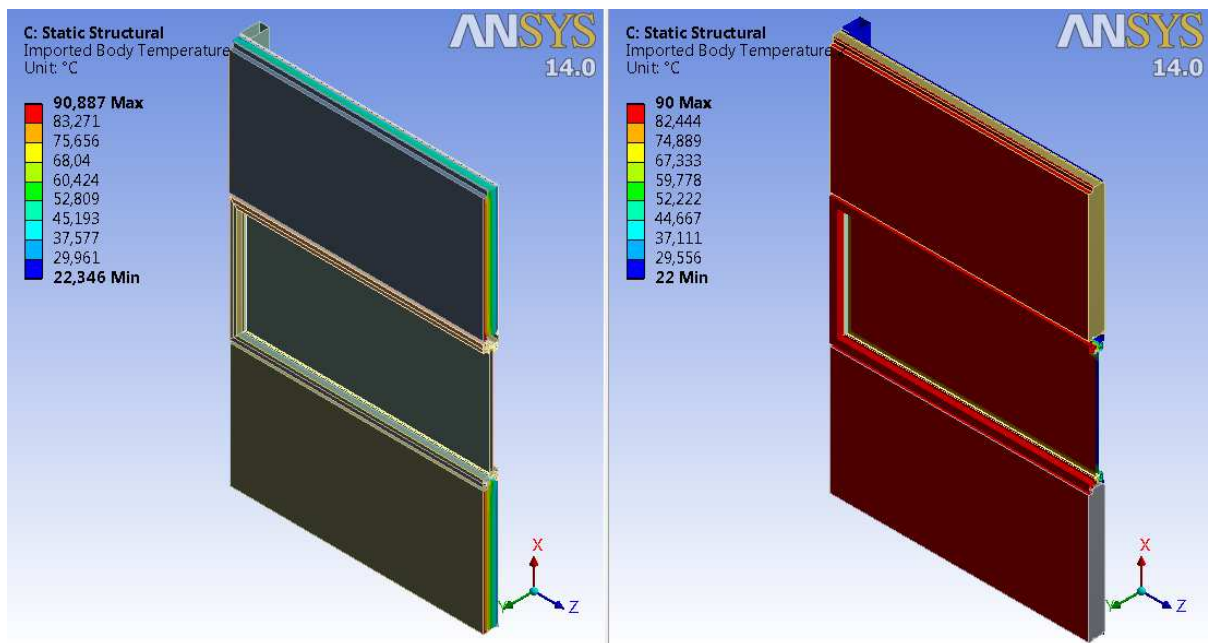


Slika 107: Vhodni podatki pri stacionarni toplotni analizi

Na sliki 108 je prikazana razporeditev temperature po konstrukcijskem sistemu. Na zunanji strani je na pločevini fasadnega elementa dosežena temperatura okrog 89,1 °C. Na aluminijastem okenskem okvirju pa je dosežena nekoliko nižja temperatura, okrog 84,3 °C in 85,2 °C. Zaradi nizkega koeficienta toplotne prevodnosti mineralne volne doseže pločevina panela na notranji strani temperaturo okrog 24,9 °C. Jekleni nosilec okenske odprtine doseže temperaturo okrog 25,9 °C, medtem ko aluminijasti okenski okvir doseže temperaturo okrog 45,6 °C (detajl na sliki 108), saj ima aluminij zelo visoko toplotno prevodnost. Na zunanjem steklu je dosežena temperatura 90°C, medtem ko je na notranjem steklu dosežena temperatura 22 °C.



Slika 108: Stacionarna toplotna analiza - razporeditev temperature po sistemu panel-okno-panel



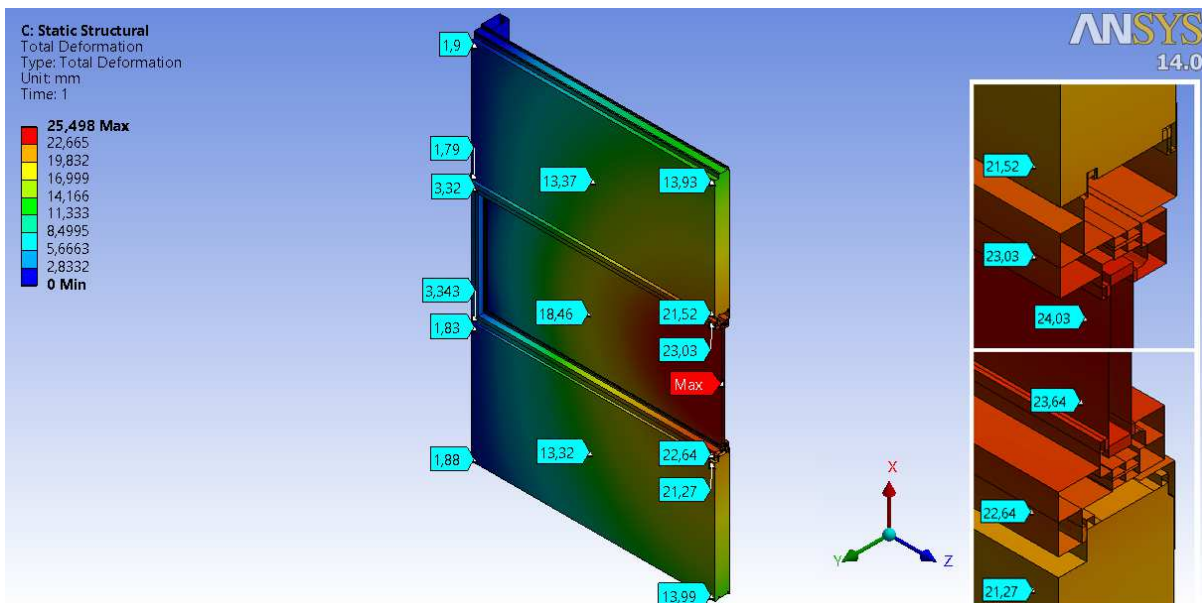
Slika 109: Obremenitev zaradi temperature pridobljena s stacionarno toplotno analizo

Za izvršitev statične analize je bilo potrebno temperature vnesti posebej za telesa in posebej za lupinaste elemente. Slednje je prikazano na sliki 109.

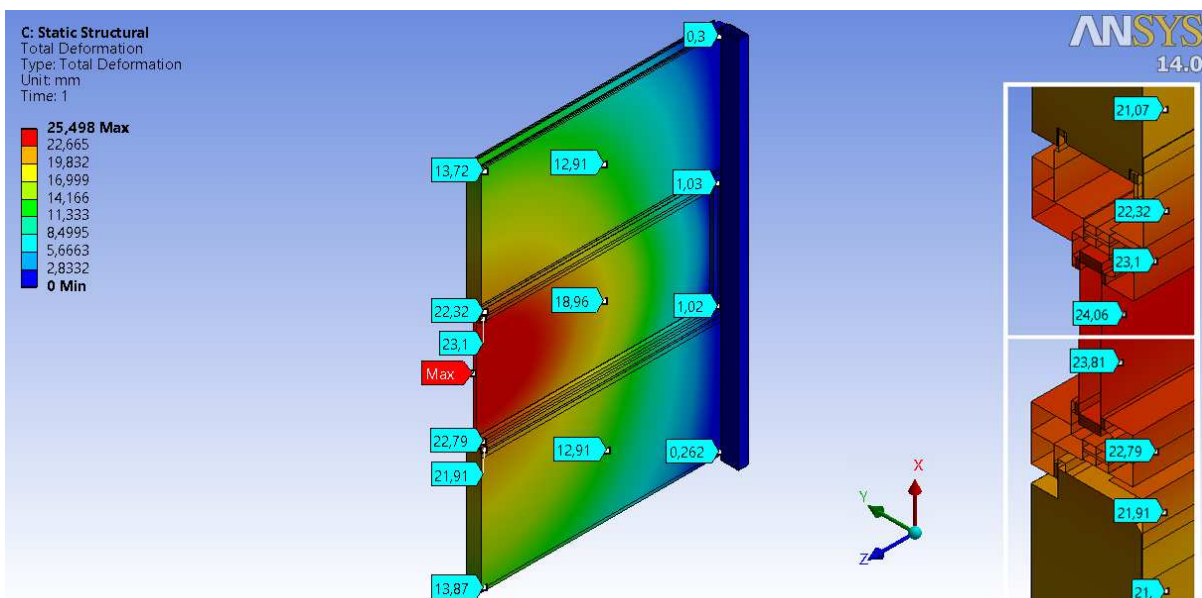
5.3.1 Pomiki

Pri obremenitvi zaradi temperature se pojavi koncentracija največjih pomikov v osrednjem delu sistema, kar je razvidno na sliki 110. Tu znaša največji pomik 25,5 mm na sredini višine steklene površine. Pomiki se koncentrično zmanjšujejo navzven okoli mesta največjih pomikov. Pričakovano so doseženi najmanjši pomiki ob vpetju sistema. Iz slike lahko razvidimo, da so pomiki na zgornjem panelu (21,5 mm) in spodnjem panelu (21,3 mm) manjši kot na okenskem elementu (23,0 mm in 22,6 mm). Na zunanjem vogalu zgoraj in spodaj ležečega panela je pomik manjši in znaša okoli 14,0 mm.

Na desni strani slike 110 je prikazan detajl, kjer so prikazani pomiki v osrednjem delu sistema, in sicer na stiku okenskega okvirja s fasadnima paneloma. Izkaže se, da se zaradi toplotnega vpliva, ki deluje na sistem, okno bolj deformira. Tu so doseženi največji pomiki, kar se razvidi tudi iz vrednosti prikazanih na detajlu.



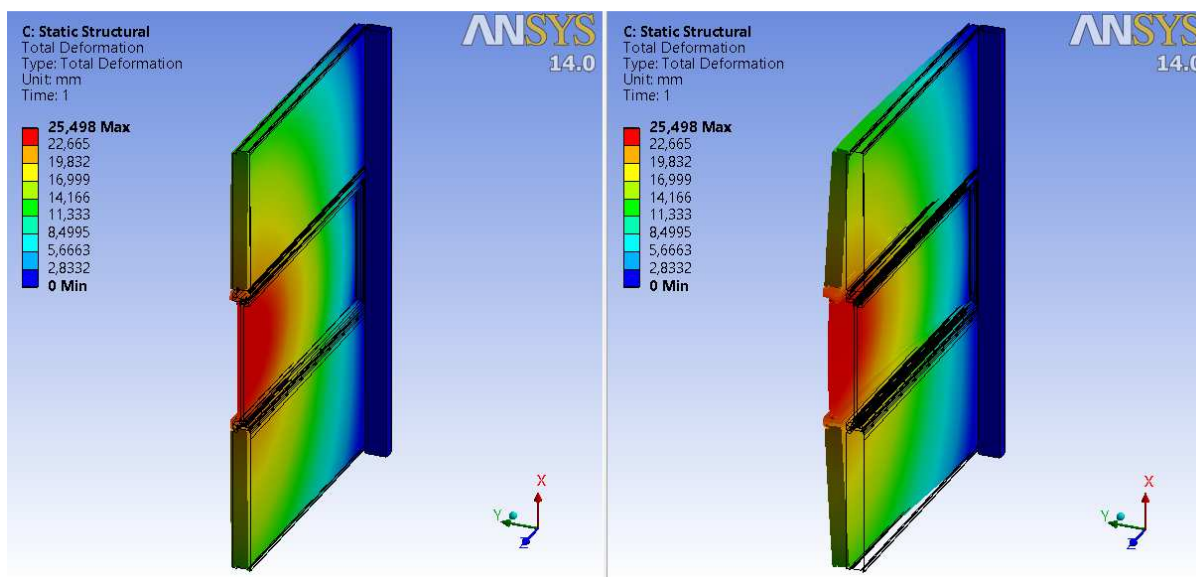
Slika 110: Pomiki na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi temperature



Slika 111: Pomiki na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi temperature

Na desni strani slike 111 so nazorneje prikazani pomiki na fasadnem elementu, okenskemu okvirju in jeklenemu nosilcu, in sicer v osrednjem delu celotnega sistema panel-okno-panel. Iz slednjega detajla lahko razberemo, da so pomiki na fasadnem panelu (okoli 21,0 mm) glede na okenski element manjši. Prav tako je razvidno, da so pomiki na aluminijastem okvirju večji (23,1 mm in 22,8 mm), kot na nosilcu okenske odprtine (22,3 mm in 21,9 mm).

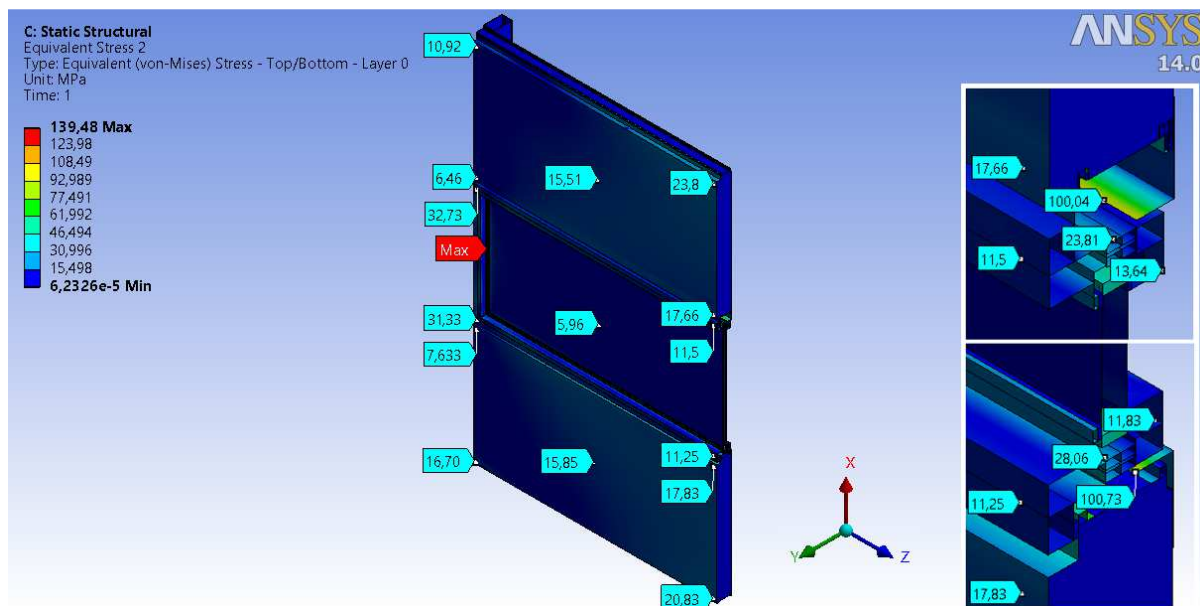
Na naslednji sliki 112 je prikazana deformirana oblika sistema panel-okno-panel. Na levi strani je prikazano dejansko deformiranje sistema, kjer ni skale povečave saj znaša faktor 1,0. Na desni strani slike pa je za nazornejšo predstavo prikazano deformiranje sistema, kjer znaša skala povečave 7,2. Tako je dobro vidno izbočenje okenskega elementa navzven, kjer znaša tudi največji pomik 25,5 mm. Iz deformirane oblike je pri temperaturni obremenitvi torej razvidno, da okenski okvir dodatno obremenjuje fasadna panela. Razumljivo je, da so pomiki največji v osrednjem delu sistema, saj so ob vpetju preprečeni oziroma omejeni pomiki.



Slika 112: Prikaz deformirane oblike zaradi temperaturne obremenitve (v naravnem in povečanem merilu)

Ko pomike analiziramo glede na lastnosti materiala, kot je koeficient temperaturnega raztezka, lahko ugotovimo, da ima največji koeficient $8,5 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ ravno steklo, v katerem so doseženi največji pomiki. Iz pregledanih rezultatov analize je bilo možno razbrati pomike tudi v plastičnem profilu, kateremu je definiran koeficient temperaturnega raztezka za poliamid, ki znaša $7,0 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. Na slednjem elementu, ki je sestavni del okenskega okvirja, je na zgornjem delu dosežen največji pomik 23,2 mm. Glede na primerjavo koeficientov temperaturnega raztezka obeh materialov lahko potrdimo ustreznost izračunanih pomikov, saj je maksimalni pomik na steklu večji od maksimalnega pomika na plastičnem profilu zaradi višje vrednosti temperaturnega raztezka stekla. Najmanjši koeficient temperaturnega raztezka $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ pa pripada mineralni volni in jeklu. Na podlagi tega podatka lahko sami sklepamo, da so najmanjši pomiki pričakovani v fasadnem panelu, kar potrjuje tudi izvedena analiza. Malo večji faktor temperaturnega raztezka ima aluminij, ki znaša $2,35 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, zato so tudi pomiki v aluminijstem okvirju večji od pomikov na fasadnem panelu ali jeklenemu nosilcu okenske odprtine.

5.3.2 Von Misesove napetosti



Slika 113: Von Misesove napetosti na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi temperature

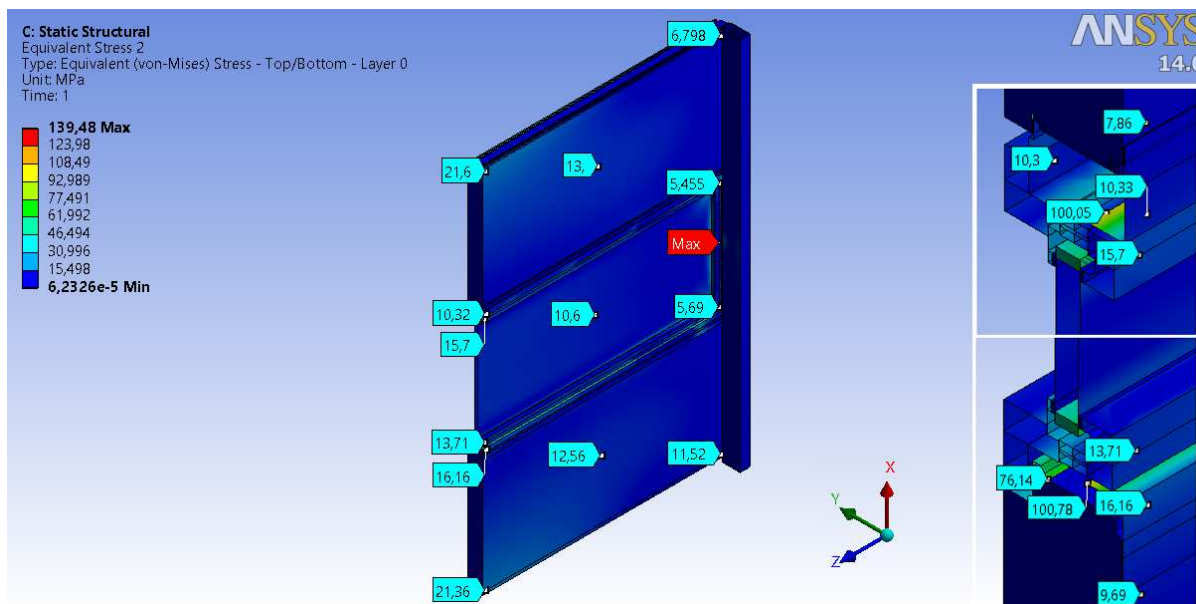
Na sliki 113 so prikazane von Misesove napetosti na zunanji strani fasadnega sistema. Tu obremenitev zaradi temperature povzroča natezne napetosti. Iz slike lahko opazimo, da so na osrednjem delu večje natezne napetosti dosežene v pločevini fasadnih panelov kot v ostalih elementih. Na osrednjem delu sistema panel-okno-panel je največja napetost dosežena v pločevini zgoraj ležečega panela in znaša 23,8 MPa. Na nasprotni strani, se pravi v pločevini spodaj ležečega panela pa je največja napetost nekoliko nižja, in sicer znaša 20,8 MPa. V bližini okenskega okvirja so dosežene napetosti okoli 17,8 MPa tako v zgornji kot v spodnji pločevini. Če pogledamo napetosti na dolžini 1 m, lahko vidimo, da so napetosti nižje, saj se gibljejo okoli vrednosti 15,5 MPa in 15,9 MPa. Ob vpetju pa so napetosti v območju od 6,5 MPa do 16,7 MPa. Izkaže se, da napetosti v pločevini ne dosežejo napetosti tečenja jekla, ki je 280 MPa (Test Qbiss One, 2012).

Iz slike 113 je razvidno, da so napetosti v okenskem okvirju višje ob vpetju, na levi strani sistema. Tu napetosti dosežejo vrednost 32,7 MPa, medtem ko so napetosti na osrednjem delu precej nižje in dosežejo vrednosti okoli 11,5 MPa. Slednje vrednosti v aluminijastem okenskem okvirju ne dosežejo napetosti tečenja za aluminij, ki znaša 120 MPa, kar pomeni, da ne pride do nepovratnih deformacij okvirja.

Manjše napetosti so dosežene tudi v plastiki, ki je sestavni del okenskega okvirja, vendar se največja dosežena napetost 29,3 MPa zelo približa napetosti tečenja poliamida, ki znaša 30 MPa (Materialne lastnosti PA66 GF 25, 2013). Najmanjše napetosti so dosežene v vertikalnem nosilnem elementu.

Na desni strani slike 113 kjer je prikazan detajl obeh stikov okvirja s fasadnima paneloma (na dolžini 2 m) lahko razberemo, da so najvišje napetosti na osrednjem delu sistema dosežene v zgornjem in spodnjem nosilcu okenske odprtine, ki znašajo največ 100,7 MPa. Ob vpetju pa je v nosilcu okenske odprtine dosežena najvišja napetost, ki znaša 139,5 MPa (na sliki 113 označeno z Max) in se nahaja na polovici višine L kotnika. Izkaže pa se, da so napetosti tudi tu nižje od napetosti tečenja uporabljenega jekla, katerega kvaliteta znaša S235.

V nadaljevanju so na sliki 114 prikazane von Misesove napetosti na notranji strani fasadnega sistema.



Slika 114: Von Misesove napetosti na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi temperature

V pločevinah obeh panelov sta doseženi največji napetosti na osrednjem območju. V pločevini zgoraj ležečega panela je dosežena najvišja napetost 21,6 MPa, v pločevini spodaj ležečega panela je napetost skoraj enaka in znaša 21,4 MPa. Na sredini panela se napetosti v pločevini gibljejo okoli 13,0 MPa. Na podlagi napetosti v pločevini obeh fasadnih elementov lahko ugotovimo, da v pločevini fasadnega panela zaradi toplotnih vplivov ni dosežena napetost gubanja pločevine, ki znaša 130 MPa.

Iz obeh detajlov na sliki 113 in sliki 114 lahko ugotovimo, da so v osrednjem delu napetosti na okvirju višje na notranji strani (okoli 15,7 MPa in 13,7 MPa) kot na zunanji (11,5 MPa in 11,3 MPa).

Iz rezultatov je bilo ugotovljeno, da v nobenem elementu obravnavanega fasadnega sistema panel-okno-panel, ki je iz metalnega elementa ne pride do plastičnega tečenja. V plastičnem elementu pa se napetosti približajo meji tečenja poliamida. Izjema so vijaki, ki se plastificirajo.

5.3.3 Glavne normalne napetosti

Na zunanji stekleni površini je v območju vpetja (na 2 m) dosežena največja glavna natezna napetost, ki znaša 23,9 MPa. Prav tako je v območju vpetja dosežena največja glavna tlačna napetost, vendar na notranji stekleni površini. Ta znaša 32,1 MPa (absolutna vrednost). Dosežene vrednosti ne dosežejo upogibne 25 - 120 MPa (Grobovšek, 2013) niti tlačne trdnosti 700 - 900 MPa (Grobovšek, 2013) stekla.

V volni je dosežena največja glavna tlačna napetost 0,078 MPa. Nahaja se na spodnjem vogalu spodaj ležečega fasadnega panela (notranja stran sistema), in sicer v območju vpetja. Slednja vrednost ne preseže tlačne trdnosti volne, ki znaša 0,1 MPa (Popit s sod., 2003). V splošnem so glavne tlačne napetosti povzročene zaradi temperaturne obremenitve majhne. V osrednjem delu se gibljejo glavne tlačne napetosti v območju 0,0006 - 0,005 MPa.

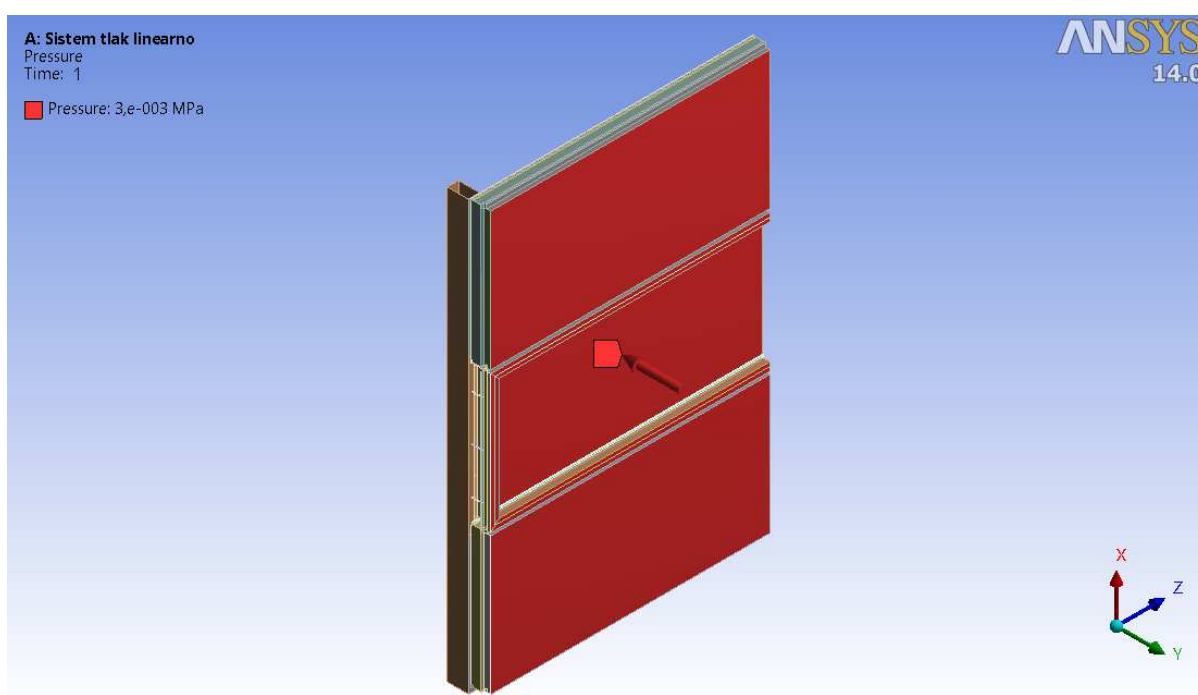
Prav tako v mineralni volni ni prekoračena strižna trdnost, ki znaša 0,068 MPa (Popit s sod., 2003). Največja strižna napetost 0,037 MPa se nahaja na zgornjem fasadnem panelu, in sicer v območju zgornjega vogala ob vpetju (zunanja stran sistema panel-okno-panel). Strižne napetosti v osrednjem delu sistema (na 2 m) se gibljejo v območju 0,00066 MPa - 0,009 MPa. Na dolžini 1 m so dosežene največje strižne napetosti okoli 0,0043 MPa in v bližini vpetja 0,012 MPa.

6 LINEARNA UKLONSKA ANALIZA

V tem poglavju prikažemo rezultate linearne uklonske analize. Linearna uklonska analiza določi teoretično uklonsko nosilnost geometrijsko in materialno idealne elastične konstrukcije.

6.1 Obremenitev zaradi vetra – tlak

Na sliki 115 je prikazana obremenitev zaradi vetra - tlak (3000 N/m^2), ki se je upoštevala pri izvedbi linearne uklonske analize.



Slika 115: Obremenitev zaradi vetra - tlak

6.1.1 Uklonski faktorji in uklonske oblike

Primer linearne uklonske analize je bil v programu ANSYS ustvarjen iz primera za linearno statično analizo. Uporabili smo iste podatke, kot so lastnosti materialov, geometrija, mreža končnih elementov in ostalo. Izračunali smo prvih 40 uklonskih faktorjev, saj nas je zanimalo ali se bodo uklanjali različni deli konstrukcijskega sklopa ali pa bo prihajalo do uklona zgolj v enem elementu. V preglednici 13 so prikazane numerične vrednosti za prvih 10 uklonskih faktorjev.

Preglednica 13: Uklonski faktorji zaradi obremenitve vetra - tlak

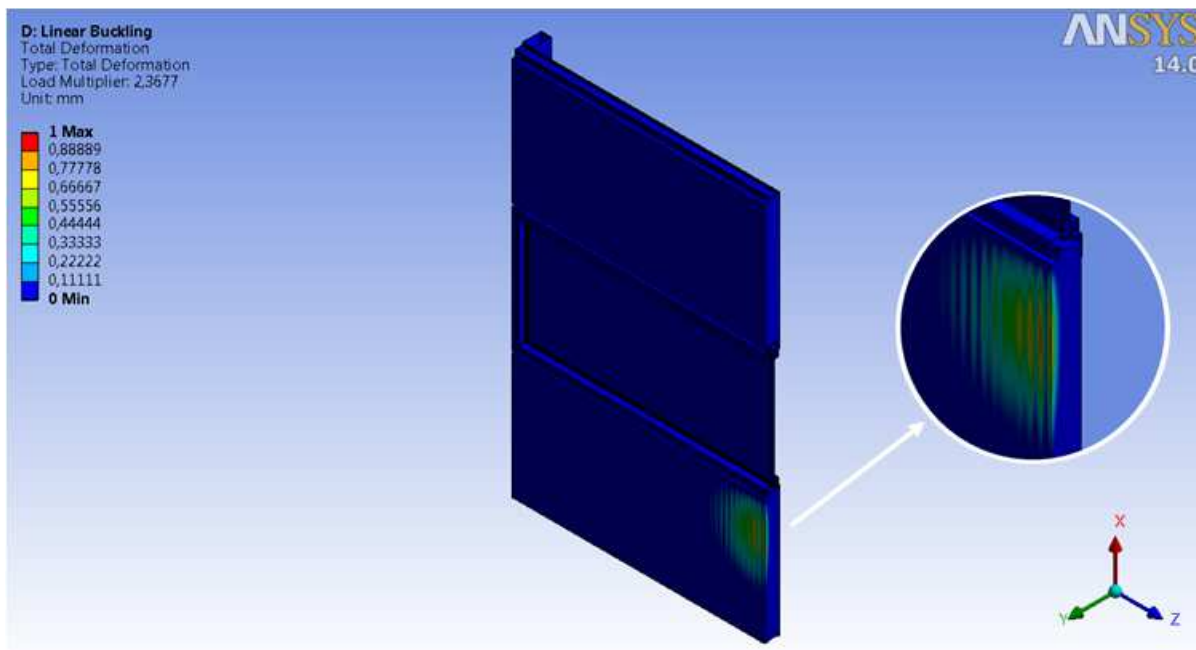
Uklonska oblika	Uklonski faktor	Uklonska oblika	Uklonski faktor
1	2,3677	6	2,416
2	2,3859	7	2,4319
3	2,3897	8	2,4345
4	2,4076	9	2,4355
5	2,412	10	2,4364

Rezultati linearne uklonske analize so uklonski faktorji. Če z najmanjšim od njih pomnožimo vrednost nanešene obtežbe, dobimo kritično uklonsko obtežbo, pri kateri bi se v geometrijsko in materialno idealni konstrukciji zgodil uklon. Vse ostale uklonske obtežbe, ki pripadajo 2, 3, itd. uklonski obliki, so večje od kritične.

Izračuni kritične in ostalih uklonskih obtežb so podani v nadaljevanju. Vsak uklonski faktor ima pripadajočo uklonsko obliko. Kritična uklonska obtežba je povezana s 1. uklonsko obliko, pri kateri znaša uklonski faktor 2,3677. To pomeni, da pride do uklona pri obtežbi:

$$P_{cr,1,KE} = \lambda_{cr,1,KE} \cdot P = 2,3677 \cdot 3000 N/m^2 = 7103,1 N/m^2 \quad (13)$$

Uklonske oblike, ki jih dobimo ob obremenitvi zaradi vetra - tlak, so slikovno prikazane v nadaljevanju, in sicer samo prve tri. Iz rezultatov je razvidno, da se v vseh treh primerih ukloni pločevina fasadnega panela. Na sliki 116 je prikazana 1. uklonska oblika, za katero je izračunan uklonski faktor 2,3677. Vidimo, da se uklon pojavi v osrednjem delu spodnjega fasadnega elementa, kjer pločevina vzvalovi oziroma pride do lokalnega izbočenja pločevine. Uklonski tlačni napetosti v pločevini spodaj ležečega panela (zunanja stran sistema), ki ju določimo na podlagi doseženih napetosti pri linearno elastični analizi, znašata: von Misesova 179,5 MPa in glavna 181,1 MPa. Izkaže se, da je izračunana teoretična uklonska tlačna napetost, pri kateri pride do uklona pločevine, za 39 % višja od dejanske izmerjene napetosti (130 MPa) (Test Qbiss One, 2012), pri kateri pride do gubanja pločevine v panelu.

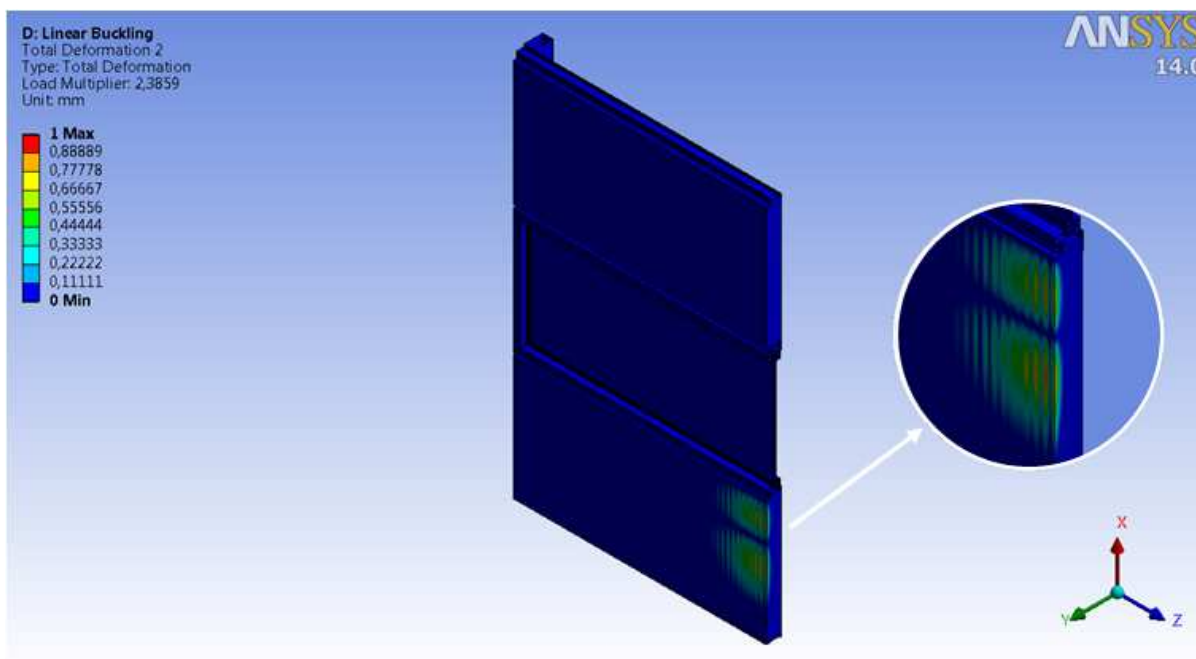


Slika 116: Prikaz 1. uklonske oblike zaradi obremenitve vetra - tlak

V nadaljevanju je na sliki 117 prikazana 2. uklonska oblika za katero je izračunan uklonski faktor 2,3859. To pomeni, da pride do nestabilnosti pri obtežbi:

$$P_{cr,2,KE} = \lambda_{cr,2,KE} \cdot P = 2,3859 \cdot 3000 N / m^2 = 7157,7 N / m^2 \quad (14)$$

Opazimo lahko, da se nestabilnost zopet pojavi na spodnjem fasadnem elementu, kjer prav tako pride do lokalnega izbočenja pločevine v osrednjem delu sistema, in sicer v širšem območju. Opazimo lahko le, da je tu nestabilnost bolj izrazita v dveh ločenih območjih.

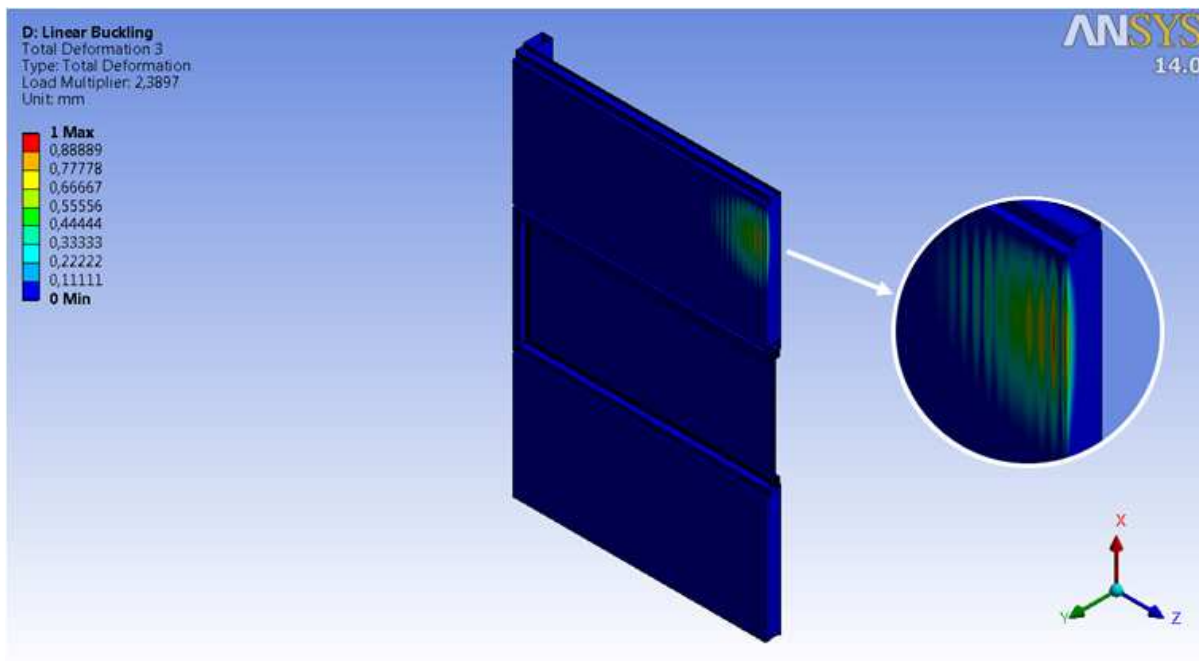


Slika 117: Prikaz 2. uklonske oblike zaradi obremenitve vetra - tlak

Spodaj na sliki 118 pa je prikazana 3. uklonska oblika. Pri slednji je izračunan uklonski faktor 2,3897, kar pomeni, da pride do nestabilnosti pri obtežbi:

$$P_{cr,3,KE} = \lambda_{cr,3,KE} \cdot P = 2,3897 \cdot 3000 \text{ N/m}^2 = 7169,1 \text{ N/m}^2 \quad (15)$$

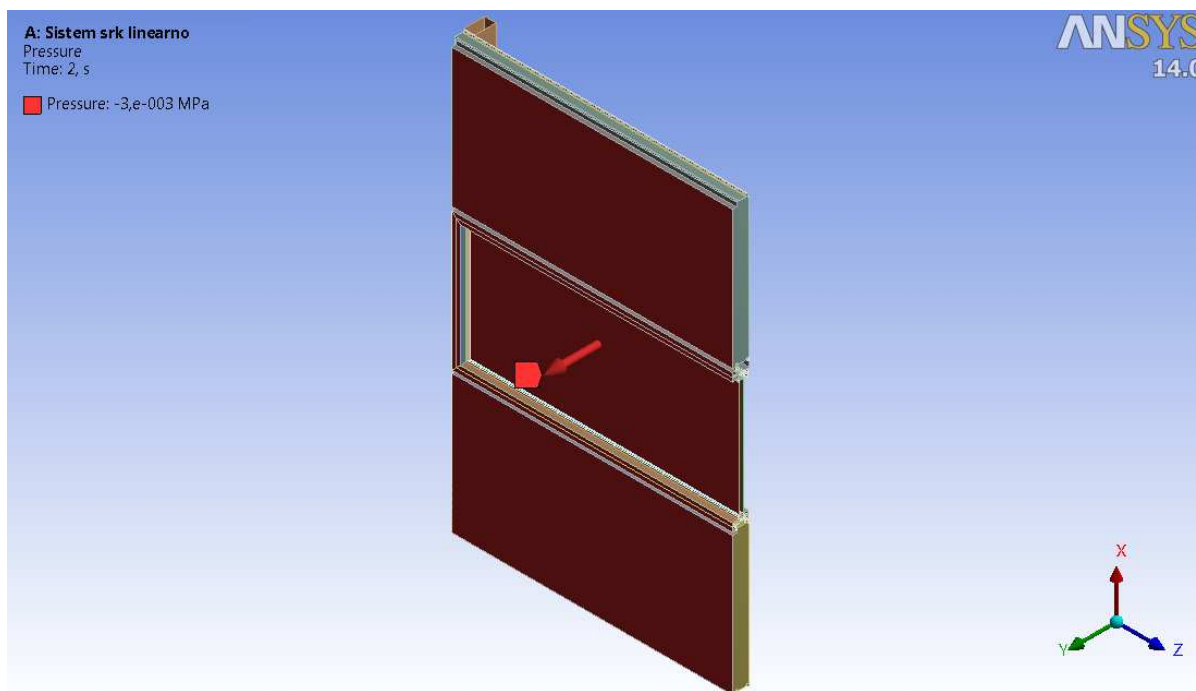
Pri 3. uklonski obliki se nestabilnost preusmeri na zgornji fasadni element, kjer prav tako pride do lokalnega izbočenja pločevine, in sicer zopet v osrednjem delu sistema. Lokalno izbočenje pločevine je potem z višjimi uklonskimi oblikami le še bolj izrazito in v širšem območju.



Slika 118: Prikaz 3. uklonske oblike zaradi obremenitve vetra - tlak

6.2 Obremenitev zaradi vetra – srk

Na sliki 119 je prikazana obremenitev zaradi vetra - srk, ki znaša -3000 N/m^2 in se je upoštevala pri izvedbi linearne uklonske analize.



Slika 119: Obremenitev zaradi vetra - srk

6.2.1 Uklonski faktorji in uklonske oblike

Tudi pri tej uklonski analizi je bilo izračunanih 40 uklonskih faktorjev, da smo preverili ali pride do uklonske nestabilnosti zgolj v enem elementu fasadnega sistema. V preglednici 14 so prikazane vrednosti prvih 10 uklonskih faktorjev. Tu opazimo, da so faktorji nižji kot v prejšnjem primeru, ko smo imeli enakomerni pritisk vetra. To pomeni, da pride do uklona prej.

Preglednica 14: Uklonski faktorji zaradi obremenitve vetra - srk

Uklonska oblika	Uklonski faktor	Uklonska oblika	Uklonski faktor
1	2,1833	6	2,2482
2	2,1999	7	2,2636
3	2,2181	8	2,2648
4	2,2315	9	2,2669
5	2,239	10	2,2809

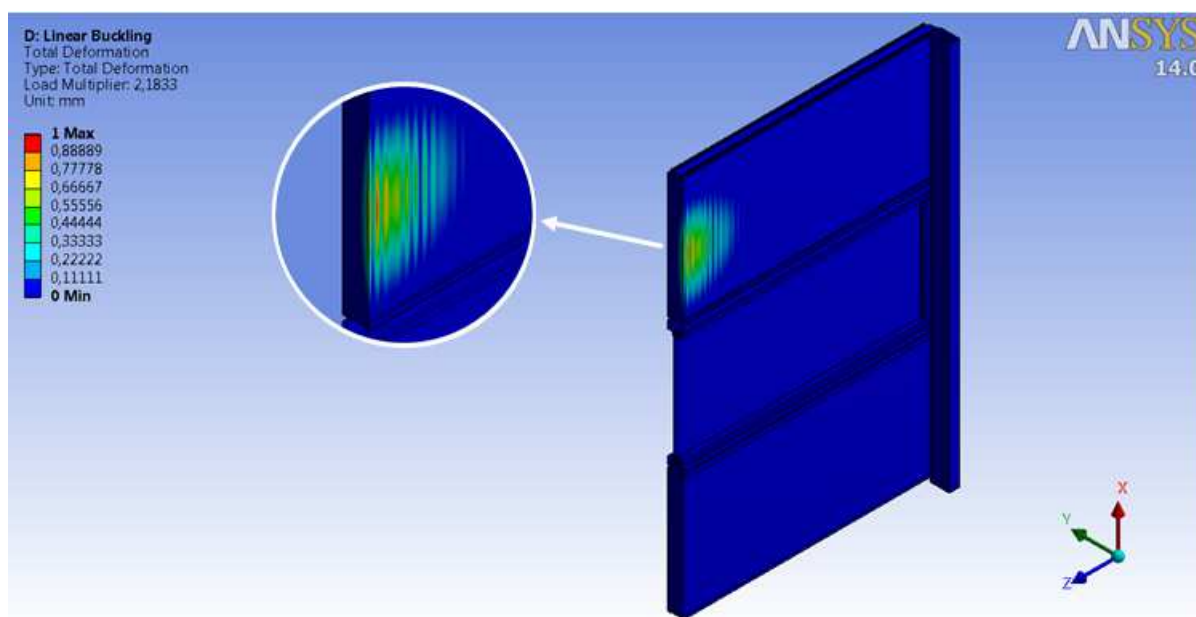
Vsak uklonski faktor je povezan z drugačno uklonsko obliko. Najnižji faktor je tisti, ki določa kritično obremenitev. Kritična uklonska oblika je 1. oblika, ker povzroči uklon pri najmanjši obtežbi.

Iz preglednice 14 razberemo, da je uklonski faktor pri 1. uklonski obliki 2,1833. To pomeni, da pride do nestabilnosti pri obtežbi, ki je izračunana s pomočjo:

$$P_{cr,1,KE} = \lambda_{cr,1,KE} \cdot P = 2,1833 \cdot 3000 \text{ N/m}^2 = 6549,9 \text{ N/m}^2 \quad (16)$$

Če to primerjamo z izračunano kritično obtežbo pri enakomernem pritisku vetra, ugotovimo, da pride v primeru srka prej do uklona. To pomeni, da je srk, ki deluje v pozitivni smeri Y, bolj neugoden od obremenitve vetra zaradi tlaka. V nadaljevanju so slikovno prikazane prve tri uklonske oblike, ki jih dobimo ob obremenitvi zaradi vetra - srk. Tako si lažje predstavljamo, kako se del konstrukcije deformira, ko nastopi uklon. Tudi v tem primeru se pojavijo gube v pločevini fasadnega panela, s to razliko, da se nahajajo na notranji strani sistema. To je tudi razumljivo, saj obremenitev deluje v nasprotni smeri od prejšnje.

Spodaj na sliki 120 je prikazana 1. uklonska oblika, za katero je izračunan uklonski faktor 2,1833. Iz slike vidimo, da se tu prva nestabilnost pojavi v osrednjem delu zgornjega fasadnega elementa, kjer zopet pride do lokalnega izbočenja pločevine. Uklonski tlačni napetosti v pločevini zgoraj ležečega panela (notranja stran sistema), ki ju določimo na podlagi doseženih napetosti pri linearno elastični analizi, znašata: von Misesova 146,3 MPa in glavna 148,2 MPa. Izkaže se, da je teoretična uklonska tlačna napetost v pločevini za 14 % višja od dejanske eksperimentalno izmerjene napetosti (130 MPa) (Test Qbiss One, 2012), pri kateri pride do gubanja pločevine v panelu.

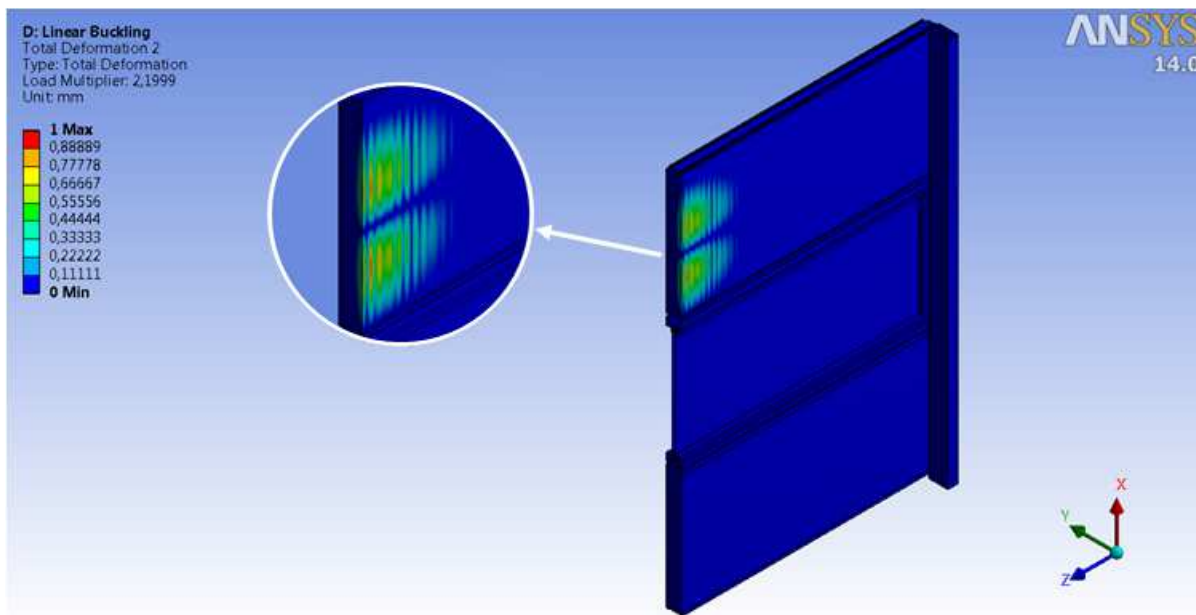


Slika 120: Prikaz 1. uklonske oblike zaradi obremenitve vetra - srk

Na sliki 121 je prikazana 2. uklonska oblika, pri kateri je izračunan uklonski faktor 2,1999. Do nestabilnosti pride pri obtežbi:

$$P_{cr,2,KE} = \lambda_{cr,2,KE} \cdot P = 2,1999 \cdot 3000 \text{ N/m}^2 = 6599,7 \text{ N/m}^2 \quad (17)$$

Opazimo lahko, da nestabilnost tudi tokrat nastane na zgornjem fasadnem elementu, kjer pride do lokalnega izbočenja pločevine v osrednjem delu. Razvidno je tudi, da je nestabilnost bolj izrazita v dveh ločenih območjih.

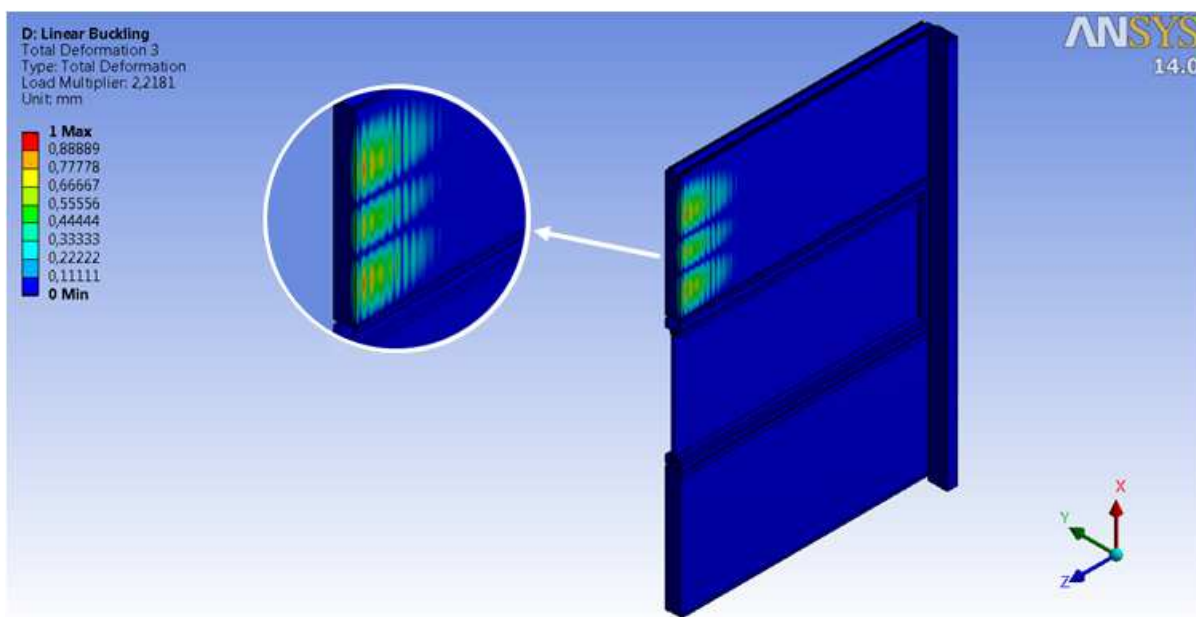


Slika 121: Prikaz 2. uklonske oblike zaradi obremenitve vetra - srk

Na sliki 122 je prikazana 3. uklonska oblika. Pri slednji je uklonski faktor enak 2,2181. To pomeni, da pride do nestabilnosti pri obtežbi:

$$P_{cr,3,KE} = \lambda_{cr,3,KE} \cdot P = 2,2181 \cdot 3000 N/m^2 = 6654,3 N/m^2 \quad (18)$$

Pri tej obliki se nestabilnost pločevine pojavi tudi na zgornjem fasadnem elementu, s tem da je izrazito v treh ločenih območjih. Glede na rezultate lahko opazimo, da se nestabilnosti pojavijo le v pločevini fasadnega elementa. Z višjo uklonsko obliko se nestabilnosti pojavijo v širšem območju.



Slika 122: Prikaz 3. uklonske oblike zaradi obremenitve vetra - srk

7 MODALNA ANALIZA

Z modalno analiz izračunamo lastne nihajne oblike in lastne frekvence konstrukcije. Modalna analiza določi značilne vibracije (lastne frekvence in nihajne oblike) konstrukcije. Služi tudi kot začetna točka za druge dinamične analize, kot je časovna dinamična analiza, harmonična analiza ali spektralna analiza. Lastne frekvence in modalne oblike so pomembni parametri pri načrtovanju konstrukcij za dinamične obtežbene pogoje.

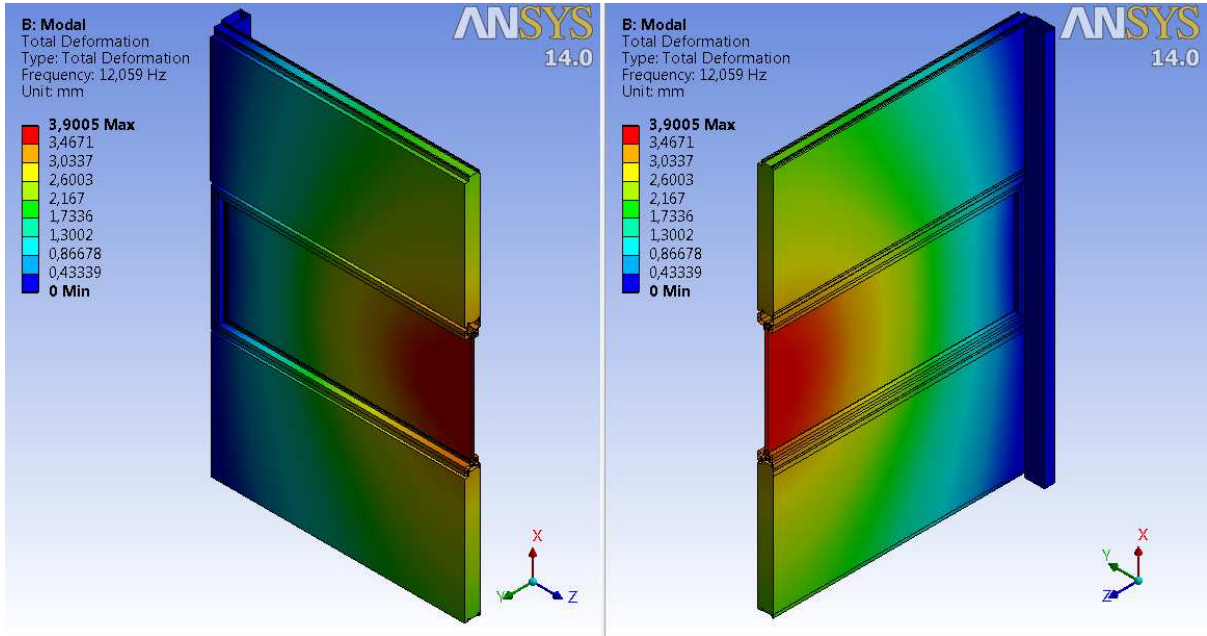
Pri modalni analizi imamo več možnih metod po katerih se v programu ANSYS izvršijo izračuni. V našem primeru je bila uporabljena metoda Block Lanczos, ki se uporablja za račun lastnih vrednosti velikih simetričnih matrik. V ukazni vrstici je potrebno vpisati ukaz, s katerim določimo vrsto analize, metodo izračuna, število nihajnih oblik, itd. (MODOPT, Method, NMODE, ...). Lahko tudi določimo, v katerem frekvenčnem območju naj program išče nihajne oblike.

V Preglednici 15 je prikazanih prvih 10 lastnih nihajnih oblik s pripadajočimi vrednostmi lastnih frekvenc.

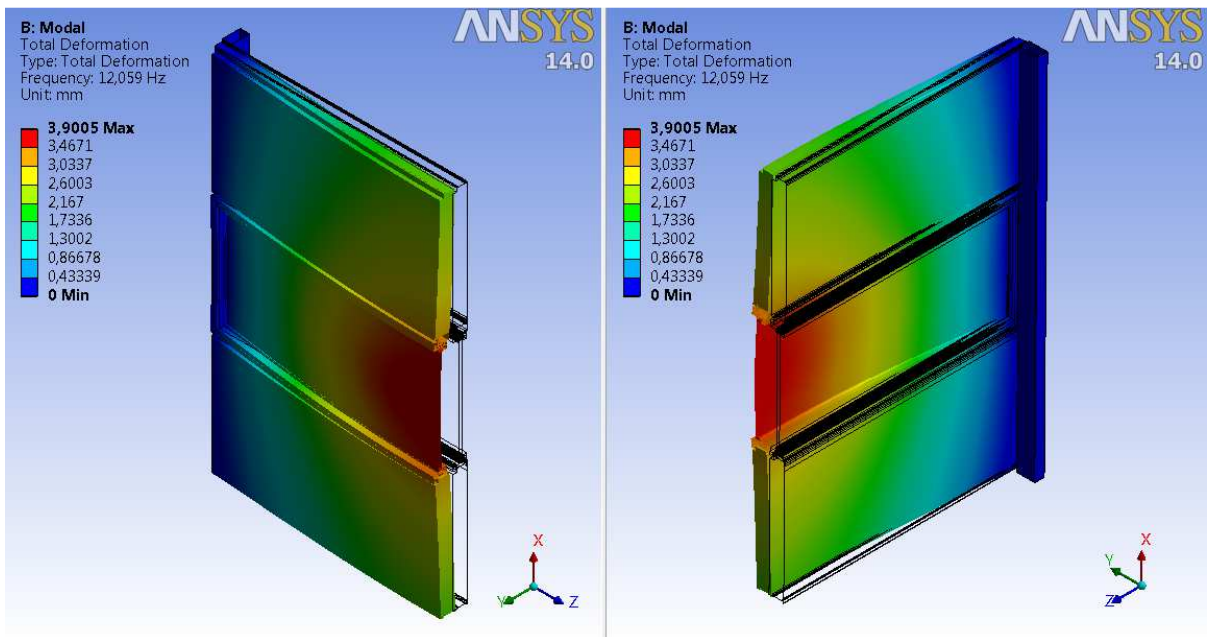
Preglednica 15: Lastne nihajne oblike in lastne frekvence

Nihajna oblika	Frekvenca [Hz]	Nihajna oblika	Frekvenca [Hz]
1	12,059	6	26,608
2	15,694	7	36,906
3	18,047	8	45,615
4	23,190	9	46,109
5	24,931	10	58,996

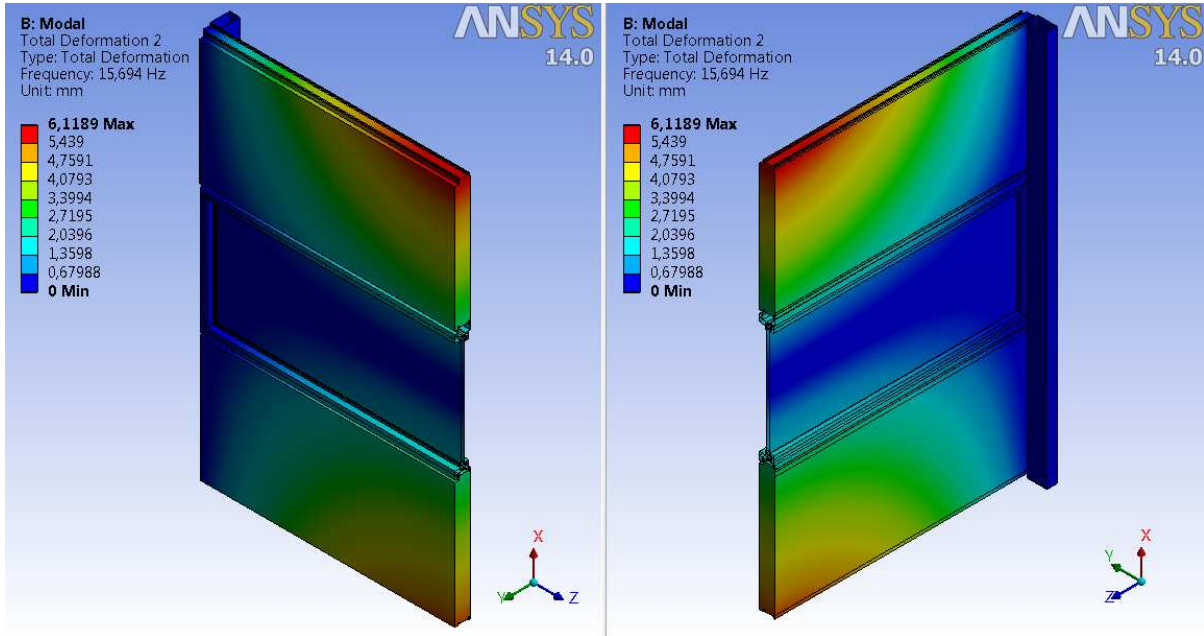
V okviru modalne analize je v nadaljevanju prikazanih nekaj lastnih nihajnih oblik sistema. V programu ANSYS lahko zaženemo simulacijo nihanja sistema panel-okno-panel za vsako lastno nihajno obliko posebej. Na sliki 123 je prikazana prva nihajna oblika, kateri pripada lastna frekvenca 12,059 Hz. Tu gre za upogibno nihanje fasadnega sistema v smeri *Y* osi. Druga nihajna oblika je prikazana na sliki 125. Pri slednji znaša frekvenca 15,694 Hz. V osrednjem delu se celotni sistem torzijsko zasuka okoli *Z* osi, glede na točko, ki se nahaja na polovici višine okenskega elementa. Tretja lastna nihajna oblika s frekvenco 18,047 Hz je prikazana na sliki 127. Tu se skrajna vogala zgornjega in spodnjega panela v osrednjem delu istočasno pomikata navznoter in navzven, pri tem, da je pomik spodnjega vogala nekoliko večji. Pri tem lastnem nihanju gre za upogib v smeri *Y* osi. Pri četrti lastni nihajni obliki (slika 129), kjer je lastna frekvenca enaka 23,190 Hz, je bilo s pomočjo simulacije deformiranja razvidno izmenično gibanje zgornjega in spodnjega dela okenskega okvirja navznoter ter navzven. Izvedel se je torzijski zasuk okna okoli *Z* osi, glede na točko, ki se nahaja na polovici višine okenskega elementa. Temu gibanju sta sledila oba fasadna elementa.



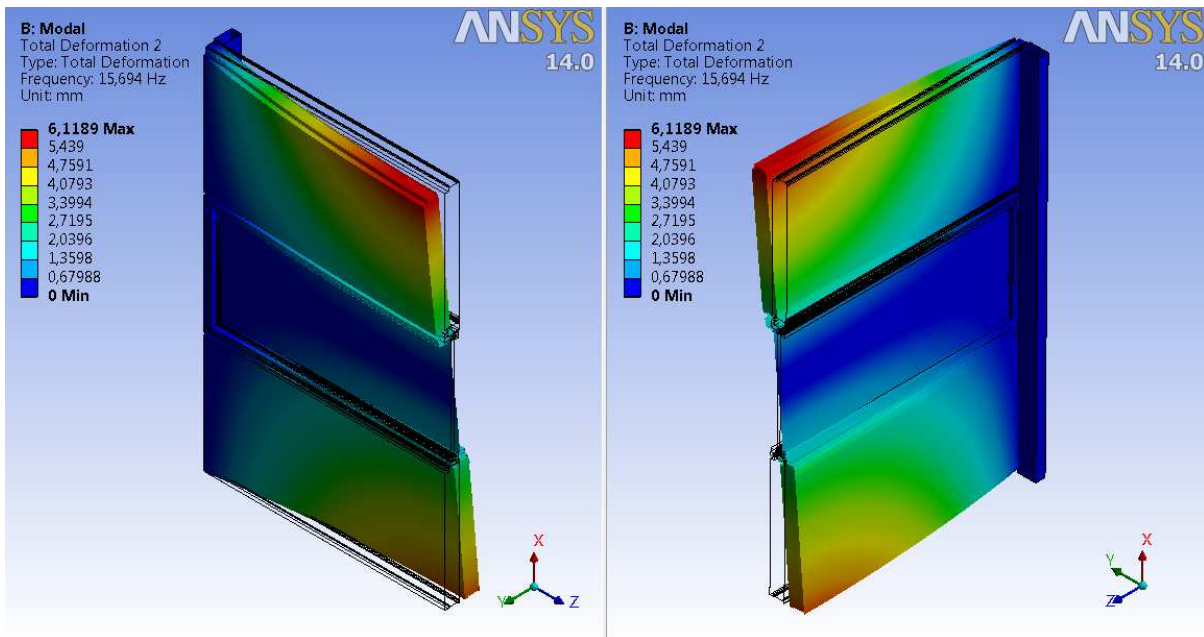
Slika 123: Prva lastna nihajna oblika



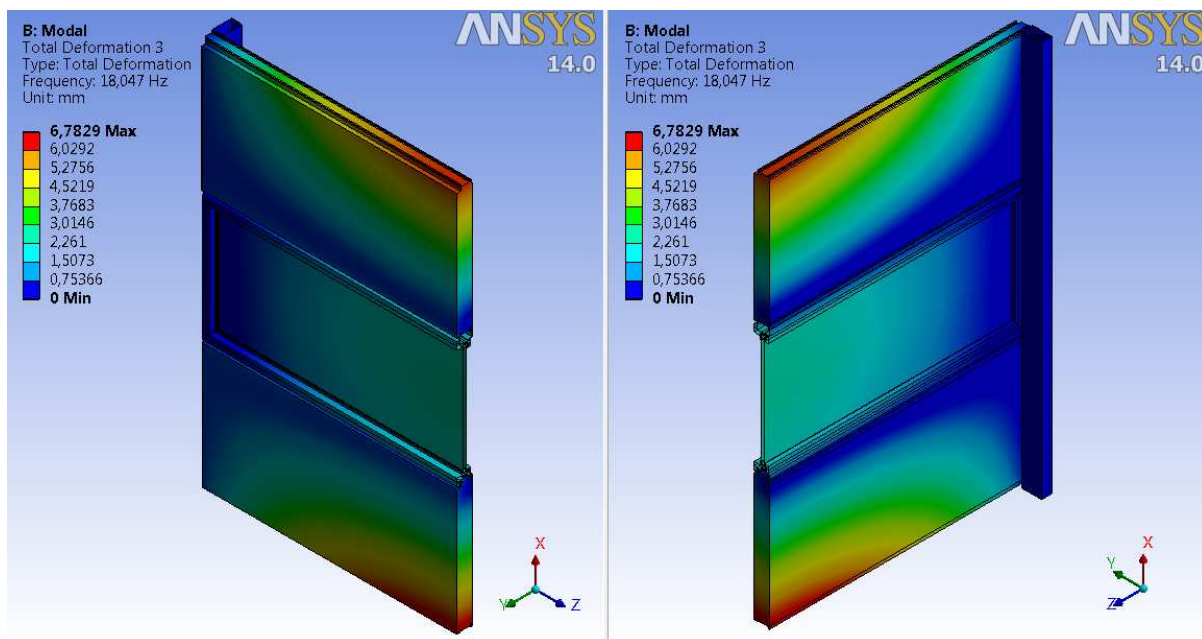
Slika 124: Prva lastna nihajna oblika (povečano merilo)



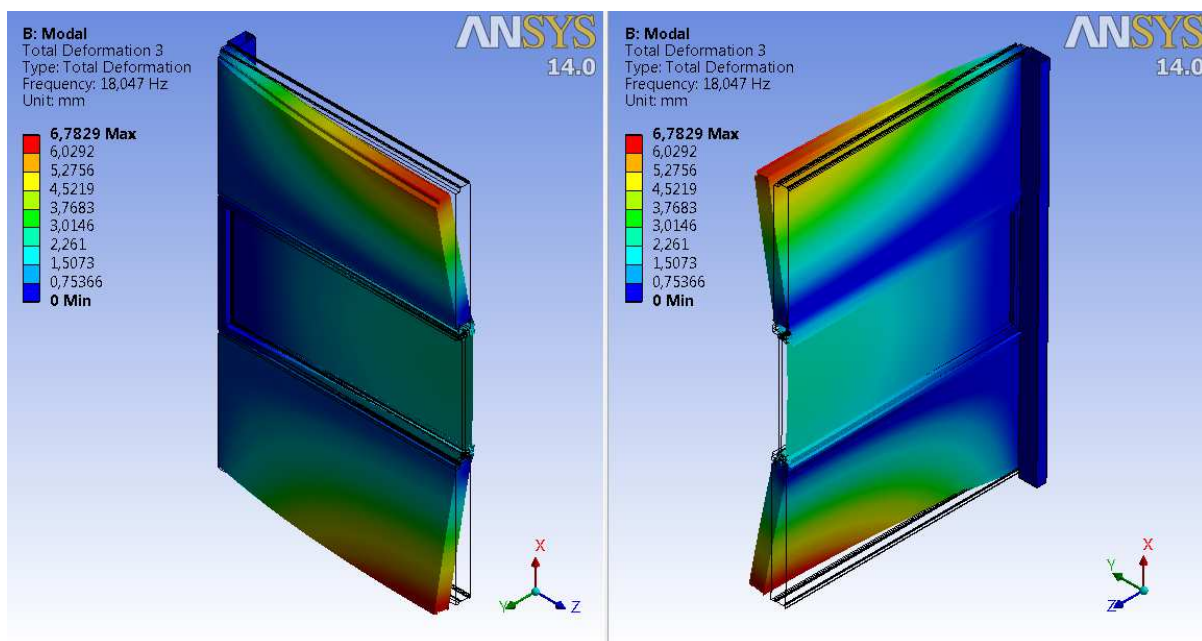
Slika 125: Druga lastna nihajna oblika



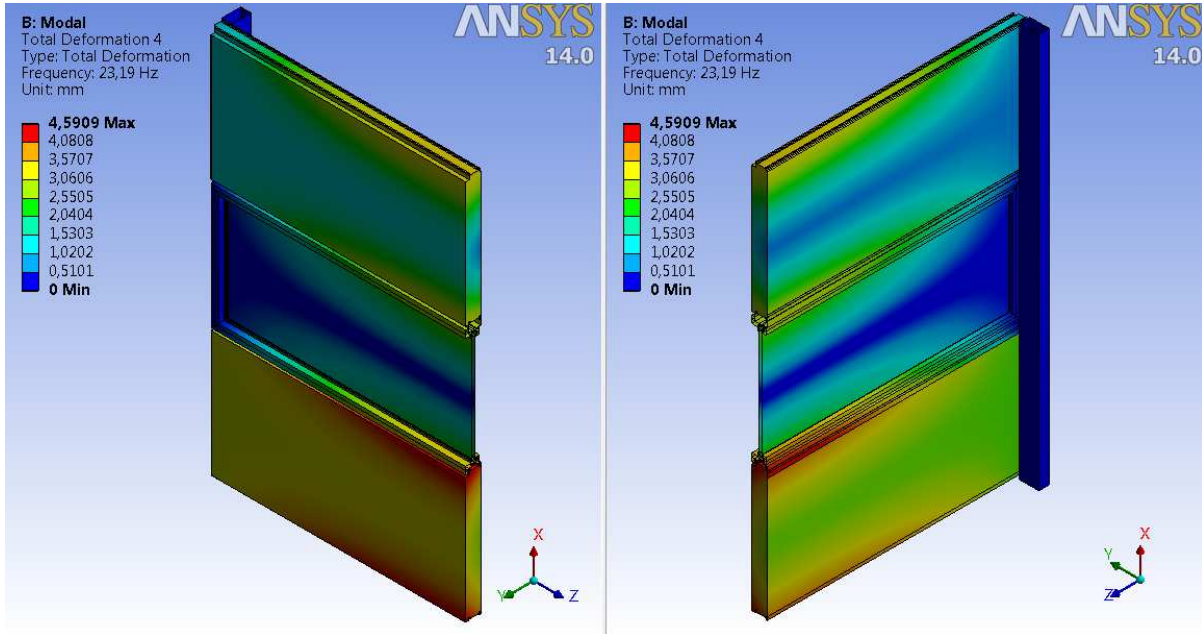
Slika 126: Druga lastna nihajna oblika (povečano merilo)



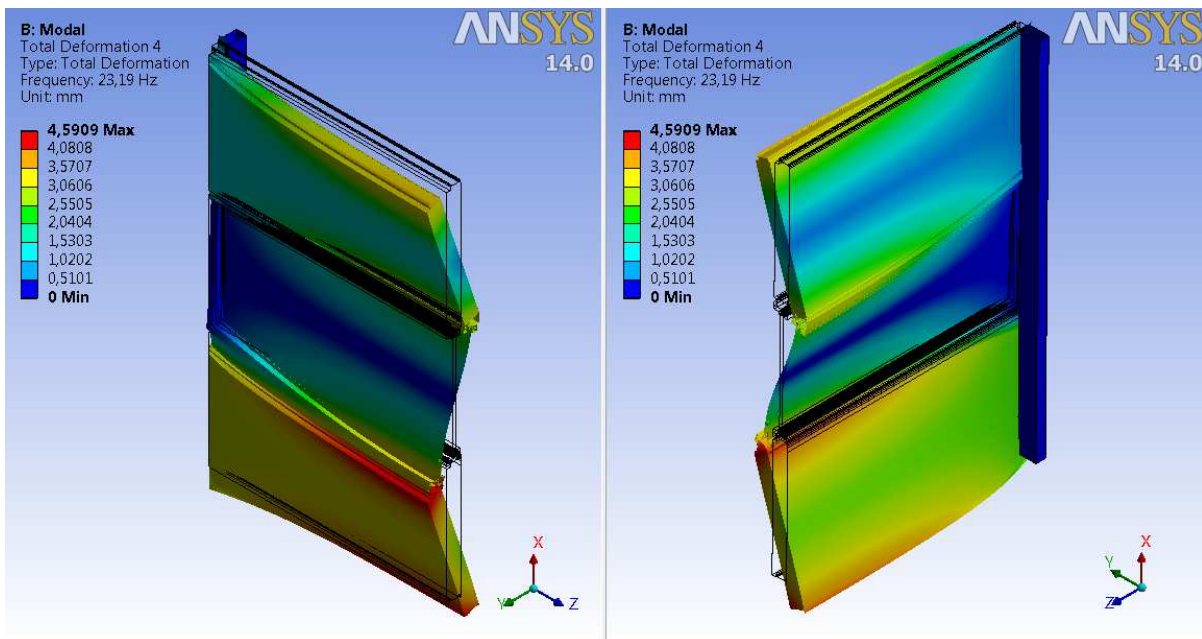
Slika 127: Tretja lastna nihajna oblika



Slika 128: Tretja lastna nihajna oblika (povečano merilo)



Slika 129: Četrta lastna nihajna oblika

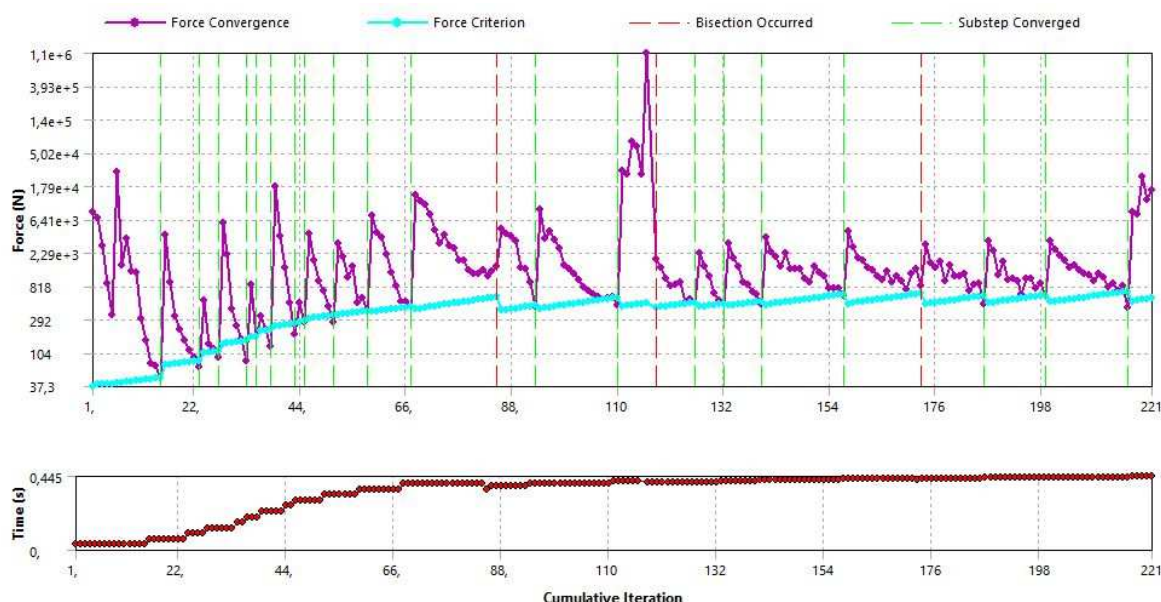


Slika 130: Četrta lastna nihajna oblika (povečano merilo)

8 MATERIALNA IN GEOMETRIJSKA NELINEARNA ANALIZA

8.1 Obremenitev zaradi vetra – tlak

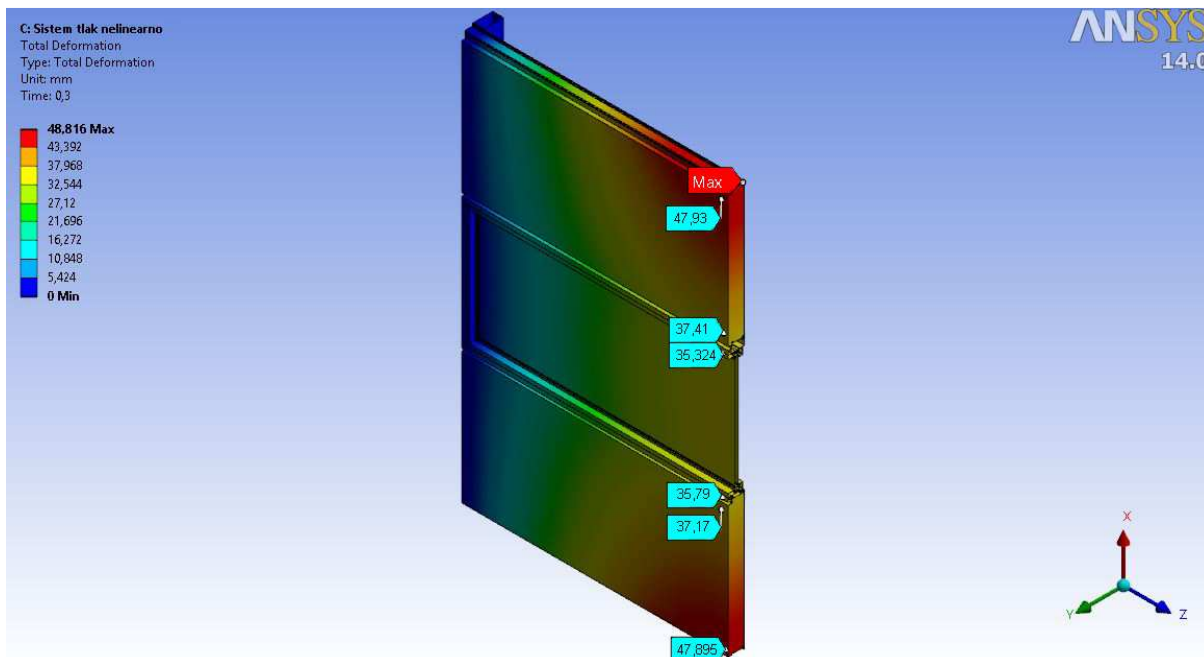
Za obremenitev veter-tlak je bila narejena nelinearna analiza, pri čemer naj bi bila končna vrednost nanešenega pritiska 20000 Pa. Pri nelinearni analizi smo upoštevali možnost velikih deformacij (geometrijsko nelinearnost), medtem ko smo pri materialnih karakteristikah za jeklo in aluminij podali elastoplastični materialni model (materialna nelinearnost). Spodaj na sliki 131 je prikazan graf konvergence rezultatov. Razvidno je, da je izračun divergiral v 221 iteraciji. Pri tej iteraciji, t.j. v navideznem času 0,445 s, se je analiza ustavila. Če predpostavimo, da je prišlo do uklona pri zadnjem konvergiranim stanju, to pomeni, da je numerično sistem panel-okno-panel odpovedal pri tlačni obremenitvi vetra 8900 Pa.



Slika 131: Kontrola konvergence in število iteracij

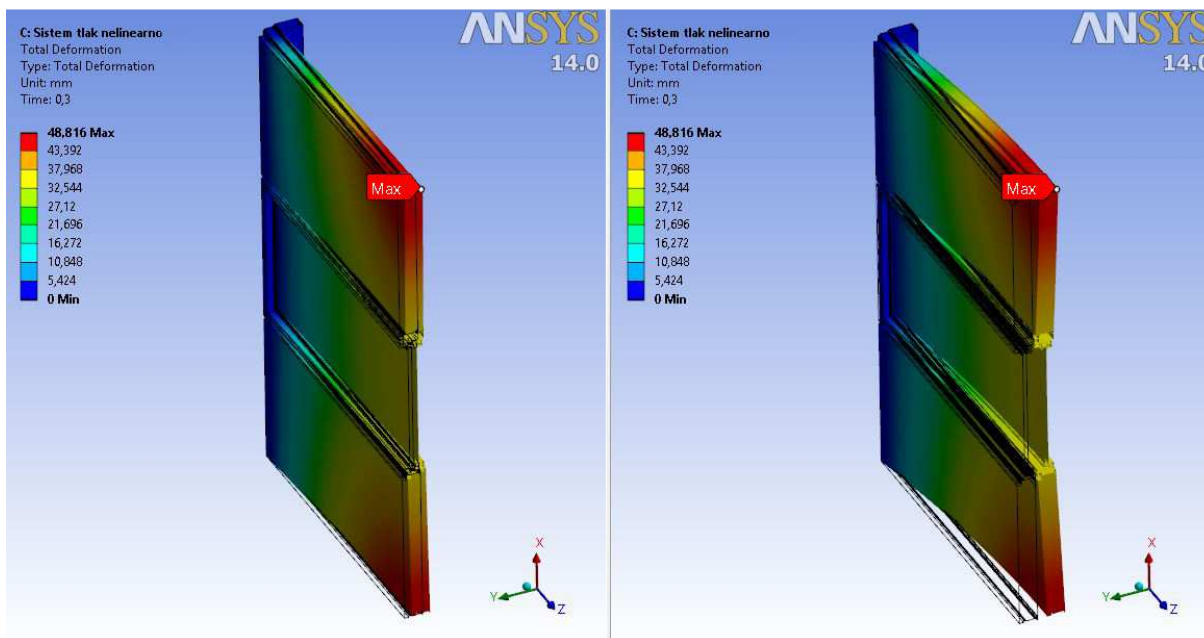
8.1.1 Pomiki

Po pričakovanjih veter povzroča večje pomike v osrednjem delu celotnega sistema. Zaradi tlačne obremenitve vetra (6000 Pa) je najbolj izrazito deformiranje fasadnih panelov. V skrajnem vogalu zgoraj ležečega panela je dosežen največji pomik, ki znaša približno 48,8 mm, medtem ko je na skrajnem vogalu spodaj ležečega panela dosežen nekoliko manjši pomik okoli 48,0 mm. V okenskem okvirju (na osrednjem delu) so doseženi pomiki manjši. Slednji dosežejo vrednosti približno 35,3 mm na zgornjem delu okvirja in 35,8 mm na spodnjem delu okvirja.



Slika 132: Pomiki zaradi obremenitve vetra - tlak pri pritisku 6000 Pa

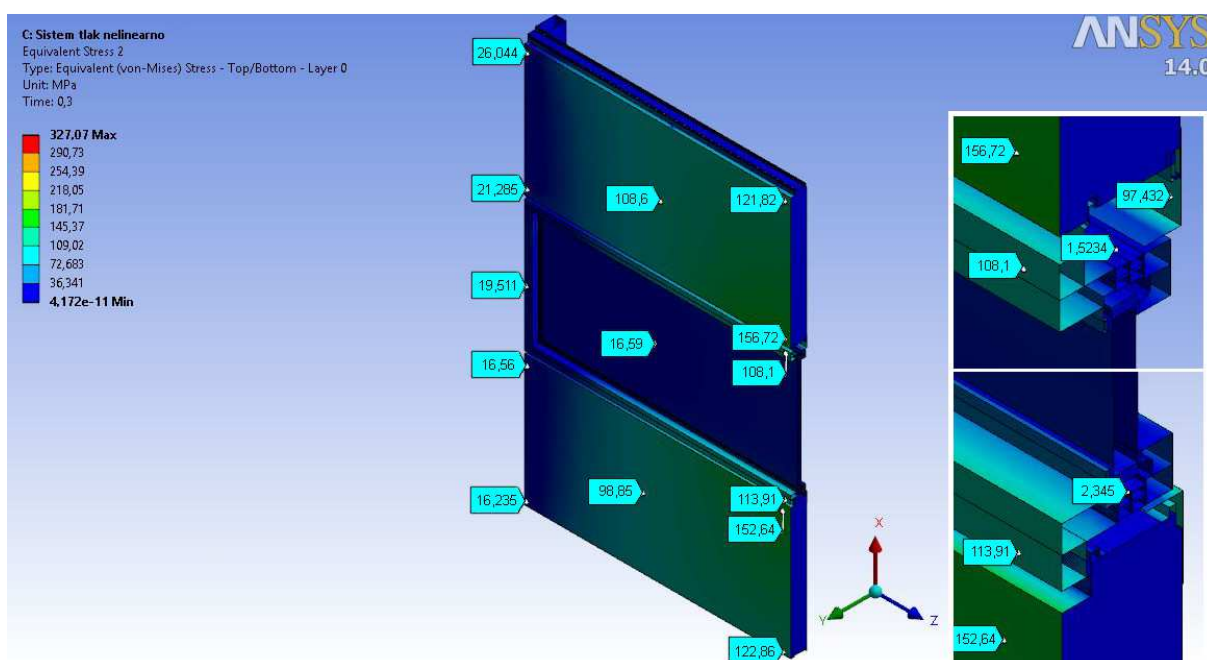
Na sliki 133 je prikazana deformirana oblika, povzročena zaradi obremenitve vetra-tlak pri pritisku 6000 Pa. Na levi strani slike je prikazano dejansko deformiranje sistema panel-okno-panel in na desni strani slike deformiranje sistema pri povečani skali za nazornejšo predstavo. S pomočjo slednje je razvidno bolj togo obnašanje okenskega elementa.



Slika 133: Prikaz deformirane oblike zaradi vetra - tlak pri pritisku 6000 Pa (v naravnem in povečanem merilu)

8.1.2 Von Misesove napetosti in glavne normalne napetosti

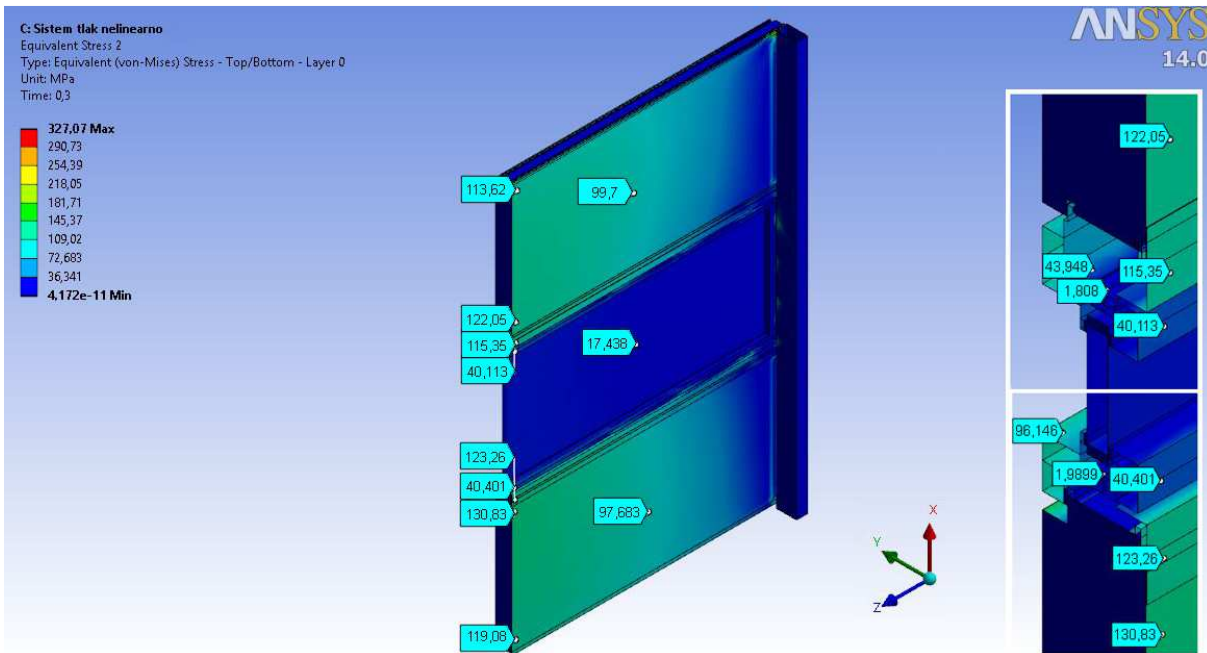
V nadaljevanju so prikazani rezultati napetosti v navideznem času 0,3 s, ko še ni prišlo do pojava nestabilnosti v sistemu panel-okno-panel. Na sliki 134 so prikazane napetosti na zunanji strani sistema, ki jih povzroča tlačna obremenitev vetra. Ta znaša 6000 Pa pri času 0,3 s. V osrednjem delu fasadnega sistema veter povzroči von Misesovo napetost okoli 156,7 MPa v pločevini zgoraj ležečega panela in okoli 152,6 MPa v pločevini spodaj ležečega panela. Največja glavna tlačna napetost v zgornjem panelu znaša 161,9 MPa (absolutna vrednost) in 158,4 MPa (absolutna vrednost) v spodnjem panelu. Lahko ugotovimo, da so glavne tlačne napetosti v pločevini višje od laboratorijsko določene napetosti za lokalno izbočenje pločevine, ki znaša 130 MPa (Test Qbiss One, 2012) in ki je bila določena na panelih debeline 120 mm. Razvidno je tudi, da so napetosti v pločevini panela v osrednjem delu celotnega sistema (na dolžini 2 m) višje kot v preostalih elementih.



Slika 134: Von Misesove napetosti na zunanji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - tlak pri pritisku 6000 Pa

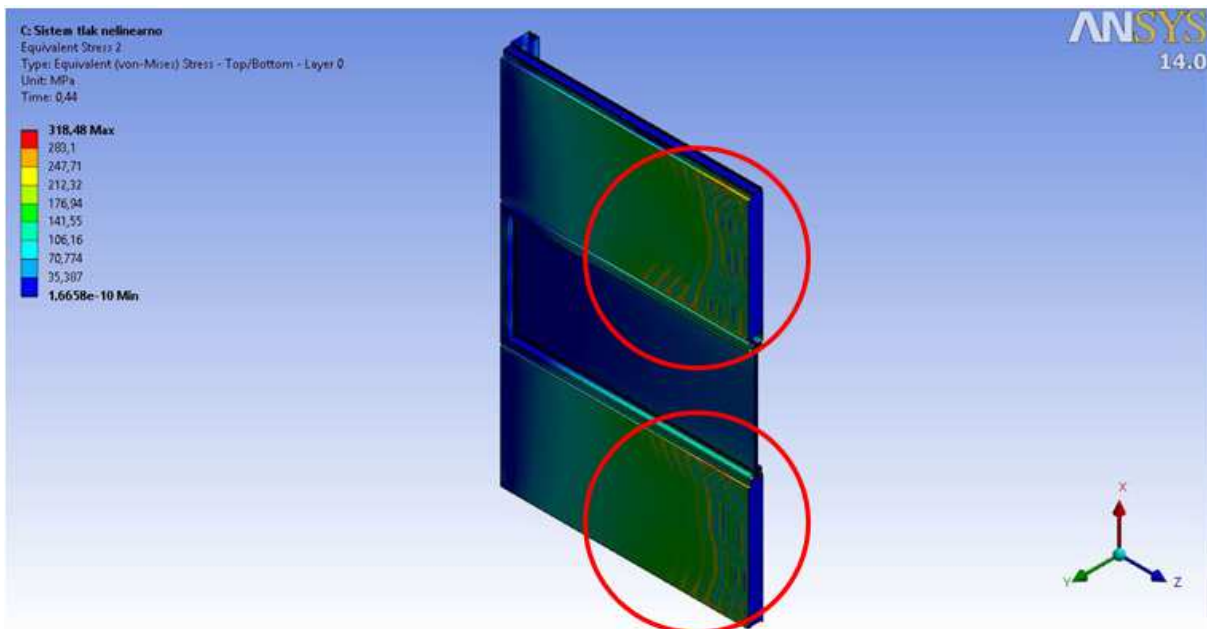
Iz slike 135, kjer so prikazane von Misesove napetosti na notranji strani, lahko ugotovimo, da so napetosti manjše, kot na zunanji strani. V pločevini zgoraj ležečega panela znaša napetost 122,1 MPa, medtem ko je napetost v pločevini spodaj ležečega panela nekoliko višja, in sicer 130,8 MPa. Izkaže se, da sta obe doseženi vrednosti napetosti manjši od napetosti tečenja jekla 280 MPa. Prav tako so von Misesove napetosti v L kotniku, ki znašajo 115,4 MPa in 123,3 MPa, manjše od napetosti tečenja jekla kvalitete S 235. V aluminijastem okenskem okvirju so dosežene manjše von Misesove napetosti, ki znašajo okoli 40,1 MPa v zgornjem delu in 40,4 MPa v spodnjem delu okvirja. Torej tudi v tem elementu napetosti ne dosežejo napetosti tečenja aluminija, saj slednja znaša 120 MPa. V sestavnem elementu okenskega okvirja, t.j. v plastičnem profilu so dosežene zelo majhne napetosti. Te se gibljejo okoli 2,0 MPa in tako predstavljajo samo 6,7 % napetosti tečenja poliamida, ki znaša 30 MPa.

Glavna tlačna napetost v pločevini, ki znaša približno 130 MPa (absolutna vrednost), je bila dosežena v času 0,24 s. To je pri tlačnem pritisku vetra 4800 Pa.



Slika 135: Von Misesove napetosti na notranji strani sistema panel-okno-panel zaradi vetra - tlak pri pritisku 6000 Pa

Tik pred porušitvijo, t.j. v času 0,44 s je bilo vidno izrazito gubanje pločevine v osrednjem delu sistema. To je pri obremenitvi 8800 MPa, ko se je gubanje pločevine pojavilo tako v zgoraj kot v spodaj ležečem panelu. Gubanje pločevine fasadnega panela je prikazano na sliki 136. Numerično izračunana globalna porušitev v sistemu panel-okno-panel se je zgodila pri obremenitvi 8900 Pa, to je v času 0,445 s.



Slika 136: Prikazano gubanje v pločevini zgoraj in spodaj ležečega panela pri pritisku 8800 Pa

9 ZAKLJUČEK

V okviru študije novega načina vgradnje oken v fasadni sistem Qbiss One, so bile izvedene za različne vrste obremenitve linearna elastična analiza, linearna uklonska analiza, modalna analiza ter nelinearna analiza. V sistemu panel-okno-panel se je odstranila ojačitvena cev in nekoliko spremenila zasnova nosilca fasadnega elementa in okenske odprtine. Zaradi kompleksnosti numeričnega modela je bila študija izvedena le za polovico celotnega fasadnega sistema. Pri tem je bila upoštevana tudi simetrija. Za analize smo upoštevali obremenitev vetra zaradi tlaka in srka ter toplotni vpliv, ki tudi prispeva k odzivu sistema panel-okno-panel. Predvsem se ta vpliv odraža pri fasadnih sistemih, kjer se temne barve površin panelov lahko segrejejo tudi do 90 °C (EN 14509: Revision 1, 2012). Znana je uporabna obremenitev samih fasadnih panelov Qbiss One, ki znaša 2000 Pa. Za naše analize je bila izbrana večja obremenitev, ki znaša 3000 Pa.

Pri primerjavi doseženih von Misesovih napetosti v linearno elastičnih analizah je bilo ugotovljeno, da slednje ne presežejo napetosti tečenja metalov (jekla in aluminij). Se pravi, da ne pride do nepovratnih deformacij v fasadnem sistemu. Na podlagi linearne elastične analize pri obremenitvi vetra (tlak ali srk) in toplotnih vplivih je bilo razvidno, da dosežene tlačne napetosti v pločevini panela niso prekoračile napetosti gubanja pločevine 130 MPa. Slednja je bila določena na podlagi testiranj fasadnih panelov debeline 120 mm (Test Qbiss One, 2012). Pri temperaturni obremenitvi se je izkazalo, da so bile napetosti v pločevini v osrednjem delu nižje kot pri obremenitvi vetra (tlak ali srk). Glede na podano visoko temperaturo pri toplotnem vplivu, se izkaže, da so le v plastičnem elementu, ki je del okenskega okvirja, dosežene napetosti, ki se približajo napetosti tečenja poliamida. Te so bile dosežene v osrednjem delu celotnega sistema, vendar niso presegle napetosti tečenja. Ugotovljeno je bilo tudi, da obremenitev zaradi temperature povzroča višje napetosti v okenskem okvirju na območju vpetja v primerjavi z obremenitvijo vetra. Izkaže se, da zaradi načina vpetja ni omogočeno raztezanje okvirja v tem delu, zaradi česar bo potrebno razmisliti o ustreznem podpiranju. Iz rezultatov glavnih normalnih napetosti je bilo razvidno, da so napetosti v steklu majhne in ne presežejo upogibne niti tlačne trdnosti stekla. To velja pri obeh načinih obremenitve vetra in toplotnemu vplivu. V mineralni volni, ki je sestavni element fasadnega panela, so glavne tlačne napetosti in največje strižne napetosti prekoračile tlačno in strižno trdnost volne, vendar le v spodnjem vogalu spodaj ležečega panela, in sicer pri obremenitvi vetra tlak in srk. Pri toplotnem vplivu tlačna in strižna trdnost volne ni bila prekoračena nikjer v panelu. Potrebno bo nameniti tudi veliko pozornost vijakom v območju vpetja sistema, saj je bila na določenih mestih dosežena plastifikacija le slednjih.

Na podlagi pomikov lahko ugotovimo, da so pri različnih vrstah obremenitev (linearna elastična analiza), doseženi največji pomiki v osrednjem delu celotnega sistema. Iz vrednosti pomikov je razvidno, da okno prispeva k togosti celotnega fasadnega sistema tudi zaradi značilne strukture okenskega okvirja. Slednji element omogoča tudi raznos obremenitve. Veter je pri obeh načinih obremenitve (tlak ali srk) povzročal večje pomike na skrajnih vogalih fasadnih panelov, medtem ko so bili v okenskem elementu doseženi manjši pomiki. Pri obremenitvi zaradi temperature pa so bili doseženi večji pomiki ravno na okenskem elementu. Na slednje rezultate vplivajo tudi koeficienti temperaturnega raztezka materialov. V tem primeru je bilo na podlagi deformirane oblike razvidno, da okno obremenjuje fasadna elementa, ki sledita deformiranju okenskega okvirja. Posledično so tudi napetosti v pločevini fasadnih panelov višje.

Pri uklonski analizi se je izkazalo, da pride do pojava nestabilnosti zgolj v pločevini fasadnih panelov, in sicer v osrednjem delu celotnega fasadnega sistema. Glede na način obremenitve vetra se je lokalno izbočenje pločevine pojavilo bodisi na zunanji ali na notranji strani sistema panel-okno-panel. Izkazalo se je, da pride pri obremenitvi vetra-srk prej do uklona, saj je bila izračunana nižja kritična obtežba (6549,9 Pa) kot v primeru tlačne obremenitve vetra. Na podlagi tlačnih napetosti v pločevini panelov, izračunanih na osnovi linearne elastične analize, je bila določena tudi teoretična uklonska tlačna napetost, ki znaša 148,2 MPa. Izkaže se, da je teoretična uklonska tlačna napetost v pločevini pri obremenitvi vetra-srk, za 14 % višja od dejanske eksperimentalno izmerjene napetosti 130 MPa (Test Qbiss One, 2012), pri kateri pride do gubanja pločevine v panelu.

Iz rezultatov modalne analize je bilo pri prvi nihajni obliki razvidno upogibno nihanje sistema panel-okno-panel v smeri Y osi. Na podlagi simulacije gibanja sistema pri drugi nihajni obliki pa je bilo razvidno torzijsko sukanje okoli Z osi.

Nelinearna analiza, ki je bila izvedena le za obtežbo vetra-tlak je potrdila rezultate linearne analize, da okno prispeva k nosilnosti fasadnih panelov Qbiss One. Pri tlačni obremenitvi vetra 6000 Pa še ni prišlo do pojava gubanja pločevine, medtem ko se je gubanje izrazito pokazalo pri obremenitvi 8800 Pa. Nato se je fasadni sistem panel-okno-panel pri obremenitvi vetra 8900 Pa porušil. Pri obremenitvi 6000 Pa je bilo ugotovljeno, da so glavne tlačne napetosti v pločevini višje od laboratorijsko določene napetosti pri gubanju pločevine, ki znaša 130 MPa (Test Qbiss One, 2012). Glavna tlačna napetost okoli 130 MPa je bila v obravnavanem sistemu panel-okno-panel dosežena pri obremenitvi 4800 Pa.

Po izvedenih številnih analizah so bile odpravljene nepravilnosti kontaktov med elementi, katere je bilo potrebno ročno preveriti in jih ponovno formirati. Za nadaljne študije predlagam izvedbo numeričnih analiz za fasadni sistem s paneli debeline 240 mm in nestandardno modularno širino 1200 mm. Prav tako bi bilo dobro izvršiti izračune analiz z upoštevanjem še dodatnih sosednjih panelov. Izvedena študija novega načina vgradnje oken v fasadni sistem Qbiss One z debelino panelov 120 mm, standardno modularno širino 1000 mm in dolžino 4000 mm je pokazala ugodne rezultate. Pri novem sistemu vgradnje oken se je izkazalo, da okno prispeva k večji nosilnosti panelov in tako omogoča večje obremenitve. Na podlagi slednjih ugotovitev lahko potrdimo smiselnost izvedbe laboratorijskega testa in kasneje morebitno potrditev novega načina vgradnje oken v fasadni sistem.

VIRI

Beg, D., Pogačnik, A. 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij. Ljubljana. Inženirska zbornica Slovenije: str. 14, 73, 90.

Bon, E. 2003. Structural Opportunities for Glass, Massachusetts Institute of technology: 20.
<http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/29329/52718368.pdf?sequence=1>
(Pridobljeno 27. 05. 2013.)

Customer training Material, Lecture 3, Introduction to Contact. 2010.
http://inside.mines.edu/~apetrell/ENME442/Labs/1301_ENME442_lab6_lecture.pdf
(Pridobljeno 02. 08. 2013.)

EN 14509: Revision 1. 2012. Self-supporting double skin metal faced insulating panels - Factory made products - Specifications (Pridobljeno 07. 06. 2013.)

Fasadni sistem Qbiss One. 2013.
<http://www.qbiss.eu/high-aesthetic-total-wall-solution/system/windows/> (Pridobljeno 25. 04. 2013.)

FE modeler User guide ANSYS. 2013.
http://www.mecheng.osu.edu/documentation/Fluent14.5/145/wb_fem.pdf (Pridobljeno 08. 07. 2013.)

Grobovšek. 2013. Uporaba stekla v gradbeništvu
<http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/Grobovsek/PT155.htm> (Pridobljeno 18. 11. 2013.)

Končni elementi. 2013. Ansys v14.0 help menu (Pridobljeno 13. 06. 2013.)

Kontakti. 2013. Ansys v14.0 help menu (Pridobljeno 13. 06. 2013.)

Kontaktni elementi. 2013. Ansys v14.0 help menu (Pridobljeno 13. 06. 2013.)

Materialne lastnosti Aluminium Alloy 6063-T6. Osebna komunikacija. (09. 05. 2013.)

Materialne lastnosti PA66 GF 25. Osebna komunikacija. (09. 05. 2013.)

MKE Praktikum. 2013.
http://lace.uni-mb.si/Num_meth_konst/Praktikum/MKE%20Praktikum%20za%20NASTRAN.pdf
(Pridobljeno 23. 06. 2013.)

Popit, T., Novak, A. 2003. Poročilo o izvedbi testiranj, Izrezi panelov, RN 105/03, Trebnje.
(Pridobljeno, 29. 11. 2013.)

Program Ansys. 2013.
<http://www.ansys.com/> (Pridobljeno 21. 04. 2013.)

Program Catia. 2013.
<http://www.3ds.com/products-services/catia/> (Pridobljeno 21. 04. 2013.)

Qbiss One brochure. 2013.

http://www.trimo.si/media/qbiss-one-brochure-slo_19807.pdf (Pridobljeno 06. 05. 2013.)

Test Qbiss One. 2012.

Report No. 0405/12-630-1, about approval tests on Trimoterm Power T sandwich roof elements, type SNV tg, sandwich wall elements, type FTV HL mm2 and FTV HL Gg, wall element Qbiss One (FTV R) with a mineral wool core PBE BPT (PBE Board Premium Thermal), ZAG, Ljubljana, 2012.

Nelson, T., Wang, E. Reliable FE-Modeling with ANSYS, Munich, Germany.

<http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/confpaper/2004-Int-ANSYS-Conf-24.PDF> (Pridobljeno 10. 09. 2013.)

Srpčič, S. 2003. Mehanika trdnih teles. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str. 298, 301, 331-333.

Tehnični dokument Qbiss One B. 2011. Osebna komunikacija. (31. 05. 2013.)