

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:

Srednik, T., 2015. Projekt konstrukcije iz prednapete membrane. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Brank, B.): 135 str.

Datum arhiviranja: 02-06-2015

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:

Srednik, T., 2015. Projekt konstrukcije iz prednapete membrane. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Brank, B.): 135 p.

Archiving Date: 02-06-2015

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 ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidatka:

TANJA SREDNIK

**PROJEKT KONSTRUKCIJE IZ PREDNAPETE
MEMBRANE**

Diplomska naloga št.: 3438/KS

**DESIGN OF A PRESTRESSED MEMBRANE
STRUCTURE**

Graduation thesis No.: 3438/KS

Mentor:
prof. dr. Boštjan Brank

Predsednik komisije:
izr. prof. dr. Janko Logar

Član komisije:
doc. dr. Mitja Košir

Ljubljana, 28. 05. 2015

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana Tanja Srednik izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom »Projekt konstrukcije iz prednapete membrane«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, maj 2015

Tanja Srednik

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 624.074.43:727:378.4(497.4)(043.2)
Avtor: Tanja Srednik
Mentor: prof. dr. Boštjan Brank
Naslov: Projekt konstrukcije iz prednapete membrane
Tip dokumenta: Diplomaska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 135 str., 18 pregl., 152 sl.
Ključne besede: prednapeta membrana, nadstrešek, tehnične tkanine, iskanje oblike, nelinearna analiza, krojenje, dimenzioniranje

Izvleček:

Diplomska naloga se osredotoča na projekt iz prednapete membrane, t.j. nadstrešek prostora za druženje za stavbo UL FGG. V uvodnem delu je na kratko razloženo delovanje takih konstrukcij, predstavljene so osnovne oblike in nekaj že postavljenih primerov, opisane so tehnične tkanine ter predstavljen celoten postopek projektiranja, od iskanja oblike in analize do krojenja. Naloga se nadaljuje s predstavitvijo računalniških orodij, s katerimi se je v nadaljevanju sledilo fazam načrtovanja. V prvi fazi je bilo izdelanih pet idejnih načrtov za nadstrešek. Vse zasnove imajo obliko sedla ali konusa, dveh najbolj osnovnih oblik prednapetih membran. Sledi natančen opis lokacije, kjer bo objekt postavljen, izbor materialov, detajlov, podporne konstrukcije ter postopka gradnje. Ocenjeni so tudi stroški izdelave posamezne konstrukcije. Nato je opravljena nelinearna statična analiza dveh izbranih idejnih konstrukcij, s pomočjo katere je bilo ugotovljeno, da ne pride do večjih odstopanj od predvidenih odzivov modelov. Izmed obravnavanih konstrukcij je izbrana najprimernejša, zanjo je nato opravljena natančnejša analiza in dimenzioniranje, poleg tega pa so izdelani tudi načrti za kroje.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.074.43:727:378.4(497.4)(043.2)
Author: Tanja Srednik
Supervisor: prof. Boštjan Brank, Ph.D.
Title: Design of a Prestressed Membrane Structure
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 135 p., 18 tab., 152 fig.
Keywords: prestressed membrane, canopy, technical textiles, form-finding, nonlinear analysis, panelling, designing

Abstract:

This graduation thesis presents a prestressed membrane project, i.e. a proposed canopy over a place for socializing behind the building of the Faculty for Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana. In the introductory part, the fundamental principles of this kind of structures are briefly discussed, followed by basic forms and some examples. Woven technical textiles are also described and the entire process of designing is outlined, from form-finding and analysis to panelling. The thesis continues with a presentation of computer software which is used in the process of the project design. In the first phase of the designing process five outline plans are created. For all of the designs, either the form of a saddle or a cone shape, two of the most basic forms of prestressed membranes, is chosen. Furthermore, the location of the structure is precisely described, followed by the description of the materials, the details of the construction, the supporting structure selection, and the installation process. The cost estimation of each of the discussed structures is carried out. In the next chapter, the non-linear static analysis of the two selected plans is performed and concluded that there are no significant deviations from the predicted responses of the models. Finally, in the last part of the thesis, the most suitable one from the discussed structures is chosen, on which an extensive analysis and designing is carried out, and the panel plans are presented.

ZAHVALA

Za pomoč in vodenje pri snovanju diplomske naloge bi se rada zahvalila mentorju, prof. dr. Boštjanu Branku, ter podjetju Meliar Design, ki mi je omogočilo uporabo njihovih programov MPanel in MPanel FEA.

Posebna zahvala gre mami, očetu, sestri Damjani in Domnu, ki so mi omogočili študij in me skozi vsa leta tudi podpirali in spodbujali.

KAZALO VSEBINE

Izjave.....	II
Bibliografsko-dokumentacijska stran in izveček.....	III
Bibliographic-documentalistic information and abstract.....	IV
Zahvala.....	V
1 UVOD.....	1
1.1 Predstavitev naloge.....	1
1.2 Zakaj prednapete membrane.....	1
1.3 Cilj.....	3
1.4 Zgradba diplomske naloge.....	3
2 O PREDNAPETIH MEMBRANAH.....	4
2.1 Osnovne oblike.....	5
2.2 Primeri.....	6
2.3 Material za prednapete membrane.....	7
2.4 Projektiranje prednapetih membran.....	7
2.4.1 Iskanje oblike.....	7
2.4.2 Analiza.....	8
2.4.3 Krojenje.....	10
3 UPORABLJENA RAČUNALNIŠKA ORODJA.....	12
3.1 FormFinder.....	12
3.2 Rhinoceros.....	13
3.3 MPanel.....	14
3.4 MPanel FEA.....	14
4 ZASNOVE OBLIKE NADSTREŠKA PRI STAVBI FAKULTETE ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO UNIVERZE V LJUBLJANI.....	15
4.1 Lokacija.....	15
4.2 Izbor materialov.....	16
4.3 Izbor detajlov.....	17
4.4 Izbor nosilne konstrukcije.....	18
4.5 Gradnja.....	18
4.6 Pet idejnih načrtov.....	18
4.6.1 Primer 1: Konusna konstrukcija obešena na lok.....	19
4.6.2 Primer 2: Dežnik.....	22
4.6.3 Primer 3: Tri jadra.....	26
4.6.4 Primer 4: Dva deltoida.....	29
4.6.5 Primer 5: Osmerokotnik.....	33
4.7 Ocena stroškov posamezne konstrukcije in primerjava med njimi.....	37
4.7.1 Geometrija in prednapetje.....	37
4.7.2 Ocena stroškov materiala.....	38
4.7.3 Komentar.....	43
5 STATIČNI ANALIZI DVEH ZASNOV.....	44
5.1 Primer 1: Dežnik.....	44

5.1.1	Iskanje oblike.....	45
5.1.2	Statična analiza	47
5.1.3	Dimenzioniranje.....	54
5.1.4	Krojenje membrane	55
5.1.5	Gradnja.....	57
5.2	Primer 2: Tri jadra.....	58
5.2.1	Iskanje oblike.....	58
5.2.2	Statična analiza	60
5.2.3	Dimenzioniranje.....	67
5.2.4	Krojenje membrane	68
5.2.5	Gradnja.....	69
5.3	Komentar.....	70
6	PROJEKT IZBRANE REŠITVE.....	71
6.1	Zasnova.....	71
6.2	Iskanje oblike.....	72
6.3	Statična analiza	79
6.3.1	Ocena začetnega prednapetja in začetnih dimenzij kablov.....	80
6.3.2	Izbira materialov in njihove karakteristike.....	82
6.3.3	Predpisi	86
6.3.4	Obtežba.....	88
6.3.5	Obtežni primeri	92
6.3.6	Rezultati analize	98
6.3.6.1	Centralno sedlo	99
6.3.6.2	Stranski sedli	108
6.3.6.3	Skupaj	117
6.4	Dimenzioniranje.....	118
6.4.1	Membrana	119
6.4.2	Robni kabli.....	122
6.4.3	Stebri.....	122
6.5	Krojenje membrane	129
7	ZAKLJUČEK.....	132
VIRI.....		133

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 4-1: Prednapetje membrane v osnovni in votkovni smer ter primerjava med njima.....	37
Preglednica 4-2: Dimenzije konstrukcij in velikost prostora, ki ga pokrivajo.....	37
Preglednica 4-3: Ekonomična izraba materiala in cena membrane	38
Preglednica 4-4: Količina kablov in njihova cena.....	39
Preglednica 4-5: Količina togih elementov in njihova cena	39
Preglednica 4-6: Količina detajlov in njihova cena.....	40
Preglednica 4-7: Stroški celotne konstrukcije po delih in skupaj.....	40
Preglednica 5-1: Največje napetosti v membrani in sile v kablji pri obravnavanih obtežnih kombinacijah.....	54
Preglednica 5-2: Največje napetosti v membrani in sile v kablji pri obravnavanih obtežnih kombinacijah v primeru konstrukcije »Tri jadra«	128
Preglednica 6-1: Obtežbe zaradi vplivov vetra [35]	90
Preglednica 6-2: Obravnavani obtežni primeri in kombinacijski faktorji.....	93
Preglednica 6-3: Obtežni primeri za nesimetrično porazdelitev snega po EC 1991	95
Preglednica 6-4: Obtežni primeri z obravnavano smerjo vetra	97
Preglednica 6-5: Največje napetosti in notranje sile v membrani ter kablji glede na obravnavane obtežne primere	117
Preglednica 6-6: Reakcije na mestu vpetja membran glede na obravnavane obtežne primere	118
Preglednica 6-7: Notranje sile in momenti na dnu centralnega stebra glede na obtežne kombinacije, ki upoštevajo delovanje vseh treh membran; sile in momenti so predstavljeni v globalnem koordinatnem sistemu, F_{xy} predstavlja rezultanto sil v ravnini XY, M_R pa rezultanto momentov	123
Preglednica 6-8: Uklonske oblike in njihovih uklonskih faktorjih	125
Preglednica 6-9: Uklonske oblike in njihovih uklonskih faktorjih	128

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 4-1: Prispevek posameznih gradbenih elementov k ceni celotne konstrukcije

Grafikon 4-2: Cene konstrukcij in prispevki posameznih delov

Grafikon 4-3: Cena konstrukcij na kvadratni meter pokrite površine

Grafikon 6-1: Graf napetosti in deformacije v odvisnosti od časa

Grafikon 6-2: Graf napetosti v primerjavi z deformacijo

Grafikon 6-3: Napetost v odvisnosti od deformacij pri dvoosnem testu ter določitev velikosti kompenzacije

KAZALO SLIK

Slika 2-1: Od stabilizirane vrvi do prednapete kableske konstrukcije [3].....	4
Slika 2-2: Olimpijski park v Münchnu [4].....	4
Slika 2-3: Tloris, naris, stranski ris in 3d pogled na tipično sedlasto konstrukcijo [5].....	5
Slika 2-4: Tloris, naris, stranski ris in 3d pogled na tipično konusno konstrukcijo [5].....	5
Slika 2-5: Tloris, naris, stranski ris in 3d pogled na tipično grebenasto konstrukcijo [5]	6
Slika 2-6: Nadstrešek pred goriškim športno-zabaviščnim centrom Magma X [6] (zgoraj levo), fasada hale 12 v nakupovalnem centru BTC City [7] (zgoraj desno), Burj al Araf s fasado iz prednapete membrane [8] (spodaj levo) ter stadion Moses Mabhiba v Južni Afriki [9] (spodaj desno).....	6
Slika 2-7: Osnovni in modificiran osnovni vzorec tkanja [10]	7
Slika 2-8: Kompenzacija v smeri votkovnih niti [10].....	10
Slika 2-9: Označitev krojev, smer osnovnih niti, dodatek materiala za spajanje in vodilne črte [14]	11
Slika 2-10: Primer izrisa krojev, uporabnega za avtomatski razrez [14].....	11
Slika 2-11: Izris krojev v obliki x in y koordinat (levo) in skeletni izris (desno) [14].....	11
Slika 3-1: Delo v programu FormFinder: analiza osenčenosti (levo) in ocena stroškov (desno) [16]	13
Slika 3-2: Delo s programom Rhinoceros.....	13
Slika 3-3: Orodna vrstica programa MPanel.....	14
Slika 3-4: Uporabniški vmesnik programa MPanel FEA	14
Slika 4-1: Aksonometrični pogled na razpoložljivi prostor (levo) in tloris razpoložljivega prostora (desno)	15
Slika 4-2: Čelni pogled na razpoložljivi prostor (levo) in pogled s strani (desno).....	15
Slika 4-3: Pogled na situacijo s strani (levo) in tloris (desno).....	16
Slika 4-4: Izbrani fleksibilni robni detajl [22].....	17
Slika 4-5: Aksonometrični pogled na konusno konstrukcijo podprto z lokom	19
Slika 4-6: Tlorisni (levo zgoraj) in čelni (desno zgoraj) pogled na konstrukcijo, pogled s strani (levo spodaj) ter nagnjenost loka in pritrjenost membrane nanj (desno spodaj)	19
Slika 4-7: Izometrični pogled na konstrukcijo, umeščeno v prostor.....	22
Slika 4-8: Tloris (levo zgoraj), pogled s strani (desno zgoraj) ter čelni pogled na konstrukcijo s parkirišča za fakulteto (spodaj).....	23
Slika 4-9: Konusna konstrukcija za Marakeško šolo razstavljena v parku [5].....	23
Slika 4-10: Aksonometrični pogled na konstrukcijo z obarvano membrano	26
Slika 4-11: Aksonometrični pogled na konstrukcijo, kjer je vidno tudi prekrivanje jader (levo zgoraj), tloris (desno zgoraj), čelni pogled (levo spodaj) in pogled na konstrukcijo s strani (desno spodaj)	27
Slika 4-12: Arhitektova ideja [41].....	27
Slika 4-13: Aksonometrični pogled na konstrukcijo z obarvanostjo površine membran	29
Slika 4-14: Aksonometrični pogled na konstrukcijo brez obarvanosti membran (levo zgoraj), tloris (desno zgoraj), stranski pogled (levo spodaj) ter prekrivanje jader in njihova ukrivljenost (desno spodaj)	29
Slika 4-15: Poskusna izdelava fizičnega modela konstrukcije, pogled s strani (levo) in pogled od zgoraj (desno).....	30
Slika 4-16: Fizični model konstrukcije v merilu, pogled od zgoraj (levo zgoraj), čelno (desno zgoraj) ter s strani (spodaj)	31
Slika 4-17: Aksonometrični pogled na konstrukcijo z obarvanimi membranami	33

Slika 4-18: Aksonometrični pogled na konstrukcijo z prosojnimi membranami (levo zgoraj), tloris (desno zgoraj), čelni pogled s parkirišča za fakulteto (levo spodaj) ter pogled s strani (desno spodaj)	33
Slika 4-19: Pogled na konstrukcijo z zgornje desne strani (levo zgoraj), zadnji del konstrukcije (desno zgoraj), pogled z leve strani (levo spodaj) in prikaz prekrivanja jader (desno spodaj)	34
Slika 4-20: Nadstrešek terase padalske družbe (levo zgoraj), detajl križanja koncev dveh jader (desno zgoraj), detajl obhoda enega jadra okoli drugega (levo spodaj) ter steber z vpetim jadrom (desno spodaj) [23]	35
Slika 5-1: Od idejnega načrta do modela konstrukcije "Dežnik"	44
Slika 5-2: Model membrane s podporno konstrukcijo	45
Slika 5-3: Skica fiksnih točk (levo) in nateznega obroča (desno)	45
Slika 5-4: Tloris (levo) in tridimenzionalni pogled (desno) na še ne sproščene mreže	46
Slika 5-5: Frontalni pogled (levo zgoraj), pogled s strani (desno zgoraj), tlorisni (levo spodaj) in izometrični pogled na sproščen model konstrukcije »Dežnik«	47
Slika 5-6: Pretvorba konstrukcije v končne elemente (skrajno levo), robni kabli (sredina levo), podpore (sredina desno) in smer koordinate x (skrajno desno)	47
Slika 5-7: Napetosti v membrani v stanju prednapetja v osnovni (levo) in votkovni smeri (desno)	48
Slika 5-8: Sile v kablji v stanju prednapetja	48
Slika 5-9: Rezultati testov v vetrnem tunelu za konično konstrukcijo z visoko točko (levo) [30] ter razporeditev vetrne obtežbe v smeri proti visoki točki na modelu (desno)	49
Slika 5-10: Deformirana oblika (črne barve) po nastopu obtežbe snega v primerjavi z izhodiščno obliko (zelene barve)	50
Slika 5-11: Reakcijske sile (skrajno levo), notranje napetosti v osnovni smeri (v sredini) in votkovni smeri (skrajno desno) pri obtežbi s snegom	50
Slika 5-12: Strižne napetosti (levo) in sile v kablji (desno) pri obtežbi s snegom	51
Slika 5-13: Deformirana oblika (črne barve) po nastopu obtežbe zaradi vpliva vetra v primerjavi z izhodiščno obliko (zelene barve)	51
Slika 5-14: Reakcijske sile (skrajno levo), notranje napetosti v osnovni smeri (v sredini) in votkovni smeri (skrajno desno) pri obtežbi zaradi vpliva vetra (srk)	51
Slika 5-15: Strižne napetosti (levo) in sile v kablji (desno) pri obtežbi zaradi vpliva vetra (srk)	51
Slika 5-16: Deformirana oblika (črne barve) po nastopu obtežbe zaradi vpliva vetra v smeri y v primerjavi z izhodiščno obliko (zelene barve)	52
Slika 5-17: Reakcijske sile (skrajno levo), notranje napetosti v osnovni smeri (v sredini) in votkovni smeri (skrajno desno) pri obtežbi zaradi vpliva vetra v y smeri	52
Slika 5-18: Strižne napetosti (levo) in sile v kablji (desno) pri obtežbi zaradi vpliva vetra v y smeri	52
Slika 5-19: Deformirana oblika (črne barve) po nastopu obtežbe zaradi snega v kombinaciji z obtežbo zaradi vpliva vetra v smeri y v primerjavi z izhodiščno obliko (zelene barve)	53
Slika 5-20: Reakcijske sile (skrajno levo), notranje napetosti v osnovni smeri (v sredini) in votkovni smeri (skrajno desno) pri obtežbi zaradi snega v kombinaciji z obtežbo zaradi vpliva vetra v smeri y	53
Slika 5-21: Strižne napetosti (levo) in sile v kablji (desno) pri obtežbi zaradi snega v kombinaciji z obtežbo zaradi vpliva vetra v smeri y	53
Slika 5-22: Kontrola varnosti membrane pri obtežbi s snegom	54
Slika 5-23: Kontrola varnosti robnih kablov pri obtežbi s snegom	55

Slika 5-24: Kontrola varnosti pri obtežbi s snegom pri povečanih dimenzijah kablov.....	55
Slika 5-25: Kroji desne polovice membrane (levo) ter izvedba kompenzacije (desno), pri čemer rdeče linije predstavljajo kroje pred, črne pa kroje po kompenzaciji.....	56
Slika 5-26: Detajl kroja z vodilno črto, smerjo osnovnih niti ter številčno oznako (levo) in načrt kroja za ročni razrez.....	56
Slika 5-27: Od idejnega načrta do modela konstrukcije »Tri jadra«	58
Slika 5-28: Model membrane s podporno konstrukcijo	58
Slika 5-29: Skica in koordinate fiksnih točk, na kateri so elementi povezani s centralno membrano obarvani rožnato, elementi v povezavi s stranskima membrana modro ter skupne točke vijolično	59
Slika 5-30: Tloris še ne sproščenih mrež.....	59
Slika 5-31: Tloris (levo zgoraj), frontalni pogled (desno zgoraj), pogled z desne (levo spodaj) ter pogled s sprednjega dela (desno spodaj) na sproščen model konstrukcije »Tri jadra« ...	60
Slika 5-32: Pretvorba konstrukcije v končne elemente, robni kabli, podpore (levo) in smer koordinate x (desno)	61
Slika 5-33: Pomiki membran v stanju prednapetja.....	62
Slika 5-34: Napetosti v membrani v stanju prednapetja v osnovni smeri (levo) in vtokovni (desno)	62
Slika 5-35: Sile v kablilih v stanju prednapetja	62
Slika 5-36: Premiki po nastopu obtežbe zaradi snega.....	63
Slika 5-37: Napetosti v osnovni (levo) in vtokovni smeri (desno)	64
Slika 5-38: Sile v kablilih	64
Slika 5-39: Premiki po nastopu obtežbe zaradi vpliva vetra.....	65
Slika 5-40: Napetosti v osnovni (levo) in vtokovni (desno) smeri pri obtežbi zaradi vpliva vetra	65
Slika 5-41: Sile v kablilih	65
Slika 5-42: Deformirana oblika	66
Slika 5-43: Napetosti v osnovni (levo) in vtokovni smeri (desno) pri obtežbi zaradi kombinacije vplivov snega in vetra	66
Slika 5-44: Sile v kablilih pri obtežbi zaradi kombinacije vplivov snega in vetra.....	66
Slika 5-45: Kontrola varnosti pri kritični obtežbi zaradi snega.....	67
Slika 5-46: Krojne pole centralnega sedla z izvedeno kompenzacijo.....	68
Slika 5-47: Izris za razrez enega izmed krojev (levo) in njegova povečava (desno)	69
Slika 6-1: Skica izbrane konstrukcije »Tri jadra«	71
Slika 6-2: Poimenovanje sedel.....	73
Slika 6-3: Tloris, stranski ris in naris fiksnih točk desnega sedla z dimenzijami (merilo 1:200)	74
Slika 6-4: Tloris, stranski ris in naris fiksnih točk centralnega sedla z dimenzijami (merilo 1:200)	74
Slika 6-5: Tloris, stranski ris in naris fiksnih točk centralnega (rdeča) in stranskih (modra) sedel ter skupne fiksne točke (vijolična) (merilo 1:200)	74
Slika 6-6: Mreže, povezane s svojimi fiksnimi točkami (merilo 1:100).....	75
Slika 6-7: Napetosti (n_1 in n_2), glavni radiji (R_1 in R_2) ter pomiki (u_1 in u_2) dvojno ukrivljene membrane.....	76
Slika 6-8: Orientacija mreže in legenda.....	77
Slika 6-9: Poročilo o poteku postopka relaksacije s programom MPanel za naš model.....	78
Slika 6-10: Model s sproščenimi mrežami (merilo 1:100)	78
Slika 6-11: Presek sproščenih membran označen z rdečo	79

Slika 6-12: Poročilo o osnovni geometriji membran (merilo 1:100).....	80
Slika 6-13: Poročilo o osnovni geometriji robnih kablov (merilo 1:100).....	81
Slika 6-14: Koeficienti vetra na sedlastem nadstrešku pri obremenitvi visokega kota [37]....	91
Slika 6-15: Koeficienti vetra na sedlastem nadstrešku pri obremenitvi nizkega kota [37].....	91
Slika 6-16: Vnos prednapetja na centralno sedlo	94
Slika 6-17: Nanešena obtežba snega po standardu EC 1991 na centralno sedlo (levo) in stransko (desno) sedlo (desno).....	94
Slika 6-18: Oznake oglišč membran centralnega sedla (levo) in stranskega (desno)	95
Slika 6-19: Nesimetrična porazdelitev obtežbe snega na centralnem sedlu glede na diagonalo preko nizkih (skrajno levo) in visokih točk (sredina levo) ter na stranskem sedlu glede na diagonalo preko nizkih (sredina desno) in visokih točk (skrajno desno).....	95
Slika 6-20: Koeficienti vetra glede na rezultate testa v vetrnem tunelu [37] (sredina zgoraj) ter aplikacija na obravnavani primer, centralno sedlo (levo), stransko sedlo pri vplivu vetra čez visoko točko SV1 (desno zgoraj) ter SV2 (desno spodaj).....	96
Slika 6-21: Koeficienti vetra glede na rezultate testa v vetrnem tunelu [37] (sredina zgoraj) ter aplikacija na obravnavani primer, centralno sedlo pri vplivu vetra čez nizko točko CN2 (levo) ter stransko sedlo pri vplivu vetra čez nizko točko SN1 (desno).....	97
Slika 6-22: Končni elementi za analizo centralnega in stranskega jadra (skrajno levo), modelirani robni kabli (sredina levo), členkasto vpetje robov (sredina desno) ter osnovna smer vlaken (skrajno desno)	98
Slika 6-23: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo) ter pomiki zaradi vnosa prednapetja v konstrukcijo (desno)	99
Slika 6-24: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablilih (spodaj desno) pri prvem obtežnem primeru	99
Slika 6-25: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo) ter pomiki (desno) zaradi obtežbe snega po EC 1991 za centralno membrano.....	100
Slika 6-26: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablilih (spodaj desno) pri drugem obtežnem primeru.....	100
Slika 6-27: Napetosti v membrani v glavni smeri (levo) in drugi glavni smeri (desno) pri drugem obtežnem primeru.....	101
Slika 6-28: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablilih (spodaj desno).....	101
Slika 6-29: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablilih (spodaj desno) pri nesimetrični obtežbi s snegom po EC 1991	102
Slika 6-30: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablilih (spodaj desno) pri nesimetrični obtežbi s snegom po EC 1991	103
Slika 6-31: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo) ter pomiki (desno) zaradi obtežbe snega po EC 1991 za centralno membrano.....	103
Slika 6-32: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablilih (spodaj desno)	104

Slika 6-33: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	104
Slika 6-34: Napetosti v membrani v glavni smeri (levo) in drugi glavni smeri (desno) pri četrtem obtežnem primeru	105
Slika 6-35: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	105
Slika 6-36: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	106
Slika 6-37: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	106
Slika 6-38: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	107
Slika 6-39: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	108
Slika 6-40: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike stranskega sedla ob vnosu prednapetja	108
Slika 6-41: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno) pri prvem obtežnem primeru	109
Slika 6-42: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno) pri drugem obtežnem primeru	109
Slika 6-43: Napetosti v membrani v glavni smeri (levo) in drugi glavni smeri (desno) pri drugem obtežnem primeru	109
Slika 6-44: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno) pri nesimetrični obtežbi s snegom po EC 1991, primer 3a	110
Slika 6-45: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno) pri nesimetrični obtežbi s snegom po EC 1991, primer 3b	111
Slika 6-46: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno) pri nesimetrični obtežbi s snegom po EC 1991, primer 3c	111
Slika 6-47: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno) pri nesimetrični obtežbi s snegom po EC 1991, primer 3d	112
Slika 6-48: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	112
Slika 6-49: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	113
Slika 6-50: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	113
Slika 6-51: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	114

Slika 6-52: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	114
Slika 6-53: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	115
Slika 6-54: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	115
Slika 6-55: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	116
Slika 6-56: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)	116
Slika 6-57: Varnostni faktor v centralni membrani pri obtežnem primeru št. 2 in povečava območja z najnižjimi faktorji	119
Slika 6-58: Varnostni faktor v stranski membrani pri obtežnem primeru št. 2 in povečava območja z najnižjimi faktorji	119
Slika 6-59: Pomiki centralne membrane pri obtežnem primeru 3a z označenim območjem največjih pomikov	120
Slika 6-60: Primerjava predvidene oblike membrane ter oblike po nanosu obtežbe po obtežnem primeru 3a s trikratno povečavo pomikov	120
Slika 6-61: Gradienti membrane in povečave kritičnih območij.....	121
Slika 6-62: Pomiki stranske membrane pri obtežnem primeru 3b z označenimi največjimi pomiki (levo) ter primerjava med osnovno in obliko po nastopu obtežbe s trikrat povečanimi pomiki (desno)	121
Slika 6-63: Gradienti na membrani ter povečava kritičnega območja	121
Slika 6-64: Varnostni faktor v robnih kablji centralne membrane pri obtežnem primeru št. 2 in povečava območja z najnižjimi faktorji	122
Slika 6-65: Varnostni faktor v robnih kablji stranske membrane pri obtežnem primeru št. 2 in povečava območja z najnižjimi faktorji	122
Slika 6-66: Prva uklonska oblika	125
Slika 6-67: Prva uklonska oblika	128
Slika 6-68: Izpis enega izmed krojev centralne membrane v obliki x in y koordinat, celotni izpis (zgoraj) ter detajl (spodaj levo) in povečava izpisa koordinat (spodaj desno)	130
Slika 6-69: Izrisani kroji za polovico centralne membrane brez zavihki in vari brez ogliščnih detajlov	131
Slika 6-70: Ogliščni detajl in kraj za ojačitveno zaplato	131

1 UVOD

»Če želite izvedeti, koliko je konstrukcija v resnici vredna, jo stehtajte,« je nekoč izjavil veliki ameriški inženir in arhitekt Richard Buckminster Fuller [1], ki je svoje življenje posvetil iskanju novih oblik in optimiziranih konstrukcijskih sistemov. V današnjem času se poleg denarnega aspekta pri odločanju za vrsto konstrukcije ter njeno izvedbo vedno bolj uveljavljata skrb za okolje ter dovršena estetika. V ta koš lahko spravimo tudi zelo elegantne in lahke konstrukcije iz tehničnih tkanin. Poleg tega, da so inovativne in zanimive za obiskovalce, ponujajo tudi vrsto rešitev glede omejevanja sončne svetlobe, vzdrževanja primerne notranje klime, zvočne izolacije itd. Ker so še vedno dokaj neraziskane, vsaj v primerjavi s klasičnimi konstrukcijami iz npr. armiranega betona, so zanimiv predmet raziskovanja. Kot take so vzbudile našo pozornost.

1.1 PREDSTAVITEV NALOGE

Že več časa vodstvo fakultete razmišlja o gradnji nadstreška, ki bi pokrito območje skupaj z nekaj klopni spremenilo v prostor za druženje študentov in zaposlenih. Poleg tega bi želeli postaviti konstrukcijo, ki bi predstavljala samo ustanovo in delo njenih študentov ter služila kot zgled za novo, inovativno rešitev vsakdanjega problema in bi tako spodbudila podobne gradnje. Najbolj primeren prostor za izvedbo takšnega objekta je manjši travnik za stavbo fakultete, med parkiriščem in zgradbo računovodstva. Seveda nadstrešek ne bi smel predstavljati velike motnje za sosednje stavbe in zaposlene, prav tako pa bi se moral enostavno odstraniti v primeru spremembe namembnosti območja.

Naša naloga bo izvedba celotnega projekta nadstreška novega prostora za druženje, in sicer od preliminarnega izrisa več primernih arhitektonskih rešitev za izvedbo omenjenega nadstreška preko analize nekaterih izbranih zasnov do dimenzioniranja končne, izbrane konstrukcije in izrisa načrtov, z drugimi besedami – izdelava celotnega projekta za gradnjo.

Glavne zahteve, ki bodo usmerjale naše predvsem arhitektonsko načrtovanje, so torej:

- estetskost in inovativnost konstrukcije,
- lahka odstranljivost,
- cenovna ugodnost in
- funkcionalnost (ne predstavlja ovire zaposlenim).

Seveda mora konstrukcija zadostovati tudi bistvenim zahtevam objekta, kot so mehanska odpornost in stabilnost, požarna varnost ter varnost pri uporabi [2].

1.2 ZAKAJ PREDNAPETE MEMBRANE

Glede na zahteve naročnika smo sklenili, da bo najbolj primerna vrsta konstrukcije za izvedbo nadstreška prednapeta membranska konstrukcija oz. ena izmed njenih mnogih oblik. Te so zelo estetske, razmeroma nove na trgu (vsaj v Sloveniji), enostavne za montažo, cenovno ugodne, zelo prilagodljive in predstavljajo izziv pri načrtovanju.

Estetika in cenovna ugodnost sta sicer par, ki ga ne vidimo pogosto skupaj, vendar so ravno prednapete membrane dokaz, da se odlično razumeta. Zanimive oblike teh vrst konstrukcij so namreč posledica učinkovite izrabe materiala, saj pri prevzemu obtežbe sodeluje celoten

prez materiala. To dosežemo tako, da celotno površino membrane prednapnemo na tak način, da ta zavzame minimalno površino med podporami in s tem skrbi, da se vertikalna obtežba na najučinkovitejši način prenese do podpornih elementov.

Čeprav se človeku na prvi pogled morda ne zdi tako, so prednapete membrane varne konstrukcije, v primerjavi s klasičnimi objekti imajo enako ali višji stopnjo varnosti. Ker je lastna teža zaradi optimalnega načrtovanja in lahкости materiala zanemarljiva glede na velikost objektov, največjo »nevarnost« predstavljata obtežbi snega in vetra. Zelo so primerne tudi za potresna območja, saj so zaradi zanemarljive lastne teže neobčutljive na potresno obtežbo. Podporni elementi ne predstavljajo večjih obremenitev, jih je pa potrebno dodatno stabilizirati za primer pretrganja membrane.

Ker ima sama membrana zelo majhno lastno težo, potrebuje manjše podporne, tlačne elemente, kot bi jih zahtevala kakšna armiranobetonska strešna konstrukcija. Zato so tudi temelji veliko manjši. Zaradi manjšega obsega betoniranja in možnosti opravljanja večine del v delavnici je posledično gradnja na lokaciji veliko hitrejša, transport pa manj obsežen. Odstranitev konstrukcije je enostavna, za sabo pusti zgolj kakšen manjši temelj.

Čeprav so membranske konstrukcije v tujini že dobro uveljavljene in se uporabljajo ne samo za strešne konstrukcije velikih razponov (npr. stadioni), ampak tudi za razna nadkritja v in ob privatnih objektih (npr. nadstrešek terase) ter se vedno bolj inovativno vključujejo v objekte kot deli z dodano funkcijsko vrednostjo (npr. fasada z večjo propustnostjo za svetlobo), jih je pri nas le za vzorec. Sklepamo lahko, da bi postavitev konstrukcije te vrste pri nas še vedno delovala inovativno in sveže, poleg tega pa bi predstavila Slovencem slabo poznano, elegantno rešitev za probleme z manjšimi strešnimi strukturami.

Vse zgoraj naštet lastnosti se združijo v poimenovanju prednapetih membran kot trajnostno naravnanih konstrukcij, kar je postalo še posebej pomembno v zadnjem času, ko se veliko govori o klimatskih spremembah in se stremi k čim nižji porabi neobnovljivih virov in čim manjšemu vplivu na okolje tudi na področju gradnje objektov.

Med prednosti za izbiro prenapetih membran bomo, glede na to, da gre za projekt v okviru študija, prišteli tudi princip njihovega načrtovanja in še nestandardiziranost postopka. Zahtevajo dobro poznavanje vseh faz na poti do končnega izdelka in uporabljenih materialov ter konstantne iteracijske postopke na vsaki stopnji v postopku projektiranja, zato jih načrtujejo tako arhitekti kot inženirji. Ker evropski standard za tovrstne konstrukcije še ni oblikovan, še ni jasnih zahtev, ki bi jim morale ustrezati, zato je projektiranje v veliki meri odvisno od načrtovalčeve informiranosti o prednapetih membranah, inženirske presoje in izkušenj. Poleg tega je potrebno pridobiti ustrezno programsko opremo, saj je brez nje projektiranje zelo zahtevno, morda celo nemogoče, še posebej za začetnika. Postopek projektiranja ni enak postopkom pri klasičnih konstrukcijah, zato je primeren za zaključek dodiplomskega študija, saj študentu daje možnost, da spozna nekaj novega, čemur v času študija ni prišel na sled. Poleg tega zahteva tudi precej dela in veliko študija za pridobitev osnovnega znanja o takih konstrukcijah.

1.3 CILJ

Dolgoročni cilj naloge je postavitve nadstreška nad prostorom za druženje za stavbo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, ko bodo za to na voljo sredstva. Cilj diplomskega dela je izvedba celotnega projekta konstrukcije. Ta vsebuje arhitekturno zasnovano, analizo objekta, krojenje membrane ter dimenzioniranje podpor in ostalih elementov objekta.

1.4 ZGRADBA DIPLOMSKE NALOGE

Diplomska naloga je sestavljena iz več delov, prvi je bolj teoretične narave, ostali pa praktične. Po uvodu se začne poglavje o prednapetih membranah, v katerem smo raziskali njihov izvor, delovanje, osnovne oblike, material za izdelavo in principe načrtovanja.

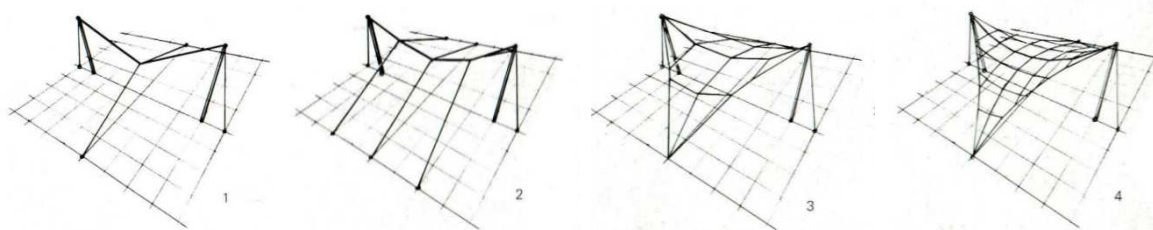
Tretje poglavje pokriva delo na izbranem projektu prednapete membrane. Predstavljeni je kronološko, saj so tako določeni koraki bolj smiselno prikazani. Sprva smo se morali seznaniti z računalniškimi orodji, ki smo jih pri nalogi uporabljali, nato smo morali pridobiti podatke o lokaciji, na kateri naj bi se konstrukcija postavila. Na podlagi teh smo lahko začeli z izdelavo prvih idejnih načrtov, za katere smo našli navdih v različnih virih. Njihove predstavitve so vpete v opise idejnih načrtov. Preliminarni izbor materialov, nosilne konstrukcije in detajlov je opisan pred predstavitvijo vseh konstrukcij, medtem ko je na koncu predstavljena ocena stroškov konstrukcije, ki služi bolj kot primerjava med konstrukcijami za lažjo izbiro.

Peto poglavje se nadaljuje z nelinearnimi analizami enostavnih primerov nadstreškov, pri katerih so predstavljeni zgolj osnovni principi in rezultati. Zadnje podpoglavje je posvečeno izbrani konstrukciji in njeni podrobnejši analizi ter načrtovanju.

V zaključku so strnjene misli ob projektiranju nadstreška ter kritična ocena uspešnosti izvedbe projekta.

2 O PREDNAPETIH MEMBRANAH

Glavna lastnost prednapetih membran, iz katere nato izhajajo skoraj vse njihove prednosti, je prenos obtežbe, ki deluje izven njihovih ravnin, z dodatnim nategom ali sprostitvijo vlaken, ki so že v neobremenjenem stanju prednapeta. Mehanizem deluje podobno kot vrv za obešanje perila – če ta ne bi bila napeta, ne bi mogla prenašati obremenitve, ki jo povzroča lastna teža obešenega perila. Vendar v tem primeru, ko pride do prečne obtežbe, kot je na primer veter, vrv zaniha – tega si pri objektih ne moremo privoščiti. Torej moramo našo vrv za obešanje perila še dodatno stabilizirati. To najučinkoviteje in najelegantneje naredimo s še eno vrvjo, ki je na prvo pravokotna in napeta tako, da prvo pritiska k tlom (slika 2-1).



Slika 2-1: Od stabilizirane vrvi do prednapete kableske konstrukcije [3]

Če povečamo število vrvi v obeh smereh, dobimo prednapeto kablesko konstrukcijo, če pa kable zamenjamo s trakovi tkanine, dobimo prednapeto membrano, ki je v eni smeri konkavno, v drugi pa konveksno ukrivljena. Taki vrsti ploskve pravimo dvojno ukrivljena, in sicer antiklastična.

Ne glede na to, da se zdi razlaga delovanja take konstrukcije morda malce zapletena, so te z nami že zelo dolgo časa – najbolj razširjene membranske konstrukcije so namreč šotori. Od najbolj enostavnih začetkov pri nomadskih ljudstvih so se nato razvile v vedno bolj kompleksne in zanimive konstrukcije, tako da jih dandanes lahko najdemo pokrivajoče velika letališča, stadione, razstavišča, železniške postaje in še veliko drugih objektov. Kot začetnika prednapetih membran štejemo berlinskega arhitekta Otta Freia in njegov največji dosežek olimpijski park v Münchnu (gre za prednapeto kablesko konstrukcijo) (slika 2-2).



Slika 2-2: Olimpijski park v Münchnu [4]

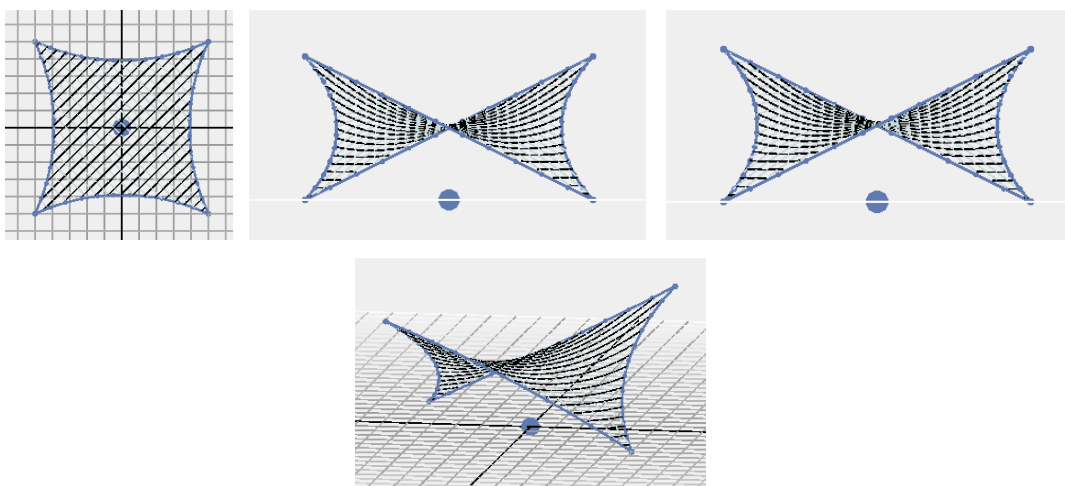
2.1 OSNOVNE OBLIKE

Kot je razvidno iz zgornje slike, so se oblike prednapetih membran skozi leta še dodatno razvile. Čeprav je edina omejitev pri iskanju oblike napetost membrane, lahko večino oblik poenostavimo v eno ali kombinacijo več osnovnih oblik. Te so:

- sedlaste,
- konusne in
- grebenske konstrukcije.

Sedlaste oblike

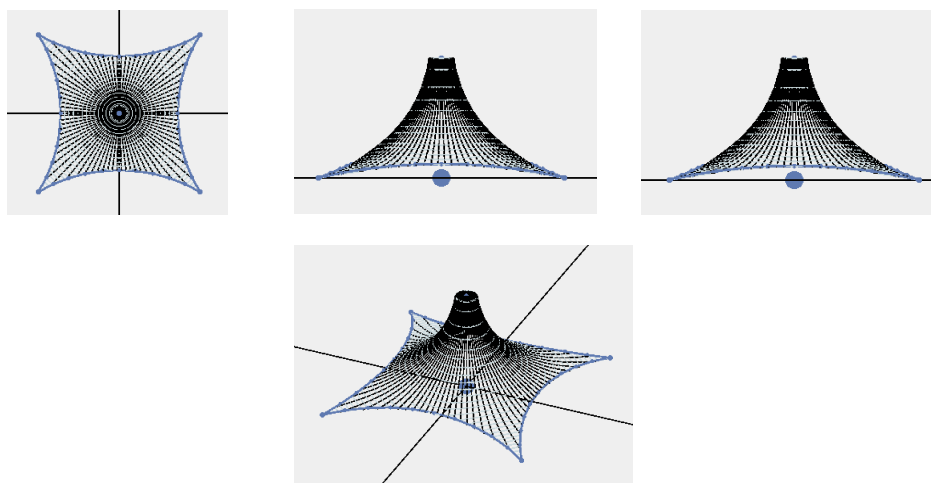
Pri sedlasti konstrukciji gre za menjavanje nizkih in visokih točk, ki so povezane z dvojno ukrivljeno membrano. Njeno ukrivljenost določajo višinske razlike med točkami (slika 2-3).



Slika 2-3: Tloris, naris, stranski ris in 3d pogled na tipično sedlasto konstrukcijo [5]

Konusne oblike

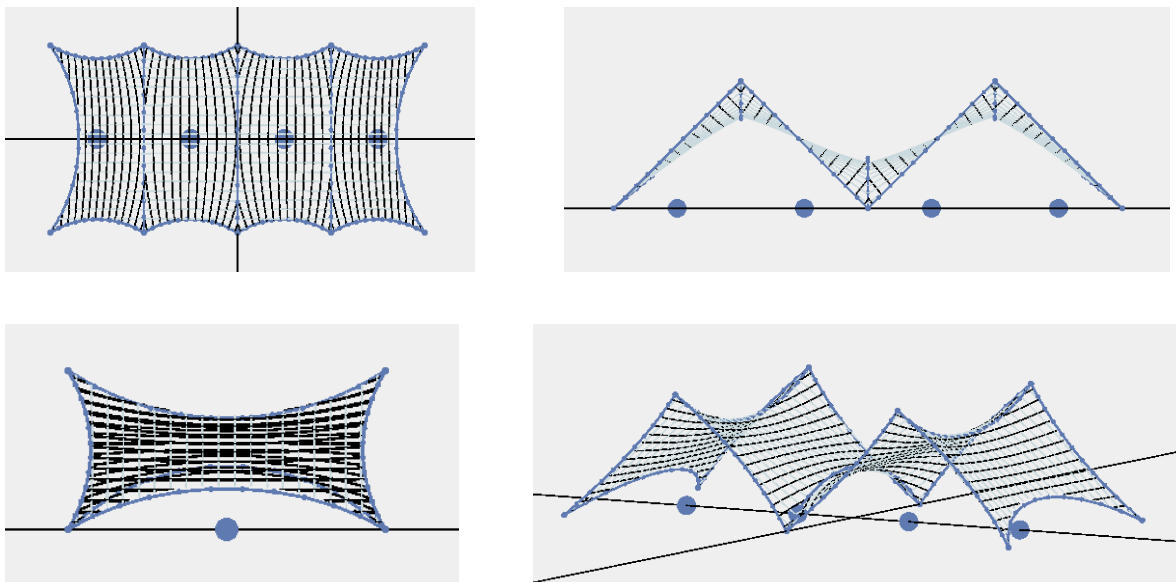
Konusne membranske konstrukcije oblikujemo tako, da eno točko, ki napenja membrano, potisnemo navzgor ali navzdol iz ravnine ostalih točk. Najbolj pogosto to obliko zasledimo pri dežnikih (slika 2-4).



Slika 2-4: Tloris, naris, stranski ris in 3d pogled na tipično konusno konstrukcijo [5]

Valovite oblike

Grebenaste konstrukcije niso tipične dvojno ukrivljene membrane, njihova ukrivljenost je minimalna. Sestavljajo jih zgornji, grebenški kabli, ki so ukrivljeni navzdol, in spodnji, dolinski kabli, ki so ukrivljeni navzgor. Med njimi je napeta membrana (slika 2-5).



Slika 2-5: Tloris, naris, stranski ris in 3d pogled na tipično grebenasto konstrukcijo [5]

2.2 PRIMERI

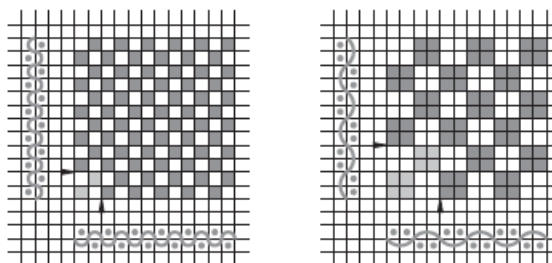


Slika 2-6: Nadstrešek pred goriškim športno-zabavišnim centrom Magma X [6] (zgoraj levo), fasada hale 12 v nakupovalnem centru BTC City [7] (zgoraj desno), Burj al Araf s fasado iz prednapete membrane [8] (spodaj levo) ter stadion Moses Mabhida v Južni Afriki [9] (spodaj desno)

V Sloveniji lahko najdemo nekaj sedlastih oblik prednapetih membran kot nadstreškov in nekaj fasad iz tkanine (slika 2-6 zgoraj), v svetu pa veliko število zelo različnih oblik in velikosti (slika 2-6 spodaj).

2.3 MATERIAL ZA PREDNAPETE MEMBRANE

Tkanina je izdelana s prekrivanjem osnovnih in votkovnih niti, njihova gostota v eni in drugi smeri je odvisna od števila niti. Križanje niti je mogoče na veliko število načinov, v proizvodnji tehničnih tkanin za membranske konstrukcije pa prevladujeta dva, in sicer osnovni način in modificiran osnovni (slika 2-7). Pri obeh tipih se najprej vpne osnovne niti, nato pa se, skladno z vzorci, votkovne niti vtke s pomočjo ladjice. Tehnične tkanine se na koncu prekrije s polimernimi premazi, ki dodatno zaščitijo tkanino pred zunanjimi vplivi, ki so jim zunanje konstrukcije ves čas izpostavljene.



Slika 2-7: Osnovni in modificiran osnovni vzorec tkanja [10]

2.4 PROJEKTIRANJE PREDNAPETIH MEMBRAN

Kot smo že omenili, se proces načrtovanja prednapetih membran zelo razlikuje od načrtovanja standardnih konstrukcij. To zahteva dodatno usposobljenost inženirja in specifična programska orodja.

Tri osnovne in najpomembnejše faze projektiranja so:

- iskanje oblike,
- nelinearna statična analiza in
- krojenje membrane.

2.4.1 ISKANJE OBLIKE

Iskanje oblike je najpomembnejši del načrtovanja prednapetih membran, saj ta ni poljubna, ampak odvisna od napetosti v tkanini. Obstajajo posebni postopki, ki nam kot rezultat dajo antiklastično ploskev, ki je napeta v vseh smereh in sposobna prenašati obremenitev, ki nanjo deluje izven njene ravnine. Med te postopke sodijo fizično ali eksperimentalno in računalniško določanje oblike.

Dokler računalniki in njihova programska oprema niso bili dovolj razviti, so se uporabljale predvsem fizične metode, in sicer eksperimentalno iskanje oblike z opno iz milnice ter z elastičnimi tkaninami.

Glavna lastnost milnice je njena površinska napetost, kar omogoča tvorjenje npr. milnih mehurčkov. Če poljubno oblikovano zaprto krivuljo iz žice pomočimo v milnico, bo ta tvorila opno, ki bo zavzela minimalno površino med mejami, postavljenimi s krivuljo, kar je točno to, kar iščemo. Ker bo naš model hitro počil, moramo posneti čim več fotografij iz čim več različnih kotov. Slabosti takega načina iskanja oblike sta, da ima milnica v vseh smereh enake napetosti, kar za prednapete membrane ne drži vedno (npr. pri konusnih konstrukcijah), in da je lastna teža takih modelov prevelika v primerjavi z nivojem napetosti v njih. Pri realnih konstrukcijah je lastna teža zanemarljiva, pri opnah iz milnice pa jo lahko kot tako obravnavamo le za zelo majhne modele.

Elastične tkanine, kot je npr. najlon, imajo lastno težo v primerjavi s prednapetjem zelo majhno, kar omogoča gradnjo večjih modelov. Te je mogoče izdelati hitro in preprosto. Na mehko podlago zapičimo paličice, ki predstavljajo jambore in loke, čeznje napnemo kos najlonskih nogavic in ga na robovih fiksiramo z risalnimi žeblički ali drugimi kovinskimi zankami v podlago, tako da tvorimo antiklastično površino. Nato s flomastrom po najlonu označimo potek robnih kablov in jih načrtamo s tekočim lepilom. Ko se to posuši, odstrižemo odvečni najlon in model je narejen.

Žal so omenjeni modeli zelo nenatančni in se jih v današnjem času pri dimenzioniranju ne poslužujemo, so pa zelo dobri za lažjo predstavo. Pred razvojem računalniških programov so se posluževali izjemno preciznih modelov ter analitičnih računskih metod.

Ko za določanje osnovne oblike membrane uporabljamo računalnik, se problem prevede na iskanje ravnotežja napetosti v membrani v posameznih točkah. To je iterativni postopek, ki uporablja eno od numeričnih računskih metod – metodo gostote sil, metodo dinamične relaksacije ali optimizacijo z metodo končnih elementov.

Pri metodi gostote sil uvedemo novo spremenljivko, količnik med osno silo (upoštevata se le prednapetje) in dolžino posameznega linijskega elementa, ki sestavlja mrežo. Začnemo s predpostavljanim vrednosti tega parametra za vsak element in rešujemo sistem linearnih enačb, ki jih dobimo iz ravnotežnih enačb za vsak element posebej. Neznanke so koordinate vozlišč. Postopek ponavljamo, dokler za vsa vozlišča ne veljajo ravnotežne enačbe.

Pri metodi dinamične relaksacije gre za podoben princip, le da tu mrežo upoštevamo kot nihajoči sistem. Vozliščem pripišemo maso (lastna teža, včasih tudi fiktivna obtežba), togost in dušenje, neznanka pa je prednapetje oz. zunanja sila v vsakem vozlišču. Sistem zanihamo in izračunamo iteracije, dokler se sistem ne postavi v ravnotežno lego [11].

2.4.2 ANALIZA

Pri statični analizi preverjamo notranje sile in pomike v membrani, sekundarni (kabl) in primarni nosilni konstrukciji ter reakcije v podporah. Membrano in kable kontroliramo po metodi maksimalnih dovoljenih napetosti, ki je danes manj pogosto uporabljena pri projektiranju kot metoda mejnih stanj, je pa v tem primeru primernejša. Del konstrukcije iz tkanine se namreč ne odzove enako na različno razporeditev obremenitev, poleg tega pa je potrebno na strani materiala upoštevati večje varnostne faktorje zaradi večjega števila možnosti za porušitev. Vse ostale dele konstrukcije kontroliramo po metodi mejnih stanj, ki jo

uporablja Eurocode standard. Model, ki smo ga dobili pri iskanju oblike, moramo dopolniti še z materialnimi lastnostmi, ki jih dobimo iz rezultatov dvoosne preiskave [12].

Obtežba in obtežne kombinacije

Stalno obtežbo predstavlja prednapetje in lastna teža konstrukcije, ki je zanemarljiva, saj sta tako tkanina kot nosilna konstrukcija lahki v primerjavi s klasičnimi npr. armirano betonskimi konstrukcijami. Priporočeno je, da naj bi prednapetje pri PET/PVC membranah dosegalo vrednost 1,3% povprečne natezne trdnosti v obeh smereh, koeficient prednapetja pa naj bi dosegal vrednosti od 0,25 do 4 [12].

Ker prednapete membrane večinoma igrajo vlogo streh, koristna obtežba ni predvidena. Pri zelo velikih konstrukcijah lahko izračunamo vpliv točkovne obremenitve zaradi vzdrževanja. Potresna obtežba je zanemarljiva, ker je taka tudi lastna teža, prav tako je nepomembna tudi temperaturna obtežba. Edina spremenljiva vpliva, ki ju pri analizi prednapetih membran upoštevamo, sta sneg in veter. [13]

Sneg ne predstavlja večje težave za določitev, največjo obtežbo določimo v skladu z Eurocode standardom.

S pomočjo istega standarda določimo tudi tlak zaradi vetrne obtežbe, težave se pojavijo pri njegovi porazdelitvi po površini membrane. Za enostavne geometrije stavb razporeditev koeficientov najdemo v standardu, za ostale, kompleksnejše oblike, si moramo pomagati z različnimi priročniki in rezultati že izvedenih testov, za večje projekte pa je potrebno opraviti teste v vetrnem tunelu [13].

Odziv konstrukcije na obremenitev spremljajo veliki pomiki, ki povzročijo dodatno ukrivljenje membrane v eno smeri, s tem pa večjo togost. Na tak način membrana zelo učinkovito prenaša obtežbo. Smer delovanja obtežbe se ves čas spreminja, napetosti pa se ne povečujejo linearno z obtežbo. Torej gre za nelinearno obnašanje, kar za sabo prinese nelinearno analizo. Ta je veliko bolj kompleksna kot linearna, ki se jo uporablja pri analizi klasičnih konstrukcij, vendar je dandanes že razvita do enakovrednega nivoja.

Vrednosti varnostnih faktorjev za membrane in kable so odvisne od kvalitete izdelave in vplivov okolja. Gibljejo se med 5 in 7 za natezno trdnost tkanine in okrog 2,5 za kable. Natančnejšo določitev faktorjev lahko opravimo po različnih standardih oz. priporočilih, kot so Priporočila delovne skupine 7 IASS, Francoski vodič za projektiranje trajnih prednapetih membran, DIN 4134 in disertacija o mehničnem obnašanju spojev prevlečenih tkanin, Italijanski standard, Priporočila združenja za membranske konstrukcije Japonske in ASCE standard [12]. Vsi naštetih za določanje faktorjev upoštevajo vrsto in trajanje obtežbe, velikost konstrukcije, onesnaženje, reološke pojave, vrsto materiala, rokovanje z njim in še vrsto drugih vplivov. Po pregledu standardov in priporočil lahko zaključimo, da je za trajne in srednje dolgo trajne konstrukcije minimalen faktor varnosti napetosti za membrane 5.

V nobenem od prej naštetih standardov in priporočil pri izračunu varnostnega faktorja ni upoštevano širjenje raztrganin, ki pa je zelo pomembno, saj se je že večkrat izkazalo, da je bila za porušitev membran kriva ravno nizka odpornost proti širjenju raztrganin. Tudi to preverjamo s testi, in sicer enoosnimi, pri katerih je v vzorec širok 40 cm in dolg 100 cm vrezana 4 cm dolga linija. Izkazalo se je, da se natezna trdnost tkanin v prisotnosti reza

zmanjša 3- (PET/PVC) oz. 4-krat (FG/PTFE). Priporočeno je, da se za vse vrste tkanin uporablja faktor 4 za zadostitev odpornosti prosti pretrgu [12].

2.4.3 KROJENJE

Pri krojenju prednapete membrane moramo biti pozorni na nekaj osnovnih pravil, ki pripomorejo k boljši kvaliteti izdelave in obnašanju konstrukcije. Ta so:

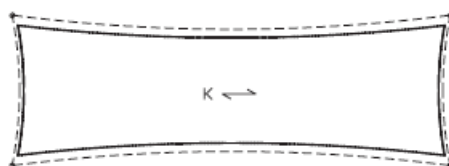
- Šivi potekajo v smeri največjih napetosti, tako da so napetosti, ki potekajo pravokotno na šive, najmanjše. Če šivi potekajo v smeri največjih napetosti, pripomorejo tudi k večji trdnosti materiala zaradi podvajanja materiala na mestu šiva.
- Število krojev mora biti tako veliko, da strižne napetosti ne bodo presegle zgornje meje.
- Šivi se spremenijo v vsakem kotu in ob krivini.
- Število krojev mora biti dovolj veliko, da se prečne niti ne deformirajo preveč.
- Pomanjšani model potrebuje enako število krojev kot večji model. [14]

Krojenje je postopek dimenzioniranja in razporejanja trakov tridimenzionalne membrane na dvodimenzionalen zvitek tkanine. Sliši se enostavno, vendar je antiklastične površine nemogoče preslikati na ploskev brez napake oz. popačenja. Kroje običajno izbiramo tako, da trakovi tkanine potekajo v smeri maksimalnih napetosti, v drugi smeri pa membrano varimo ali šivamo. Spoji namreč predstavljajo šibkejša mesta in jih zato večinoma porazdelimo tja, kjer je potrebna odpornost materiala manjša. Upoštevati moramo tudi možnosti obdelave tkanine in način postavitve. S krojenjem lahko dosežemo močan estetski učinek [15].

Kroji nimajo ravnih robov, ampak so ti konveksno ali konkavno ukrivljeni, odvisno od smeri ukrivljenosti membrane. Običajno kroje rišemo z upoštevanjem geodetk, to so najkrajše linije, ki potekajo od ene do druge točke na ploskvi. Širina krojev je odvisna od ukrivljenosti, strukturnih zahtev in velikosti zvitkov, v katerih se tkanina proizvaja [15].

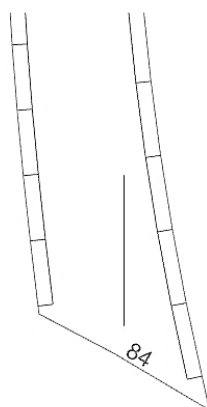
Kompenzacija

Ker se fleksibilni materiali deformirajo pod vplivi obtežbe, moramo dimenzije krojev prilagoditi velikostim skrčkov oz. raztezkov membrane. Postopek zmanjšanja krojev imenujemo kompenzacija in jo izvajamo zato, da po postavitvi membrana doseže predvidene stopnje prednapetja pri predvideni geometriji. Postopek upošteva elastične deformacije membrane in kablov ter lezenje membrane. Če se kje membrana pri končni postavitvi skrči, potem moramo v fazi načrtovanja izvesti dekompenzacijo, torej moramo kraj povečati. Kompenzacija v osnovni smeri ni nujno istega deleža kot kompenzacija v vtokovni smeri (slika 4-1) [10].



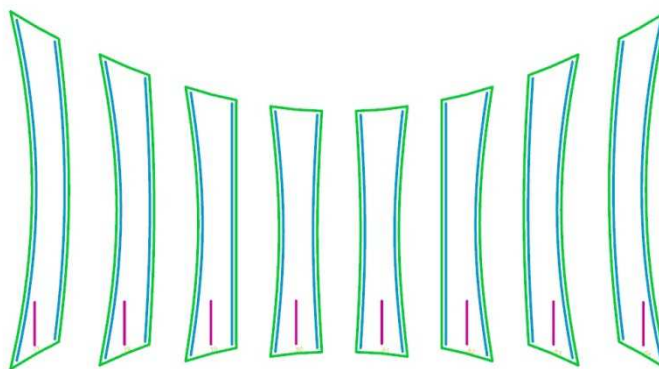
Slika 2-8: Kompenzacija v smeri vtokovnih niti [10]

Izris za razrez

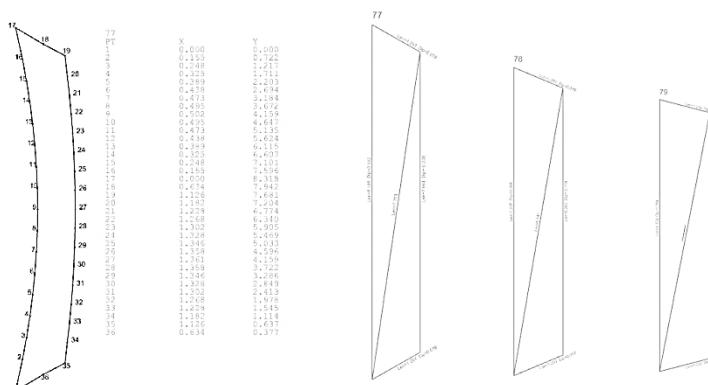


Slika 2-9: Označitev krojev, smer osnovnih niti, dodatek materiala za spajanje in vodilne črte [14]

Kompenziranim krojem moramo sedaj dodati še rob, ki bo uporabljen za spajanje trakov. Izrišemo vodilno črto, ki označuje točke, kjer se pritrdi naslednji trak. Vsak kraj označimo z zaporedno številko za lažje spajanje, označimo pa tudi potek osnovnih niti (slika 2-9). Nato izrišemo kroje glede na to, kako bodo izrezani. Če bomo uporabili avtomatske rezalnike, potem morajo biti kroji izrisani v plasteh, kar omogoči avtomatično sledenje stroja različnim procesom, ki jih mora opraviti (slika 2-10). Če bodo kroji izrezani ročno, uporabimo način izpisa koordinat vozlišč (slika 2-11 levo). Včasih je za kontrolo uporabno imeti tudi sliko okostja krojev, ki prikazuje glavne dimenzije in velikost ukrivljenosti vsakega roba (slika 2-11 desno).



Slika 2-10: Primer izrisa krojev, uporabnega za avtomatski razrez [14]



Slika 2-11: Izris krojev v obliki x in y koordinat (levo) in skeletni izris (desno) [14]

3 UPORABLJENA RAČUNALNIŠKA ORODJA

Pri snovanju oblik prednapetih membran ter nato analizi le-teh smo uporabili različna računalniška orodja. Osnovno arhitektonsko zasnovo smo iskali s pomočjo grafičnega programa FormFinder. Ta poleg osnovne, izrisa arhitektonske zasnove konstrukcije, ponuja tudi veliko drugih, komplementarnih funkcij, kot je knjižnica postavljenih konstrukcij iz tkanine, seznam tkanin in folij ter nekaterih detajlov, topološka analiza konstrukcije in računalno za oceno obtežbe snega in vetra, obremenitve membrane, kablov in stebrov. Za natančnejšo analizo in dimenzioniranje smo uporabili programa MPanel in MPanel FEA, ki delujeta kot vtičnika grafičnemu programu Rhinoceros. Slednji je enostaven za uporabo in primeren tako za inženirje kot za oblikovalce. Izdelka podjetja Meliar Design MPanel in MPanel FEA sta zasnovana posebej za oblikovanje in analizo konstrukcij iz membran, torej mehansko in pnevmatično prednapetih. Medtem ko MPanel omogoča izpeljavo vseh potrebnih faz za izdelavo in sprostitev modela ter njegovo končno krojenje, MPanel FEA pokriva nelinearno analizo, ki je ključnega pomena za dimenzioniranje delov konstrukcije.

3.1 FORMFINDER

Formfinder je življenjsko delo avstrijskega arhitekta in inženirja računalništva dr. Roberta Wehdorn-Roithmayrja, ki ga je začel razvijati v okviru svojega doktorskega študija na Dunajski tehnični univerzi, kjer še vedno predava. Je rezultat večletnih raziskav in izkušenj, pridobljenih v praksi in poskuša olajšati delo vsem načrtovalcem prednapetih membranskih konstrukcij v začetnih fazah oblikovanja, načrtovanja in ocene stroškovne učinkovitosti. Pri njegovi nadgradnji je sodelovala vrsta inženirjev, arhitektov in matematikov, pa tudi več podjetij oz. proizvajalcev gradbenih elementov, ki jih najdemo pri tovrstnih konstrukcijah [16].

Program je enostaven za uporabo, približno kot list papirja in svinčnik [16]. Njegova glavna operacija je izračun ravnotežne oblike konstrukcije pri podanih fiksnih podpornih točkah in velikosti prednapetja v membrani in robnih kablji. To je tudi ena izmed osnovnih razlik med načrtovanjem prednapetih membran in klasičnih konstrukcij, saj v tem primeru oblika konstrukcije ni znana vnaprej in se lahko spreminja tudi v odvisnosti od predvidene obtežbe.

Omenjeno orodje je zelo primerno za predstavitev idej inženirja ali arhitekta naročnikom, saj omogoča enostaven 3-dimenzionalen ogled konstrukcije in z velikim številom možnosti prilagoditve prikaza tudi jasnejšo predstavitev z izbrano barvno shemo.

Poleg zastonjske verzije je mogoče kupiti tudi licenčno, ki omogoča uvoz načrtov iz grafičnih programov kot sta AutoCAD in Rhinoceros ter izvoz konstrukcije v programe za analizo kot je EASY.

V zadnjem času so programu dodali različne aplikacije, ki omogočajo pregled že postavljenih membranskih konstrukcij in ogled detajlov ter tehničnih membran, ki jih je možno najti na tržišču, primerjajo izrisano konstrukcijo s osnovnimi oblikami ter izračunajo približno obtežbo in obremenitve v elementih podporne konstrukcije.

Program je namenjen predvsem skiciranju in kot tak odlično deluje. Problemi se pojavijo, če želimo elemente narisati bolj natančno, kje potegniti kakšno vzporednico ali pravokotnico, saj to pripelje do ročnega vnašanja koordinat vsake točke posebej. Iz teh razlogov skice na

trenutke niso povsem točne, a so vseeno dovolj natančne, da si lahko bralec predstavlja dejansko stanje po izgradnji.



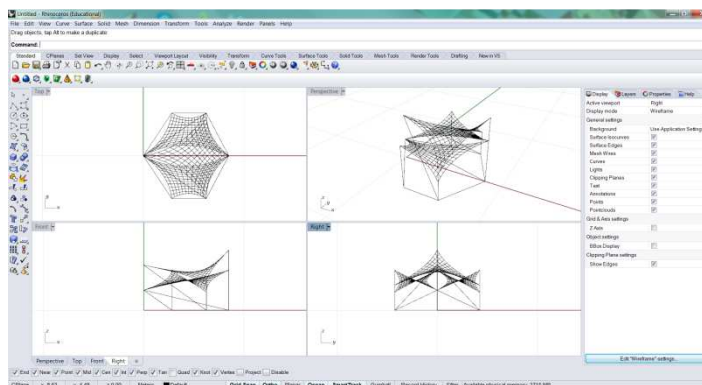
Slika 3-1: Delo v programu FormFinder: analiza osenčenosti (levo) in ocena stroškov (desno) [16]

3.2 RHINOCEROS

Rhinoceros je komercialni program za tridimenzionalno modeliranje in programsko orodje za računalniško podprto načrtovanje. Razvili so ga v severno ameriškem zasebnem podjetju Robert McNeel & Associates, ki je bilo ustanovljeno leta 1980 [17].

Program je razvit za Microsoftov operacijski sistem Windows, beta verzija je dostopna tudi za uporabnike OS X. Osnovan je na NURBS (angl. non-uniform rational basis spline) krivuljah, ki omogočajo matematično natančne predstavitve krivin in ploskev poljubnih oblik. Zaradi fleksibilnosti in natančnosti tega sistema omogoča modeliranje za zelo različne procese, od ilustracije in animacije do proizvodnih dejavnosti. Tako ga uporabljajo notranji in zunanji oblikovalci v navtičnih, vesoljskih in avtomobilskih programih, pa tudi izdelovalci gospodinjskih in pisarniških aparatov, pohištva, medicinske in športne opreme, obutev in nakita ter seveda animatorji in grafični umetniki [18].

Prednost modeliranja z NURBS krivuljami, v primerjavi z ostalimi grafičnimi modeli, je, da so ukrivljenosti lepe, krivulje oz. ravnine pa gladke. Zaradi teh lastnosti je z dodatnimi vtičniki Rhino (krajše za Rhinoceros) uporaben tudi za gradbenike, na primer pri načrtovanju prednapetih membran [19].



Slika 3-2: Delo s programom Rhinoceros

3.3 MPANEL

MPanel je programski vtičnik, ki deluje v standardnih CAD programih, AutoCAD in Rhinoceros. Razvija ga podjetje iz Velike Britanije, Meliar Design, in je njihov paradni izdelek. Razvit je bil v pomoč projektantom prednapetih tekstilnih membran, uporaben pa je lahko tudi za napihljive strukture. Oblikovan je kot dodatna, plavajoča orodna vrstica in sodeluje pri vseh fazah načrtovanja – od iskanja osnovne oblike do končne proizvodnje krojev.

Najprej moramo v programu za modeliranje izrisati fiksne točke oz. osnovo za graditev mreže oz. prednapete membrane. Nato izrišemo osnovno mrežo, ki ji podamo število razdelitev in ki še ni v ravnotežni legi. Zatem zaženemo program. Ta nam poišče osnovno obliko naše konstrukcije z iteriranjem pozicij vozlišč mreže k ravnotežnemu stanju vseh sil. V tem delu za obtežbo upošteva le prednapetje membrane, ki mu ga v začetku podamo. Ko imamo obliko membrane, jo statično analiziramo s pomočjo vtičnika MPanel FEA. Po končani analizi membrano skrojimo, tako da uporabimo avtomatične funkcije ali krojenje nadzorujemo sami, večinoma s pomočjo presečnih premic na mestih, kjer želimo imeti rob posameznega traku [20].

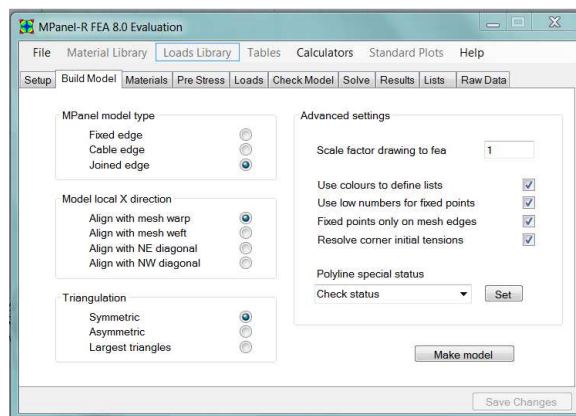


Slika 3-3: Orodna vrstica programa MPanel

3.4 MPANEL FEA

MPanel FEA je tako kot MPanel programski vtičnik za AutoCAD in Rhinoceros. Je nadgradnja prej omenjenega vtičnika – določa napetosti v tkanini in kablji in vokalne reakcije pod različnimi obremenitvami. Takšna analiza je zelo kompleksna, saj je pri njej potrebno upoštevati ortotropnost, gubanje, lezenje in relaksacijo tkanine, relaksacijo kablov ter velike deformacije strukture. Pri razvijanju omenjenega programa so poskušali oblikovati tak vmesnik, ki bi poenostavil celoten postopek v nekaj enostavno razumljivih korakov.

Vtičnik pretvori standardni model prednapete membrane, ki je bil oblikovan s pomočjo vtičnika MPanel, v model iz končnih elementov, ki ga nato analizira glede na podano obtežbo. Večinoma gre za obtežbe vetra in snega [21].



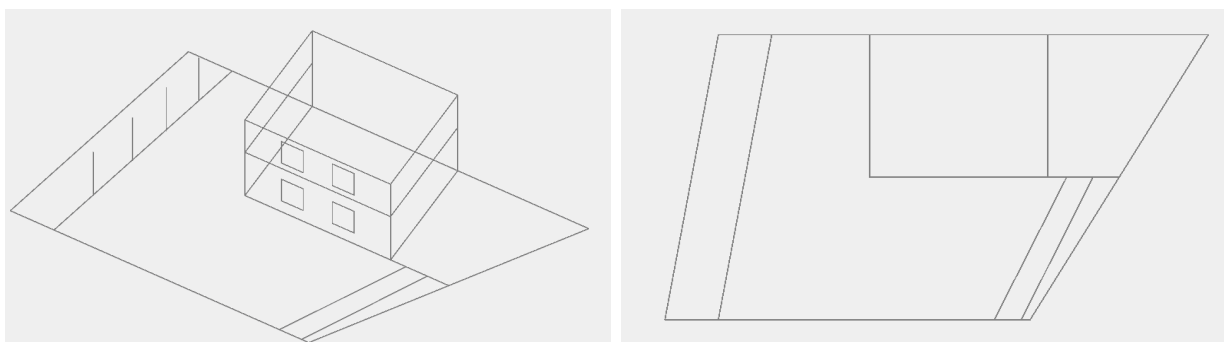
Slika 3-4: Uporabniški vmesnik programa MPanel FEA

4 ZASNOVE OBLIKE NADSTREŠKA PRI STAVBI FAKULTETE ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO UNIVERZE V LJUBLJANI

4.1 LOKACIJA

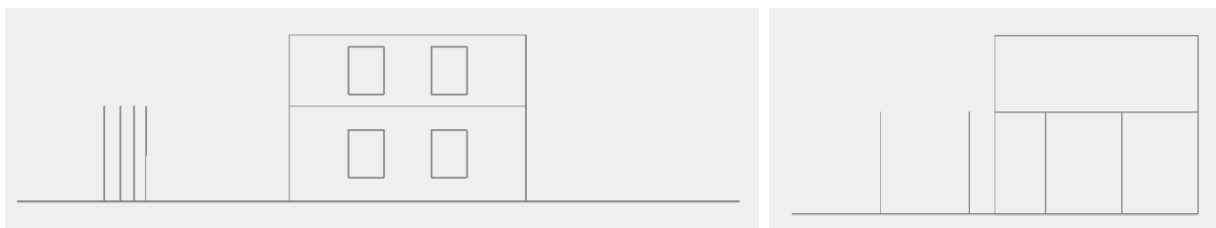
Za načrtovanje konstrukcije smo potrebovali dimenzije prostora, ki je na razpolago, skupaj z dimenzijami fasade stavbe računovodstva, lokacijo sadnih dreves in tlakovane poti. Prav nam je prišel izris iz katastrskega načrta, ki nam ga je posredovalo vodstvo fakultete, saj smo z njegovo pomočjo lahko določili točno velikost razpoložljivega prostora. Ostale dimenzije smo ocenili ali približno izmerili z opremo, ki nam je bila na voljo.

Najbolj jasno je celotno stanje razvidno z aksonometričnega pogleda (slika 4-1 levo). Na tlorisu razpoložljive površine (slika 4-1 desno) predstavlja spodnji vodoravni rob meja med trato in parkiriščem, skrajni levi rob zidek med zemljiščem fakultete in privatno zemljo, skrajni desni rob enako, zgornji vodoravni rob pa je le navidezna meja, parcela in zgradba se nadaljujeta preko njega. Daljica na levi, ki je vzporedna z robom, vendar zamaknjena v notranjost, predstavlja vrsto, po kateri so posajena sadna drevesa. Na desni strani sta skoraj vzporedno z robom zarisani še dve daljici, ki označujeta tlakovano pot. Pravokotnik zgoraj v sredini omejuje stavbo računovodstva, desno od njega se začne parkirišče. Omeniti moramo, da sta tako lega vrste dreves kot tudi dimenzije tlakovane poti ocenjeni, ostale dimenzije pa so določene s katastrskega načrta.



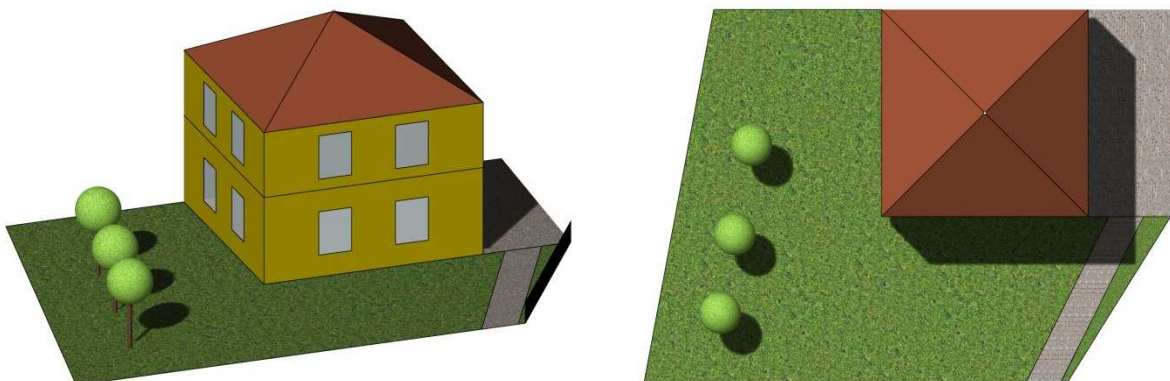
Slika 4-1: Aksonometrični pogled na razpoložljivi prostor (levo) in tloris razpoložljivega prostora (desno)

V čelnem pogledu obstoječega stanja (slika 4-2 levo) je na desni strani vidna fasada stavbe računovodstva, katere dimenzije smo ocenili. Pravokotniki v spodnjem in zgornjem delu predstavljajo okenske odprtine, vodoravna linija, ki seka objekt malo nad sredino, pa nekakšen venec. Štiri navpične črte na levi zamenjujejo sadna drevesa. Če pogledamo skico stanja s strani (slika 4-2 desno), lahko opazimo, da sta dve od sadnih dreves posajeni na travniku pred objektom, dve pa za njim oz. vzporedno z njim.



Slika 4-2: Čelni pogled na razpoložljivi prostor (levo) in pogled s strani (desno)

Približne dimenzije travnika pred stavbo računovodstva so 20 m v smeri vzporedni s fasado ter 8 m v smeri pravokotni na prvo. Objekt je visok 7 m (brez strehe), nekakšen venec pa se nahaja na višini približno 4 m od tal in poteka okoli celotne stavbe. Situacija je še bolj jasno predstavljiva iz spodnjih dveh slik (slika 4-3 levo in desno).



Slika 4-3: Pogled na situacijo s strani (levo) in tloris (desno)

4.2 IZBOR MATERIALOV

Med najpomembnejše odločitve v začetku projektiranja prednapete membrane sodi izbor materiala za membrano, saj ta pogojuje načrtovanje in izvedbo konstrukcije. Med tehničnimi membranami smo izbrali eno izmed tehničnih tkanin, saj so tehnične folije bolj primerne za izvedbo pnevmatskih konstrukcij. Najbolj razširjeni in največkrat uporabljeni kompozitni tkanini sta polietilenteraftalat/polivinilkloridna (PET/PVC) membrana in steklena vlakna/politetrafluoretilenska (FG/PTFE) membrana [13]. Prvi del imena predstavlja material, iz katerega je narejeno samo tkanje, drugi del pa material matrice, ki tkanino prekriva.

Izmed teh dveh možnosti smo se odločili za uporabo PET/PVC membrane pri vseh predlaganih konstrukcijah, saj je ta v primerjavi s FG/PTFE membrano veliko cenejša in bolj enostavnejša za delo. Že varjenje take membrane je preprostejše, kar dodatno poceni izdelavo, je pa tudi enostavnejša za načrtovanje, saj dopušča manjše geometrijske nenatančnosti. Slednje je ugodno še posebej za neizkušene inženirje na tem področju, ker je natančno krojenje membrane samoz računalskimi pripomočki zelo težko izvedljivo. V primerjavi z membranami iz steklenih vlaken se s PET/PVC tkanino tudi lažje rokuje, saj ni tako občutljiva na pregibanje. [13]

Mehanske lastnosti izbrane membrane so sicer slabše od druge možnosti (manjša togost, večje razlike med vzdolžno in prečno smerjo), vendar so te še vedno zadovoljive, še posebej, ker gre za izgradnjo manjših konstrukcij. Omeniti moramo tudi, da je leženje takega kompozita veliko, tako da je potrebno naknadno prednapenjanje, ko to pade pod mejno vrednost. [13]

Zaradi občutljivosti na razne zunanje vplive je življenjska doba PET/PVC membran krajša, kot bi jo dosegli z uporabo FG/PTFE membrane, t.j. okrog 15 let, kar pa je v našem primeru sprejemljiva doba. Trajnost konstrukcije lahko povečamo z izbiro drugačne zaključne prevleke, ki bo boljše ščitila vlakna pred UV svetlobo, vdorom vode ter kemičnimi in biološkimi vplivi.

Glede na to, da bo konstrukcija postavljena na odprtem, požarna odpornost ne igra pomembne vloge pri izbiri, je pa ta zadostna.

Na priljubljenost PET/PVC membrane vpliva tudi dejstvo, da je ta med vsemi možnostmi najbolj odporna na mehanske poškodbe tako, zaradi dotrajanosti kot zaradi vandalizma. Ker bo nadstrešek na doseg človeških rok, smo imeli v mislih tudi ta aspekt.

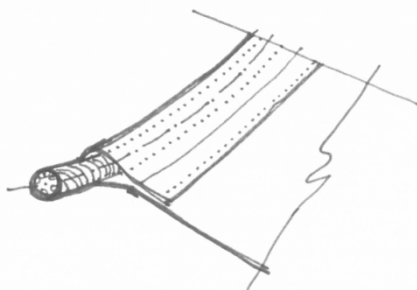
Membrane je možno obarvati ali nanje natisniti razne vzorce, v kolikor bi si naročnik to želel, vendar se vse spremembe v tej smeri pokažejo pri končni ceni.

4.3 IZBOR DETAJLOV

Zaradi zelo različnih oblik prednapetih membranskih konstrukcij so praktično vsi detajli nestandardni, zato je njihovo načrtovanje zahtevna naloga. Ne glede na to lahko med študijem membranskih struktur opazimo določene elemente, ki se ponavljajo in zato očitno predstavljajo ugodne rešitve za robne in ogliščne detajle. Grobo bomo predstavili možnosti za izvedbo detajlov pri predlaganih konstrukcijah, vendar njihovo točno dimenzioniranje ni bilo predmet te naloge.

V vseh primerih so na robu potrebne ojačitve membrane in stabilizacija elementov nosilne konstrukcije, za kar se uporablja jeklene vrvi in kable (v nadaljevanju je za oboje uporabljen izraz kabli). Ti so izpostavljeni različnim okoljskim vplivom, ki materialu ne ustrezajo, zato morajo biti žice, ki sestavljajo splete, galvanizirane ter prevlečene z lubrikantom, kabel pa na koncu premazan z barvo ali zaščiten s plastičnim ovojem, lahko pa uporabimo tudi nerjaveče jeklo.

Izbira PET/PVC membrane omogoča izvedbo najbolj enostavnega fleksibilnega robnega detajla, ki ga predvidevam v vseh predstavljenih konstrukcijah (slika 4-4). Gre za nazaj zavihan in zavarjen rob membrane, v katerem je tudi zaščitna plast iz plastične folije, skozi njega pa je speljan jeklen kabel. Pri prevzemu normalnih sil je potrebno biti pozoren na cepilne napetosti v robnem zavihku.



Slika 4-4: Izbrani fleksibilni robni detajl [22]

Poleg kablov so na robu včasih potrebni tudi dodatni ojačitveni tekstilni pasovi, ki preprečujejo zdrs membrane vzdolž kabla zaradi tangencialnih sil. Pasovi so prišiti ali prilepljeni vzdolž robnega žepa membrane, v katerega je vstavljena robna jeklena cev, in dodatno zaščiteni pred UV svetlobo, vlago in plesnijo.

Fleksibilni robovi morajo biti zaključeni s kovinskimi kotnimi detajli, preko katerih je membrana priključena na podporno konstrukcijo. Pri načrtovanju teh moramo biti pozorni na geometrijo, saj se morajo detajli ujemati s sistemskimi linijami in omogočati stičišče sil v isti točki, kot je to predstavljeno v modelu. Vsebovati morajo tudi elemente za fino nastavljanje geometrije in prednapetja ter omogočati pomike in rotacije v vseh predvidenih smereh.

V predstavljenih konstrukcijah uporabljamo dva kotna detajla, in sicer vogalnega, ki preko kovinske plošče pripenja robne kable posredno (na kabel ali jambor) ali neposredno (na togo konstrukcijo ali temelj) na nosilno konstrukcijo, in vogalnega sedlaste oblike, katerega glavna naloga je ohranjanje neprekinjene linije robnega kabla od enega oglišča proti drugemu.

4.4 IZBOR NOSILNE KONSTRUKCIJE

Del podporne konstrukcije pri vseh izrisanih primerih predstavlja obstoječi objekt, t.j. stavba računovodstva. Na tak način privarčujemo material in tudi konceptualno povežemo objekta med sabo. Ostalo podporno konstrukcijo predstavljajo jambori (robni in notranji). Vsi elementi so stabilizirani s kablami in izdelani iz jeklenih cevastih profilov. V enem od primerov je uporabljen tudi notranji natezni obroč, ki je preko kablov priključen na notranji jambor.

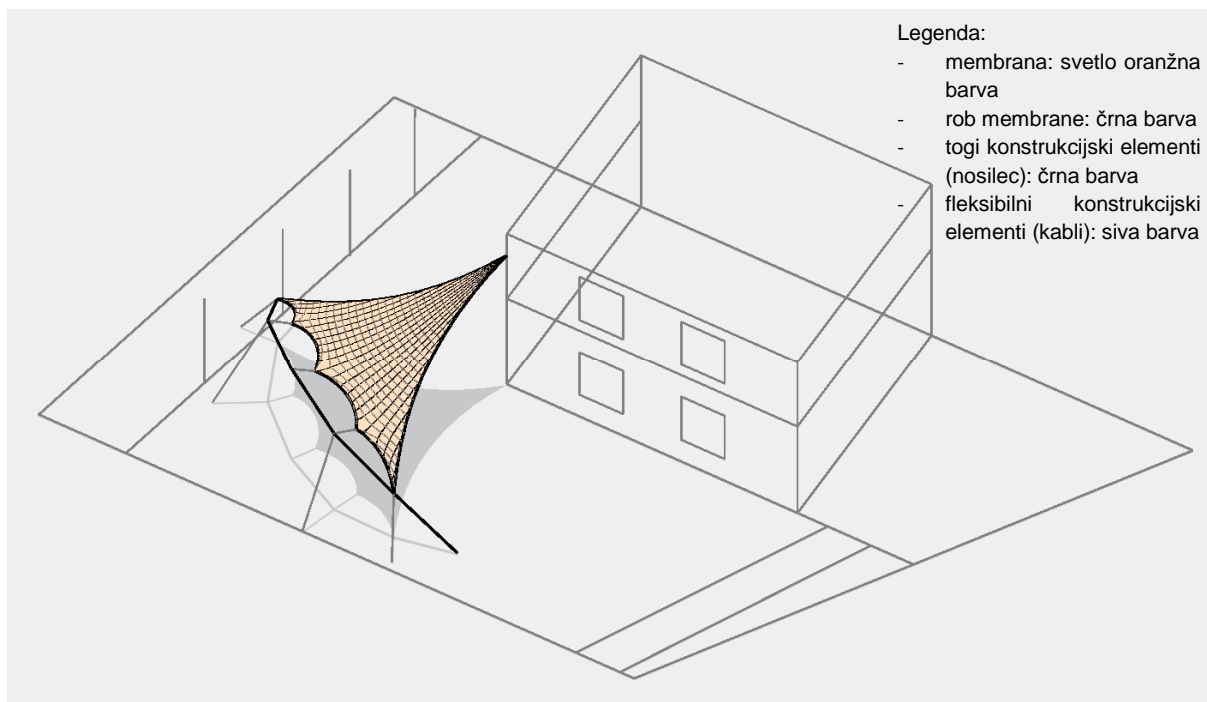
4.5 GRADNJA

Zaradi specifičnosti oblik prednapetih membran je praktično nemogoče določiti nek splošen način za postavitve. Način gradnje pogojuje načrtovanje detajlov in je nanj potrebno misliti že med samim oblikovanjem strukture. V vseh opisanih primerih predvidevamo hitro gradnjo (mogoče dan ali dva) na sami lokaciji. Potrebne so seveda predpriprave, ki obsegajo varjenje membrane in pripravo podporne konstrukcije s spojnimi priključki v delavnicah, pripravo temeljne površine z vlitjem armiranobetonskih temeljev in vstavitvijo sider, transport ter pripravo opreme za postavljanje. V vseh primerih bo vnos prednapetja potekal točkovno, kar sicer ni najboljša možnost zaradi neenakomernosti vnosa sile, je pa najcenejša, najenostavnejša in v obravnavanih primerih tudi drugače najbolj primerna. Potrebna bo kontrola tako geometrije kot prednapetja že med inštalacijo in tudi po njej.

4.6 PET IDEJNIH NAČRTOV

V nadaljevanju smo podrobneje predstavili pet rešitev za dani problem, ki so po našem mnenju izmed vseh možnosti, ki smo jih izrisali, najbolj primerne za izvedbo. Izbrali smo čim bolj različne zasnove, da razkažemo vsaj delček spektra vseh oblik, ki jih pokrivajo prednapete membranske konstrukcije.

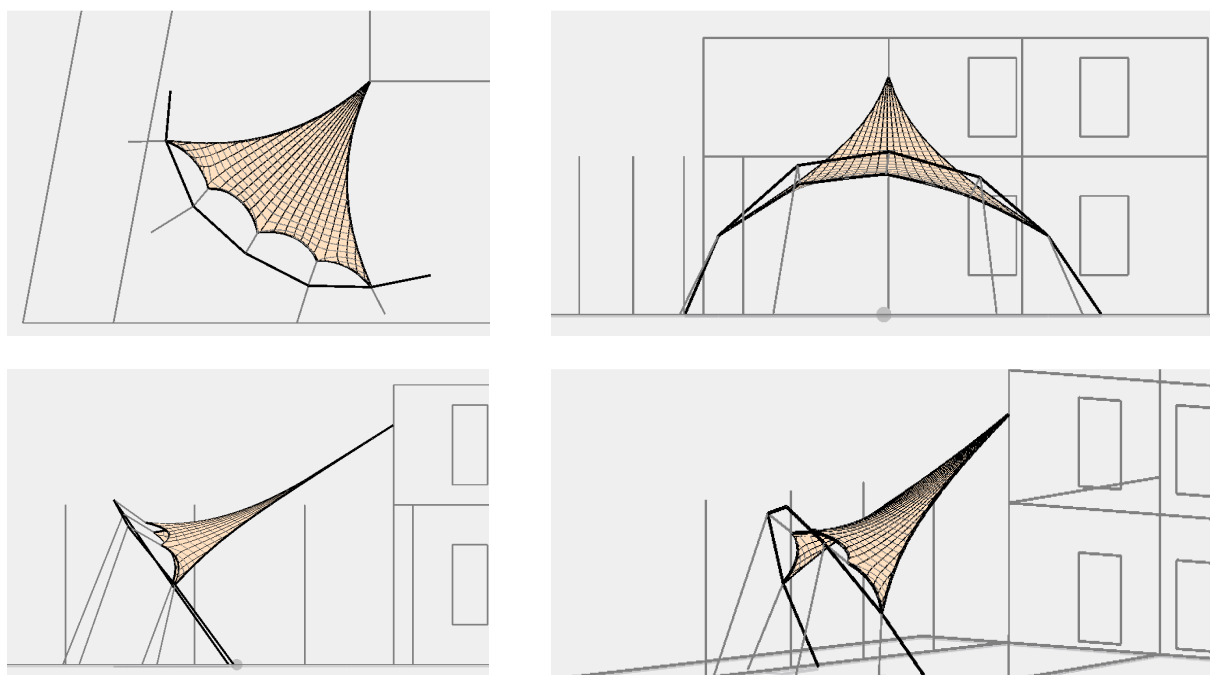
4.6.1 PRIMER 1: KONUSNA KONSTRUKCIJA OBEŠENA NA LOK



Slika 4-5: Aksonometrični pogled na konusno konstrukcijo podprto z lokom

Opis konstrukcije in njena geometrija

Konstrukcija je v zgornji točki preko detajla vpeta v obstoječi objekt na višini 6 m, nato se spušča nad travnik, kjer je preko krajših kablov pritrjena na ločno linijsko konstrukcijo. Po vseh robovih membrane potekajo kabli, ki pripomorejo k enakomernemu napetju konstrukcije in jo vpenjajo na nosilno konstrukcijo. Lok je nagnjen in stabiliziran s štirimi kabli (slike 4-6).



Slika 4-6: Tlorisni (levo zgoraj) in čelni (desno zgoraj) pogled na konstrukcijo, pogled s strani (levo spodaj) ter nagnjenost loka in pritrjenost membrane nanj (desno spodaj)

Membrana pokriva približno 17,08 m² prostora, njena najvišja točka je visoka 6 m, lok pa sega 4 m visoko. Padavine padajo od višinske točke proti loku, in ob njem na obe strani.

Ideja in vizualni izgled

Idejo za obliko nadstreška smo dobili ob študiju realiziranih projektov, še posebej primerov, pri katerih so bili eden ali več robov podprti z loki. Ker smo hoteli v konstrukcijo aktivno vključiti tudi stavbo računovodstva, smo nanjo fiksirali membrano v višji točki. Ločna nosilna konstrukcija je odprta proti parkirišču za fakulteto, da vabi ljudi pod nadstrešek, nanjo je membrana obešena, da deluje bolj lahkotno in izvirno. Ker konstrukcija izgleda, kot da bi jo v celoti nosila stavba računovodstva, bi lahko poiskali vzporednice med finančnimi sredstvi in gradnjo.

Membrana

Konstrukcija ni tipično konusna, saj njen spodnji rob pokriva le del celotne krožnice, poleg tega pa tudi zgornja točka ni vezana na natezni obroč, vendar predvidevamo, da bodo glavne napetosti potekale od zgornje točke navzdol, proti robu, ki je obešen na lok, zato bi membrano skrojili tako, da bi osnovna smer vlaken potekala v tej smeri, torej na način, ki je primeren za konusne strukture. Ker ta konstrukcija nima nateznega loka, se lahko okrog višinske točke pojavijo koncentracije napetosti in zato potrebe po večji nosilnosti membrane v primerjavi s preostalimi deli. Ta problem bi rešili z dodatno plastjo tekstila v okolici višje točke.

Površina tekstilne konstrukcije iz PET/PVC tkanine znaša 18,6m², torej je količnik med površino membrane in površino osenčenega prostora 1,09, kar je ugodno, še posebej ker gre za konusno konstrukcijo. Glede na osenčen prostor je poraba materiala sorazmeroma majhna.

Prenos obtežbe

Obtežbo membrana prenaša z nategom, kar omogoča njena dvojna ukrivljenost (antiklastična ploskev) in prednapetje. Za slednje je predvidena tipična vrednost za manjše konusne konstrukcije, in sicer 1,0 kN/m tangencialno in 1,3 kN/m radialno. Razmerje med napetostmi v teh dveh smereh je 1:1,3 in je v mejah priporočenega. Iz membrane se vpliv obtežbe prenese na fleksibilne robne elemente, preko njih pa na togo nosilno konstrukcijo, tlačni lok in obstoječi objekt, ki nato obremenitev pošljejo v tla oz. temelje.

Nosilna konstrukcija in detajli

Tlačni lok je izdelan iz jekla in je členkasto vpet v temelje na obeh straneh. Izdelan je iz cevi primerne premera. Nagnjen je proč od konstrukcije za majhen kot in stabiliziran s štirimi kablji, ki so sidrani neposredno v zemljinu. Na loku so izdelani primerni detajli za pritrditev kablov, ki napenjajo membrano. Ti morajo omogočati dodaten vnos napetosti, saj se sčasoma del prednapetja v membrani izgubi in je zato potrebno naknadno napenjanje.

Na obstoječi objekt je membrana vpeta preko ogliščnega detajla, ki je sidran v nosilno steno. Fleksibilni rob je izveden s kablom v membranskem zavihku, ojačen s tekstilnim trakom, ki omogoča prevzem tangencialnih napetosti.

Gradnja

Tkanino najprej fiksiramo na obstoječo stavbo preko dveh robnih kablov ter pripravimo nasprotni rob, da ga bomo pritrdili na lok. Tega pritrdimo na temelje tako, da leži na tleh, z najvišjim delom obrnjenim proti objektu. Počasi ga dvigamo in na primerni višini pritrdimo rob membrane na priključke ter nadaljujemo z dviganjem. Ob tem moramo poskrbeti za stabilnost loka med gradnjo s kabli, ki bodo zanjo skrbeli tudi sicer, in po potrebi z dodatnimi stabilizacijskimi kabli. Ko konstrukcijo dvignemo v predvideni položaj, fiksiramo lok in poskrbimo za fine nastavitve prednapetja s spreminjanjem dolžine kablov. Na koncu preverimo geometrijo konstrukcije in nivoje napetosti v membrani z ustreznimi inštrumenti.

Cena

Material:

Glede na količnik med izrabo materiala membrane in osenčenim prostorom (1,09) je tkanina uporabljena ekonomično. Kablov je glede na površino malo, največji strošek predstavlja jekleni lok in detajli.

Delo:

Čeprav je montaža konusnih konstrukcij po večini dražja od ostalih membranskih konstrukcij, se v tem primeru ne bi smela pretirano razlikovati od gradnje preproste sedlaste konstrukcije, saj konstrukcija nima togih robnih elementov, ki so zahtevnejši za izdelavo.

Podatki o konstrukciji

Prednapetje:

- tangencialno: 1,00 kN/m
- radialno: 1,30 kN/m
- razmerje: 1:1,3

Površina:

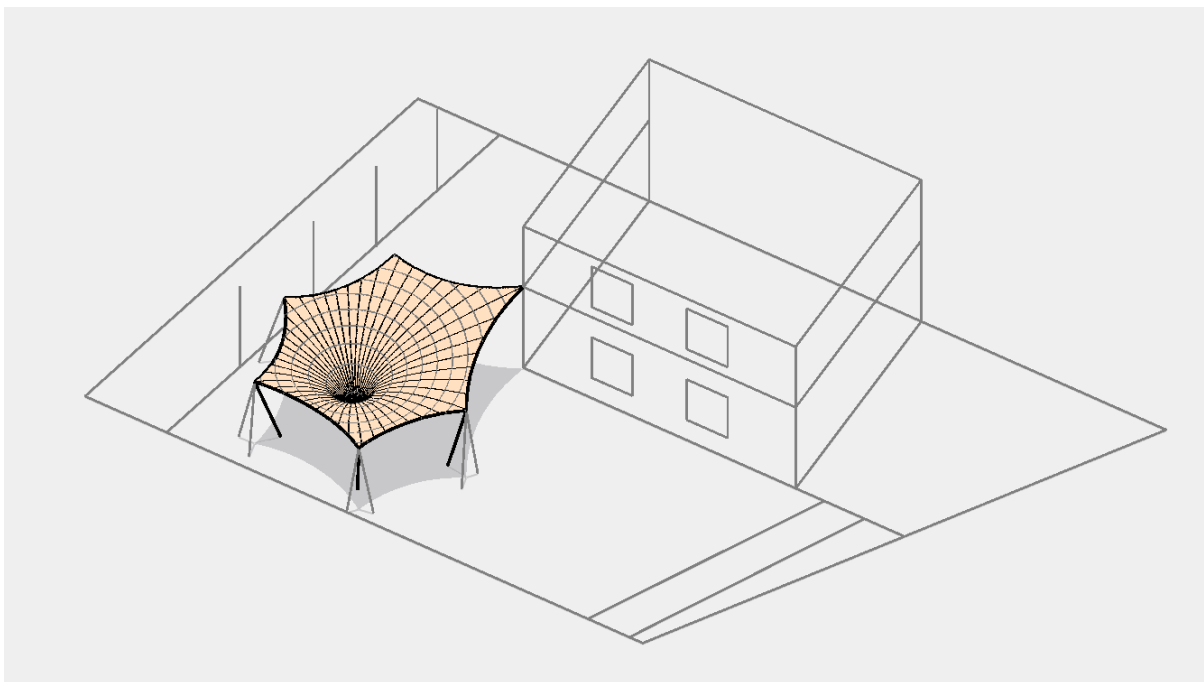
- membrane: 18,61 m²
- osenčenega prostora: 17,08 m²
- razmerje: 1,09

Višina:

- konstrukcije: 6 m
- loka: 4 m

Dolžina in širina: 8,35 m in 6,23 m

4.6.2 PRIMER 2: DEŽNIK



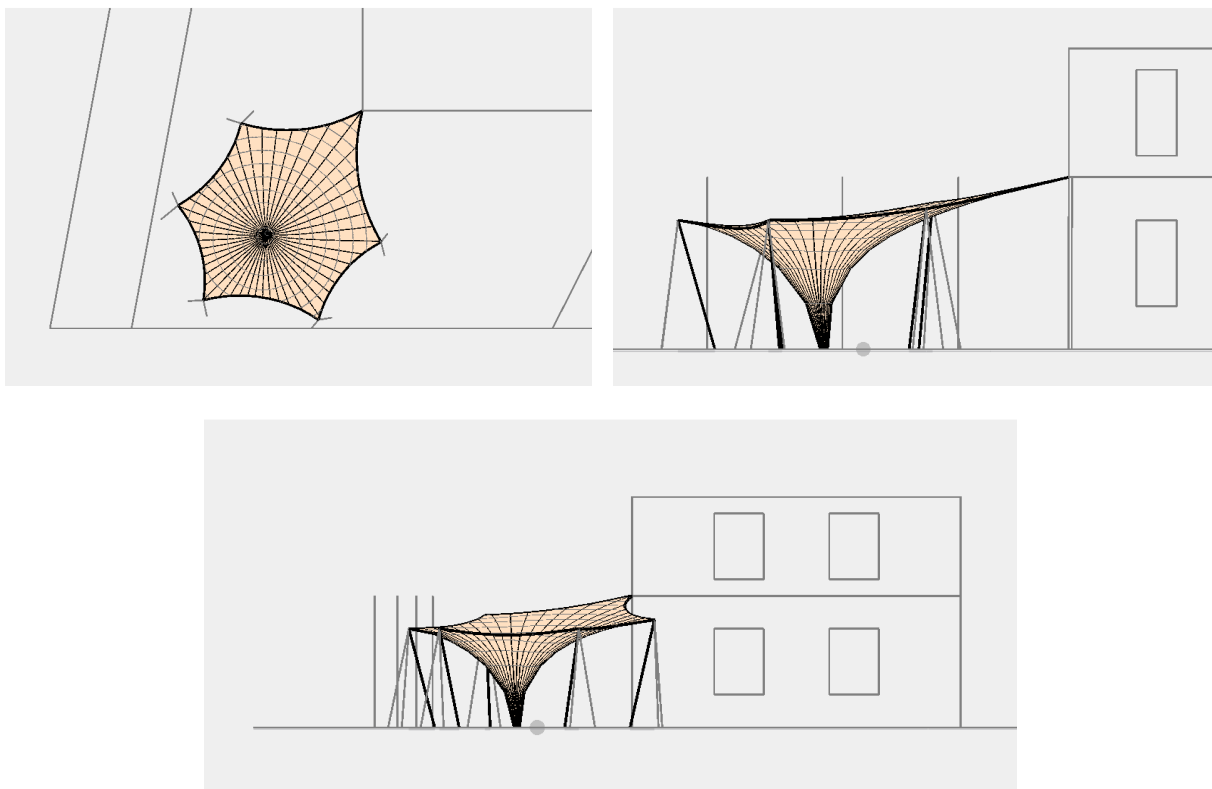
Slika 4-7: Izometrični pogled na konstrukcijo, umeščeno v prostor

Opis konstrukcije in njena geometrija

Konstrukcija je tipična konusna z nižjo točko izven ravnine (slika 4-7 in 4-8 spodaj). Tloris strukture ima obliko pravilnega šesterokotnika z enim ogliščem rahlo potisnjnim iz včrtane krožnice. To je vpeto v obstoječi objekt. Nižinska točka je ekscentrična, in sicer odmaknjena proč od prej omenjenega oglišča, vendar še vedno na diagonali med tem in nasprotnim ogliščem (slika 4-8 levo zgoraj).

Po obodu membrane potekajo kabli, ki so v ogliščih pripeti na jambore. Ti so stabilizirani še vsak s po dvema kabloma. Ravnina, na kateri se ta oglišča nahajajo, ni vzporedna s podlago, ampak je malce nagnjena, tako da se oglišče, ki je vpeto v objekt, nahaja na višini 4 m, nasprotno oglišče pa na višini 3 m (slika 4-8 desno zgoraj). Nižinska točka je preko primerne detaila fiksirana v zemljino.

Najdaljša diagonala je dolga 9,1 m, diagonala, ki je pravokotna nanjo, pa 6,7 m. Višina konstrukcije je 4 m, najvišji jambor je visok 3,3 m. Velikost radija okrog nizke točke je 0,1 m. Konstrukcija osenči prostor v velikosti 35,83 m², če je vpadni kot sončnih žarkov pravokoten na podlago, padavine se nabirajo v »lijaku«, zato je potrebno poskrbeti za primerno odvodnjavanje.



Slika 4-8: Tloris (levo zgoraj), pogled s strani (desno zgoraj) ter čelni pogled na konstrukcijo s parkirišča za fakulteto (spodaj)

Ideja in vizualni izgled

Idejo za omenjeno konstrukcijo smo dobili med študijem primerov preko aplikacije programa FormFinder z imenom ProjektFinder. Ta vsebuje bogato knjižnico fotografij in opisov že postavljenih prednapetih membran iz celega sveta.

K ideji je najbolj pripomogel primer podobne konusne strukture z malo drugačno nosilno konstrukcijo, ki jo je načrtoval študent podiplomskega študija lahkih konstrukcij, kamor spadajo tudi prednapete membranske konstrukcije, za šolo v Marakešu (slika 4-9).



Slika 4-9: Konusna konstrukcija za Marakeško šolo razstavljena v parku [5]

Konstrukcija je bila začasno postavljena v Stuttgartu kot predstavitev tamkajšnjega Inštituta za lahke konstrukcije (Institute for Lightweight Structures) na Stuttgartski univerzi, ki ga je

ustanovil začetnik tega področja Frei Otto in je eden izmed vodilnih inštitutov na tem področju na svetu.

Strukturo na nasprotnih si robovih podpirajo jambori, na ostalih dveh pa so skozi tkanino speljane ukrivljene tlačne palice iz steklenih vlaken, ki napenjajo membrano in držijo njeno obliko. Na lokaciji so jambore zamenjale stavbe. Narejena je iz poliesterskih vlaken v PVC matrici, visoka 4 m, pokriva pa prostor velikosti $12 \cdot 10,5 \text{ m}^2$.

Naša ideja za nadstrešek je za razliko od Stuttgartskega primera načrtovana tako, da je podprta le z jambori, v eni točki pa se opira na stavbo. Izbrani material je iz skupine poliesterskih vlaken prevlečenih s PVC-jem, torej enak kot v primeru na sliki.

Ob snovanju tega primera smo si zamislili drevo, ki bi vabilo pod svoje »veje«, v senco in na suho.

Membrana

Membrana je krojena tako, da osnovna smer vlaken poteka od nižinske točke proti robu. Njena površina je $42,02 \text{ m}^2$, torej je količnik med uporabljenim materialom in osenčenim prostorom enak 1,17, kar je malce več kot v prvem primeru, vendar glede na vrsto konstrukcije pričakovano.

Prenos obtežbe

Obtežba se preko membrane prenaša v robne fleksibilne kable, z njih pa na jambore oz. stavbo in nato v tla. Ključnega pomena sta dvojna ukrivljenost in prednapetje; v tem primeru je predvideno prednapetje v obeh smereh enako 1 kN/m . Razmerje je torej ugodno (1:1), čeprav se prav pri konusnih konstrukcijah v tem pogledu v splošnem pojavijo težave.

Nosilna konstrukcija in detajli

Kot že omenjeno, je nosilna konstrukcija sestavljena iz jamborov višine 3,0 in 3,3 m ter obstoječega objekta. Vsi jambori so členkasto vpeti v temelj in zaradi stabilizacije podprti z dvema kabloma, ki sta sidrana v zemljino. Nižinsko točko predstavlja jeklen obroč, na katerega je s pomočjo ploščic pritrjena membrana. Obroč je preko kablov pritrjen na cevast jeklen steber v njegovi sredini, ta pa je nato vpet v temelj.

Gradnja

Najprej fiksiramo membrano na jambore, nato začnemo počasi spuščati natezni obroč k tlom. Paziti moramo, da pri tem ne pride do prevelikih koncentracij napetosti v okolici obroča, saj bi to lahko pripeljalo do pretrga konstrukcije. V primeru premajhne odpornosti lahko tkanino v okolici nateznega obroča ojačimo z dodatno plastjo materiala.

Cena

Material:

V tem primeru je potrebna nekaj več materiala za izdelavo membrane, prav tako je število jamborov večje.

Delo:

Zahtevnejša je izvedba togega robnega detajla okoli nateznega obroča, kar tudi prinese dodatne stroške.

Podatki o konstrukciji

Prednapetje:

- tangencialno: 1,00 kN/m
- radialno: 1,00 kN/m
- razmerje: 1:1

Površina:

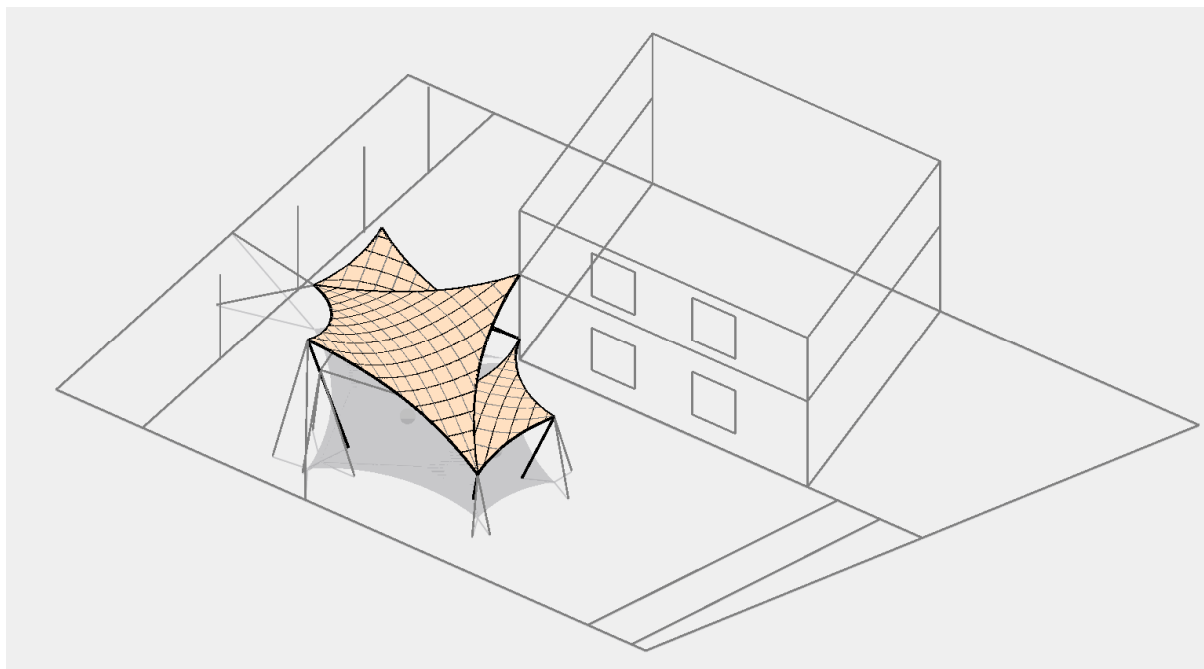
- membrane: 42,02 m²
- osenčenega prostora: 35,83 m²
- razmerje: 1,17

Višina:

- konstrukcije: 4 m
- jamborov: 3,00 m in 3,30 m

Širina in dolžina: 9,1 m in 6,7 m

4.6.3 PRIMER 3: TRI JADRA

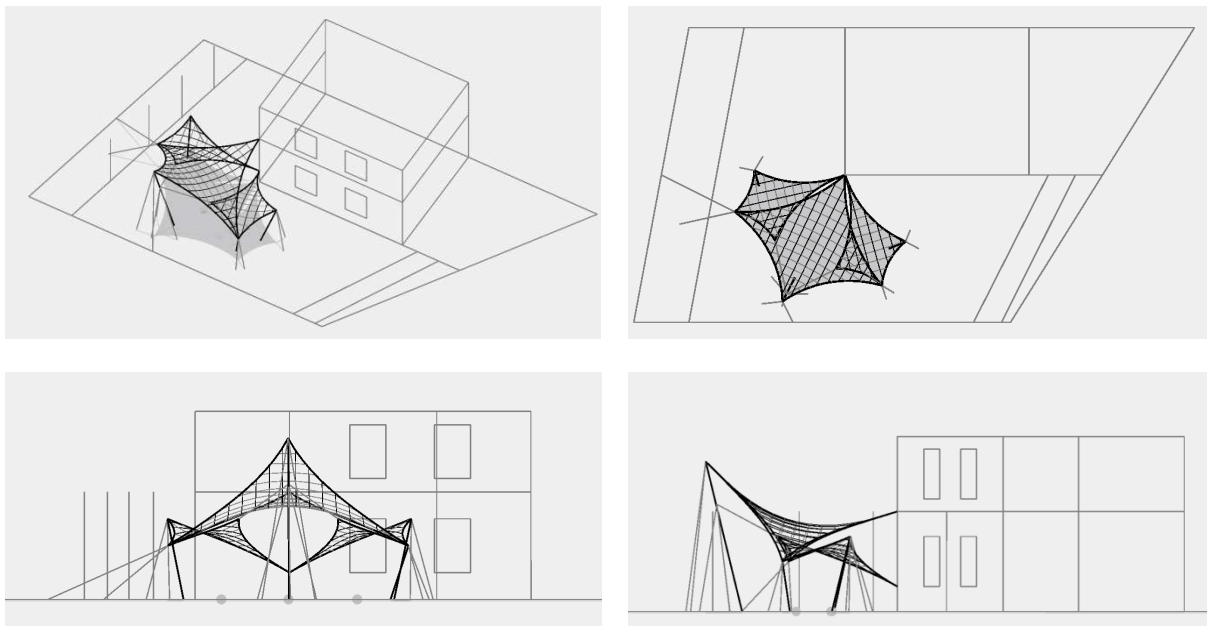


Slika 4-10: Aksonometrični pogled na konstrukcijo z obarvano membrano

Opis konstrukcije in njena geometrija

Konstrukcija je sestavljena iz treh jader oz. sedel (slika 4-10 in 4-11 levo zgoraj). Sedlo je osnovni tip prednapetih konstrukcij, ki ima antiklastično površino, torej je dvojno ukrivljeno, je enostavno za izdelavo in lahko premosti velike razpone. Srednje jadro je največje in skoraj kvadratne oblike, stranski dve pa sta v obliki dveh manjših deltoidov (slika 4-11 desno zgoraj). Eno oglišče vseh treh jader je pritrjeno na stavbo računovodstva, in sicer oglišče srednjega jadra na višini 4 m, oglišči deltoidov pa na višini 1 m. Obe stranski jadra si nasprotni oglišči delita s srednjim jadrom, in sicer na višini 2 m. Vsa oglišča so podprta z jambori, le levi deltoid ima enega preko kabla sidranega direktno v zemljinu. Najvišji jambor, ki je visok 6 m, si vsa tri jadra delijo, kar predstavlja tudi zelo zanimiv detajl. Celoten objekt zaseda dolžino 7,7 m in širino 9,3 m, senči pa okrog 35,55 m².

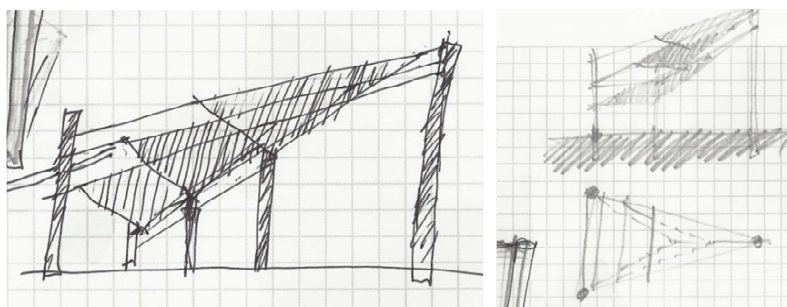
Površine jader so ukrivljene tako, da se padavine iz glavnega jadra stekajo na strani, nekaj tudi na spodnji dve jadra, ki sta ukrivljeni tako, da se voda steka proti stavbi (slika 4-11 spodaj).



Slika 4-11: Aksonometrični pogled na konstrukcijo, kjer je vidno tudi prekrivanje jader (levo zgoraj), tloris (desno zgoraj), čelni pogled (levo spodaj) in pogled na konstrukcijo s strani (desno spodaj)

Ideja in vizualni izgled

Idejo za tako konstrukcijo smo dobili po posvetovanju z arhitektom, ki je predlagal trikotna tekstilna jadra, postavljena eno nad drugim, tako da se steka voda z zgornjega proti spodnjemu in iz njega na tla (slika 4-12). Ker je prenašanje obtežbe boljše, če so jadra 4-točkovna, smo se odločili poigrati z ukrivljenostmi in prekrivanjem slednjih.



Slika 4-12: Arhitektova ideja [41]

Kot smo že omenili, smo si zamislili, da bi voda s srednjega, zgornjega sedla, ki je, če ga gledamo frontalno, ukrivljeno konveksno, tekla na spodnji sedli, ki sta v tem pogledu ukrivljeni konkavno. Poleg tega smo poskušali s prekrivanjem posameznih jader doseči lep vizualni efekt, če konstrukcijo opazujemo s spodnje strani, kot jo bodo (večinoma) uporabniki.

Membrana

Kot v prejšnjih primerih, predvidevam krojenje jader v smeri največjih napetosti, t.j. kjer je ukrivljenost posameznega jadra najmanjša. Za krojenje si pomagamo z geodetskimi. Površina potrebne količine membrane je $44,17 \text{ m}^2$, torej je količnik med površino materiala in pokrito površino 1,24.

Predvideno prednapetje je v vseh straneh vseh treh jader enako, in sicer 1 kN/m .

Prenos obtežbe

Princip prenosa obtežbe je podoben kot pri prejšnjih primerih – iz membrane na robne fleksibilne elemente, z njih na jambore in v tla (oz. direktno v tla). Pozoren je potrebno biti na območja, kjer se jadra v tlorisu med sabo prekrivajo, da se pri nastopu obtežbe zgornja ne povesijo preveč, tako da bi se lahko dotikala spodnjega.

Nosilna konstrukcija in detajli

Nosilna konstrukcija je sestavljena iz jamborov, ki so členkasto vpeti v temelje. Kabli so vsi sidrani direktno v zemljino. V obstoječi objekt so jadra vpeta z ustreznimi detajli.

Gradnja

Podobno kot v prvem primeru, tudi tukaj najprej vpnemo tekstil med pripravljene ogliščne detajle, potem pa počasi dvigamo jambore v končno lego. Paziti je potrebno na enakomerno hitrost in usklajenost dviganja vseh jamborov, saj je srednji veliko višji od ostalih in zato lahko pride do neenakomernega prednapetja v sredinskem jadru. Na koncu preverimo geometrijo in prednapetje v membranah.

Cena

Material:

Količnik med izrabo materiala membrane in osenčenim prostorom je 1,24, torej še malo večji kot v drugem primeru. Tkanina je še vedno uporabljena ekonomično. V tem primeru potrebujemo štiri jambore.

Delo:

Montaža je enostavna, detajli pa niso zahtevni za izvedbo, torej je strošek dela med manjšimi.

Podatki o konstrukciji

Prednapetje:

- osnovna smer: 1,00 kN/m
- pravokotno: 1,00 kN/m
- razmerje: 1:1

Površina:

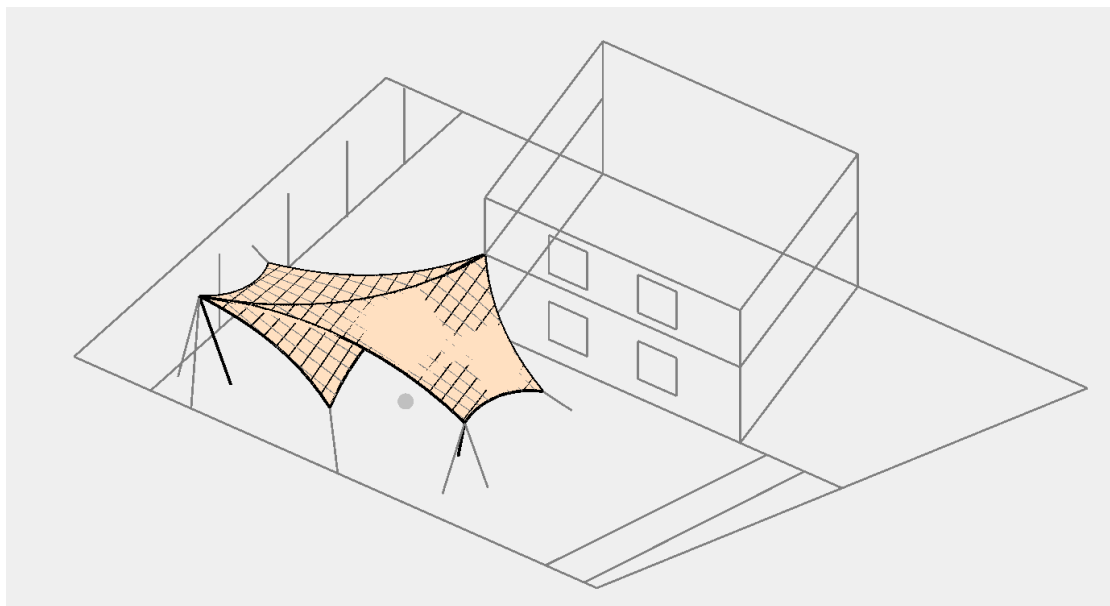
- membrane: 44,17m²
- osenčenega prostora: 35,55 m²
- razmerje: 1,24

Višina:

- konstrukcije: 6 m
- najvišji jambor: 6 m

Širina in dolžina: 7,7 m in 9,3 m

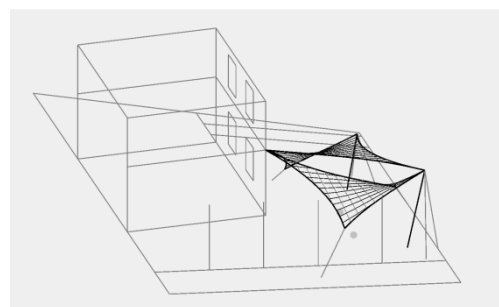
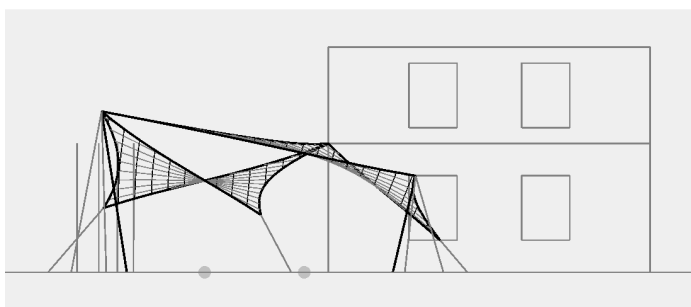
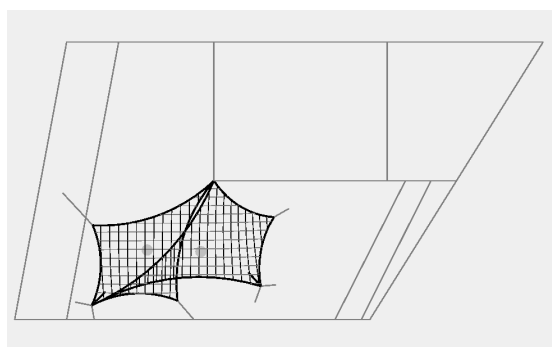
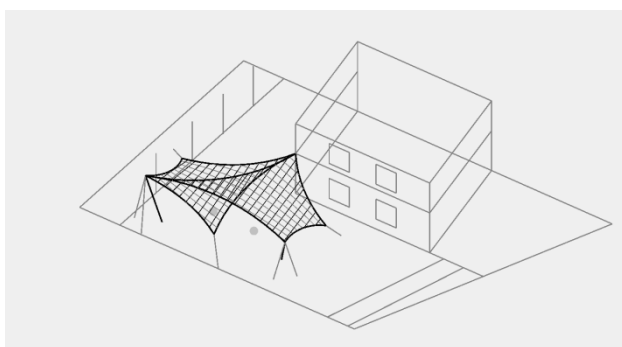
4.6.4 PRIMER 4: DVA DELTOIDA



Slika 4-13: Aksonometrični pogled na konstrukcijo z obarvanostjo površine membran

Opis konstrukcije in njena geometrija

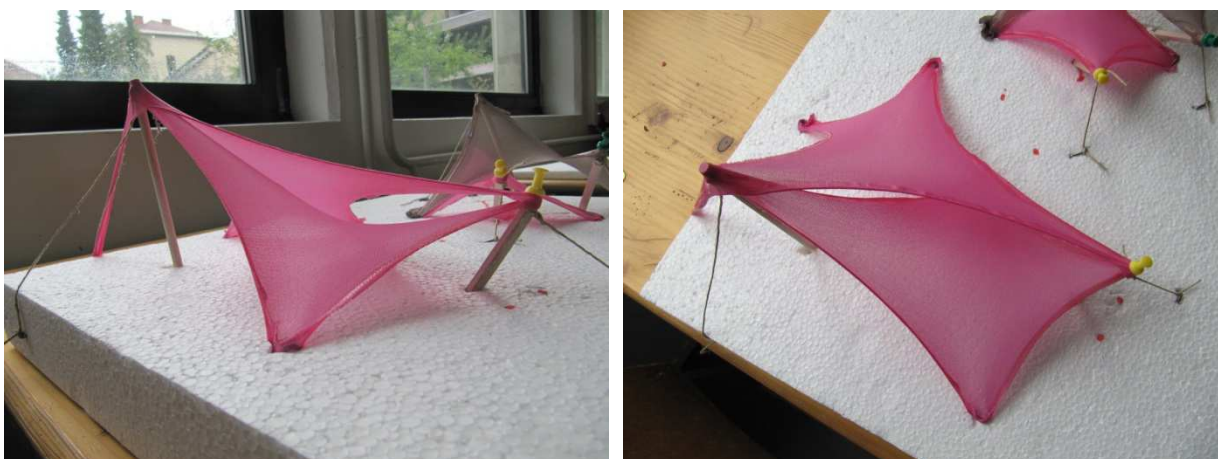
Konstrukcijo predstavljata dve sedli deltoidne oblike (slika 4-13 in slika 4-14). Delita si dve oglišči, in sicer eno, ki je vpeto v obstoječi objekt na višini 4 m, ter drugo na nasprotni strani, ki je vpeto v jambor na višini 5 m. Desno jadro (slika 4-14 desno zgoraj) podpira en jambor višine 1,8 m, ostala oglišča so vpeta s kablji direktno v zemljinjo. Jambora imata vsak po dva stabilizacijska kablja. Celotna struktura osenči prostor velikosti okrog 41,53 m² in je dolga 10,1 m, široka pa 6,5 m.



Slika 4-14: Aksonometrični pogled na konstrukcijo brez obarvanosti membran (levo zgoraj), tloris (desno zgoraj), stranski pogled (levo spodaj) ter prekrivanje jader in njihova ukrivljenost (desno spodaj)

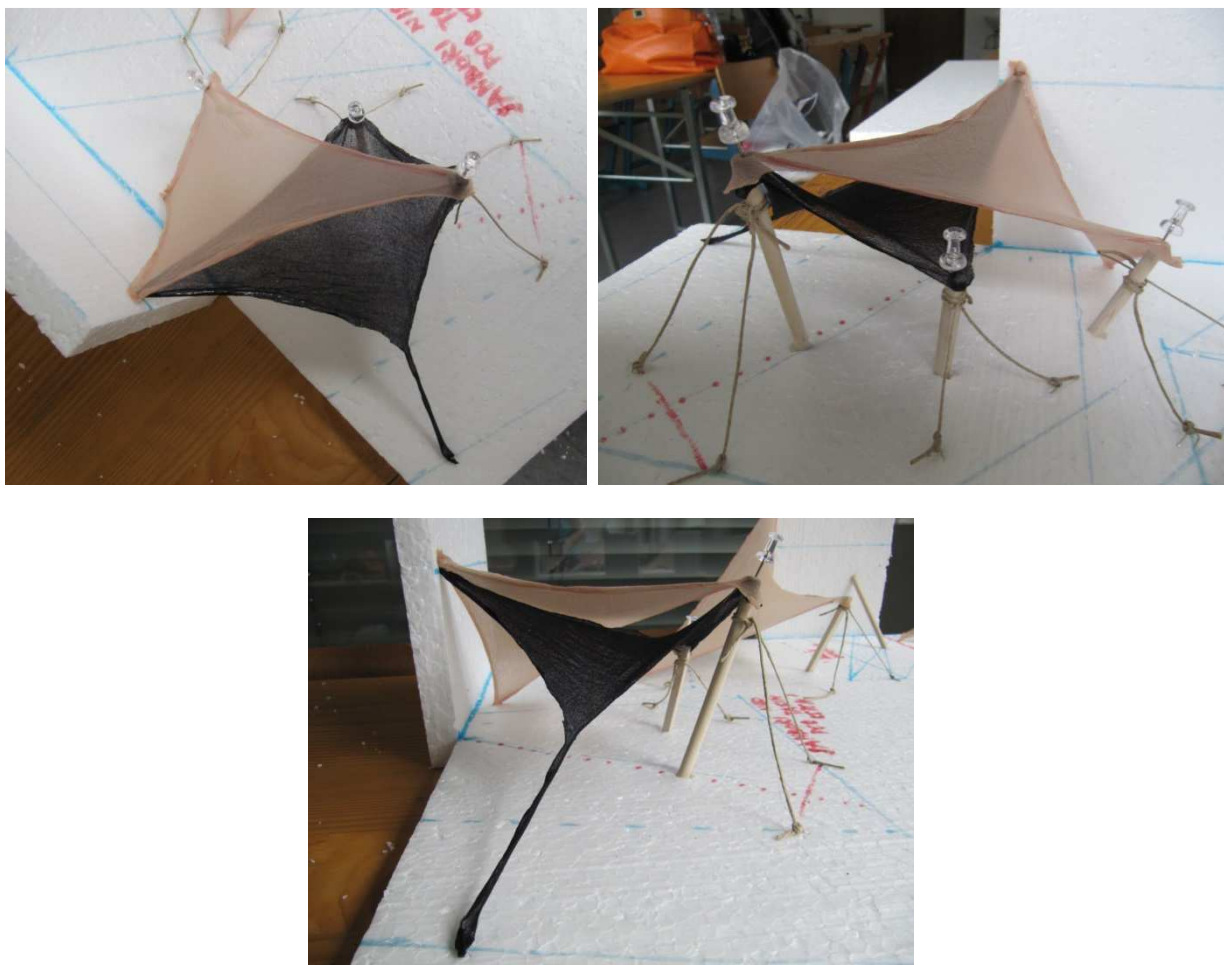
Ideja in vizualni izgled

Idejo za takšno konstrukcijo smo dobili ob fizičnem (eksperimentalnem) modeliranju s pomočjo elastične tkanine – najlonskih nogavic. Te imajo namreč podobne lastnosti kot jih imajo dejanske prednapete membranske konstrukcije, t.j. majhno težo v primerjavi s stopnjo prednapetja, ki jo lahko dosežejo. Poleg tega so modeli iz elastičnih tkanin trajni v nasprotju z modeliranjem z milnico, ki po krajšem času počni. Model je mogoče izdelati hitro in preprosto. Na mehko podlago, v mojem primeru je bila to stiroporna plošča, zapičimo paličice, ki predstavljajo jambore in loke. Čeznje napnemo kos najlonskih nogavic in ga na robovih fiksiramo z risalnimi žeblički ali drugimi kovinskimi zankami v podlago, tako da tvorimo antiklastično površino. Nato s flomastrom po najlonu označimo potek robnih kablov in jih načrtamo s tekočim lepilom. Ko se to posuši, odstrižemo odvečni najlon in model je narejen. Spodaj so prikazane fotografije modelov, ki sem jih tekom prakse izdelala in so rezultirali v predstavljeni konstrukciji (sliki 4-15 in 4-16).



Slika 4-15: Poskusna izdelava fizičnega modela konstrukcije, pogled s strani (levo) in pogled od zgoraj (desno)

Pri snovanju te konstrukcije smo poskušali še boljše izrabiti danosti lokacije in optimizirati število elementov podporne konstrukcije, torej posledično zmanjšati ceno izdelave in postavitve. Še vedno smo imeli v mislih lahкотnost in inovativnost oblike. Zgornji deltoid je na desni strani, kjer se za konstrukcijo nahaja okno, spuščeno proti tlu, da ne senči odprtine in ne jemlje dnevne svetlobe zaposlenim, ki svoje delo opravljajo v pisarni za tem oknom.



Slika 4-16: Fizični model konstrukcije v merilu, pogled od zgoraj (levo zgoraj), čelno (desno zgoraj) ter s strani (spodaj)

Membrana

Kot v prejšnjih primerih predvidevamo krojenje jader v smeri največjih napetosti, t.j. kjer je ukrivljenost posameznega jadra najmanjša. Potrebna površina membrane znaša $76,84 \text{ m}^2$. Predvideno prednapetje je v vseh straneh vseh treh jader enako, in sicer 1 kN/m .

Prenos obtežbe

Princip prenosa obtežbe je podoben kot pri prejšnjih primerih – iz membrane na robne fleksibilne elemente, z njih na jambore in v tla, na obstoječo konstrukcijo in v tla ali direktno v tla.

Nosilna konstrukcija in detajli

Nosilna konstrukcija je sestavljena iz jamborov, ki so členkasto vpeti v temelje. Kabli so vsi sidrani direktno v zemljinjo. V obstoječi objekt so jadra vpeta z ustreznimi detajli.

Gradnja

Podobno kot v prvem primeru tudi tukaj najprej vpnemo tekstil med pripravljene ogliščne detajle, potem pa počasi dvigamo jambore v končno lego. Spet je potrebna pozornost pri enakomerni hitrosti in usklajenosti dviganja. Na koncu preverimo geometrijo in prednapetje v membranah.

Cena

Material:

Količnik med izrabo materiala membrane in osenčenim prostorom je okrog 1,85, kar je veliko več kot v prejšnjih primerih in ga sprva nismo pričakovali. Krivec za tako velik količnik je velika ukrivljenost membrane, torej gre vse na račun estetike. Število jamborov je veliko manjše kot v prejšnjih primerih, potrebujemo le dva.

Delo:

Konstrukcija je sestavljena iz preprostih sedel, zato je montaža enostavna, detajli pa niso zahtevni za izvedbo.

Podatki o konstrukciji

Prednapetje:

- osnovna smer: 1,00 kN/m
- pravokotno: 1,00 kN/m
- razmerje: 1:1

Površina:

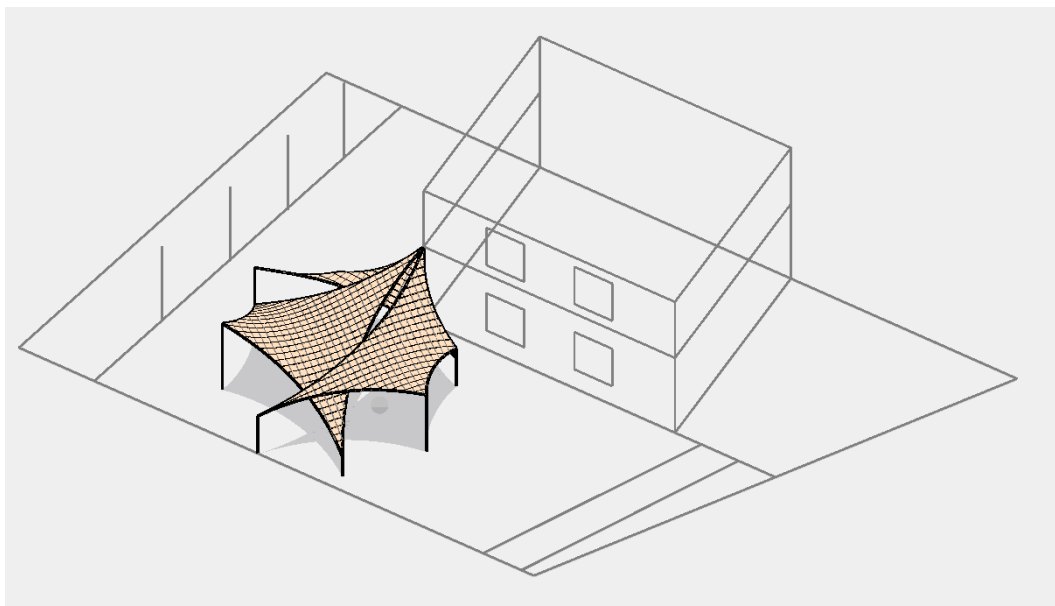
- membrane: 76,84 m²
- osenčenega prostora: 41,53 m²
- razmerje: 1,85

Višina:

- konstrukcije: 5 m
- najvišji jambor: 5 m

Širina in dolžina: 10,1 m in 6,5 m

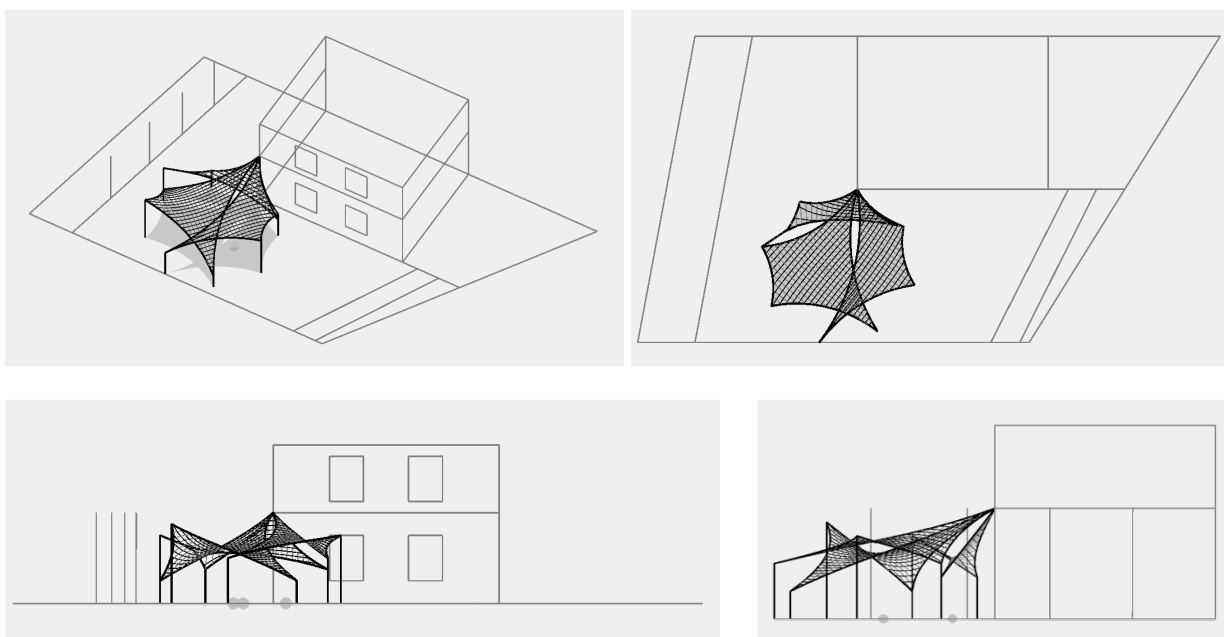
4.6.5 PRIMER 5: OSMEROKOTNIK



Slika 4-17: Aksonometrični pogled na konstrukcijo z obarvanimi membranami

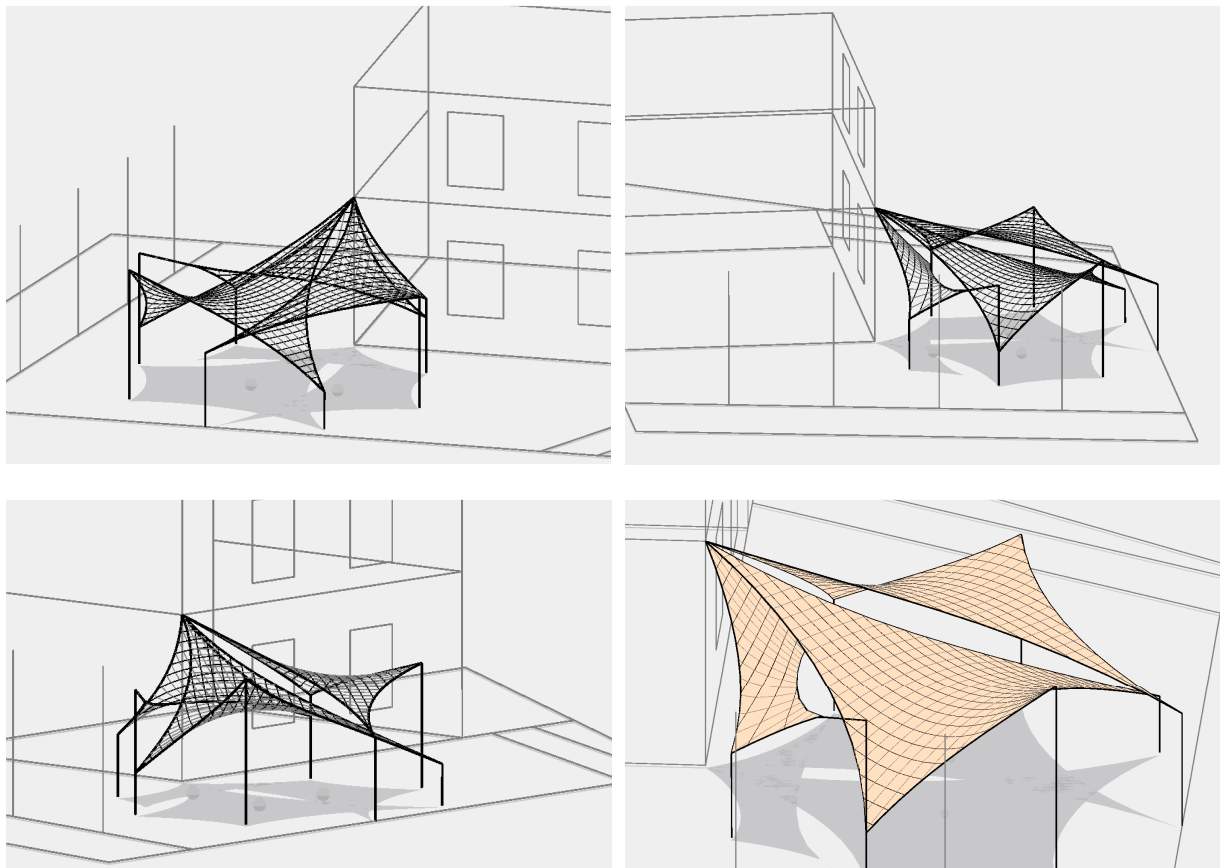
Opis konstrukcije in njena geometrija

Konstrukcija je sestavljena iz treh sedel, ki se med seboj prekrivajo in si delijo stebre (slika 4-17 in 4-18 levo zgoraj) ter skupaj sestavljajo pravilni osmerokotnik (slika 4-18 desno zgoraj). Desno jadro je postavljeno najvišje, pod njega z enim ogliščem sega srednje jadro, ki se z drugim dviga nad nivo desnega jadra. Levo oz. zadnje jadro si deli steber tako s srednjim kot tudi z desnim jadrom, vendar je vanj vpeto na različnih višinah. Vsa jadra so z enim ogliščem vpeta v obstoječi objekt, vsi stebri pa so togo vpeti v podlago in prenašajo tudi momentno obtežbo. Te smo uporabili zato, ker bi bilo sicer veliko število kablov zelo moteče za izgled konstrukcije.



Slika 4-18: Aksonometrični pogled na konstrukcijo z prosojnimi membranami (levo zgoraj), tloris (desno zgoraj), čelni pogled s parkirišča za fakulteto (levo spodaj) ter pogled s strani (desno spodaj)

Objekt pokriva približno 32,46 m² površine in je v obeh smereh dolg 8,2 m. Spodaj je konstrukcija podrobneje predstavljena v več slikah, saj je zaradi zapletenejšega prekrivanja jader morda težje predstavljiva (slika 4-19).

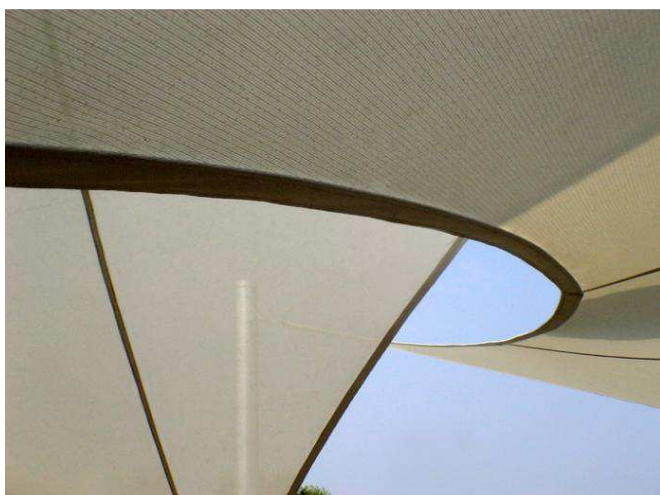


Slika 4-19: Pogled na konstrukcijo z zgornje desne strani (levo zgoraj), zadnji del konstrukcije (desno zgoraj), pogled z leve strani (levo spodaj) in prikaz prekrivanja jader (desno spodaj)

Ideja in vizualni izgled

Idejo za to konstrukcijo smo dobili med dodatnim študijem konstrukcij preko svetovnega spleta. Eden od arhitekturnih birojev, ki načrtuje in svetuje pri izvedbi lahkih prednapetih konstrukcij, je tudi kanadski biro Sollertia. Najbolj nas je pritegnilo njihovo nadkritje terase za padalsko družbo (slika 4-20).

Pri tej konstrukciji so se arhitekti poigrali z različnimi ukrivljenostmi jader, višinami in vpetjem v fiksne točke. Kot podporne elemente so uporabili nosilce oz. konzole, le en element podporne konstrukcije je jadro, stabilizirano z dodatnimi kabli. Oblika sicer orisuje krog, vendar so za razliko od nas postavili dodatni steber še malo iz sredine, zato da so lahko drugače ukrivili najbolj spodnje jadro in s tem pridobili še večjo razgibanost oblike. Ostali dve jadra smo vpeli na podobnih višinah in na podobnih mestih kot je to storil arhitekturni biro pred nami.



Slika 4-20: Nadstrešek terase padalske družbe (levo zgoraj), detajl križanja koncev dveh jader (desno zgoraj), detajl obhoda enega jadra okoli drugega (levo spodaj) ter steber z vpetim jadrom (desno spodaj) [23]

Membrana

Kot v prejšnjih primerih predvidevamo krojenje jader v smeri največjih napetosti, t.j. kjer je ukrivljenost posameznega jadra najmanjša. Za krojenje si pomagamo z geodetkami. Površina potrebne količine membrane znaša 39,33 m². Predvideno prednapetje je v vseh straneh vseh treh jader enako, in sicer 1 kN/m.

Prenos obtežbe

Princip prenosa obtežbe je podoben kot pri prejšnjih primerih – z membrane na robne fleksibilne elemente, z njih na stebre in v tla ali na objekt in v tla.

Nosilna konstrukcija in detajli

Nosilna konstrukcija je sestavljena iz stebrov, ki so toga vpeti v temelje. Membrana je preko primernih kotnih detajlov vpeta vanje tako, da je še vedno omogočeno naknadno prednapetje v primeru zmanjšanja le-tega.

Gradnja

Potrebna bi bila podrobnejša analiza možnosti postavitve, vendar predvidevamo, da bi morali nekatere upogibne elemente podporne konstrukcije zamenjati z jambori, ki bi omogočili vnos prednapetja z dviganjem podporne konstrukcije. V nasprotnem primeru bi bilo potrebno izvesti posebne mehanske priključke na upogibnih elementih, ki bi omogočali dvig in nateg konstrukcije.

Cena

Material:

Količnik med izrabo materiala membrane in osenčenim prostorom je ugoden, 1,21. Število stebrov je v tem primeru veliko večje kot v ostalih primerih, potrebujemo jih sedem.

Delo:

Detajli v splošnem niso zahtevni za izvedbo, le postopek montaže še ni znan. Za oceno zahtevnosti tega dela bi bila potrebna podrobnejša analiza.

Podatki o konstrukciji

Prednapetje:

- osnovna smer: 1,00 kN/m
- pravokotno: 1,00 kN/m
- razmerje: 1:1

Površina:

- membrane: 39,33 m²
- osenčenega prostora: 32,46 m²
- razmerje: 1,21

Višina:

- konstrukcije: 4 m
- najvišji steber: 3,5 m

Širina in dolžina: 8,2 m

4.7 OCENA STROŠKOV POSAMEZNE KONSTRUKCIJE IN PRIMERJAVA MED NJIMI

V tem poglavju sem zbrala vse tehnične podatke o konstrukcijah, ki sem jih predstavila v poročilu in jih primerjala.

4.7.1 GEOMETRIJA IN PREDNAPETJE

Prednapetje

Preglednica 4-1: Prednapetje membrane v osnovni in votkovni smer ter primerjava med njima

Primer	Opis konstr.	Osnovna smer [kN/m]	Votkovna smer [kN/m]	Razmerje prednapetij [/]
Primer 1:	Konusna konstr. na loku	1,00	1,30	1:1,3
Primer 2:	Dežnik	1,00	1,00	1:1
Primer 3:	Tri jadra	1,00	1,00	1:1
Primer 4:	Dva deltoida	1,00	1,00	1:1
Primer 5:	Osmerokotnik	1,00	1,00	1:1

Razmerje med prednapetjem v osnovni in votkovni smeri mora biti večje ali enako razmerju 1:1 (najboljše) in manjše ali enako razmerju 1:4 (neharmonična oblika površine), večja razmerja pomenijo neusklajeno obliko in slabo izkoriščenost materiala, lahko se pojavijo problemi pri prenašanju obtežbe.

Vse konstrukcije, ki smo jih obravnavali v poročilu, imajo razmerje prednapetja v določenih mejah, še boljše, le ena ima razmerje večje od najbolj ustreznega (preglednica 4-1).

Geometrija

Preglednica 4-2: Dimenzije konstrukcij in velikost prostora, ki ga pokrivajo

Primer	Opis konstr.	Širina [m]	Dolžina [m]	Višina [m]	Pokrita površina [m ²]
Primer 1:	Konusna konstr. na loku	8,35	6,23	6,00	17,08
Primer 2:	Dežnik	9,10	6,70	4,00	35,83
Primer 3:	Tri jadra	7,70	9,30	6,00	35,55
Primer 4:	Dva deltoida	10,10	6,50	5,00	41,53
Primer 5:	Osmerokotnik	8,20	8,20	4,00	32,46

Preglednica (preglednica 4-2) služi kot zbirka osnovnih geometrijskih podatkov o predstavljenih konstrukcijah. Iz nje lahko razberemo, da širine izrisanih konstrukcij segajo od 7 do 10 m, dolžine od 6 do 9,3 m, višine pa od 4 do 6 m. Bolj zanimiv je ogled vrednosti pokrite površine oz. osenčenega prostora pod konstrukcijo, če je vpad sončnih žarkov pravokoten na temeljna tla. Najmanjšo površino pokrije konusna konstrukcija na loku, največ pa konstrukcija iz dveh deltoidov. Ostale strukture pokrijejo približno enako površino. Opazimo lahko, da ni direktne povezave med višino konstrukcije in pokrito površino. Na njeno velikost v večji meri vplivajo druge dimenzije, so pa oblike membranskih konstrukcij

tako raznolike, da tudi med dimenzijami in pokrito površino ne moremo potegniti prave povezave.

4.7.2 OCENA STROŠKOV MATERIALA

Obravnavali smo vsak konstrukcijski del posebej, nato pa na koncu združili vrednosti. Vse cene konstrukcij se nanašajo zgolj na uporabljeno količino materiala, ne na delo.

Membrana

Za ekonomično izrabo materiala je pomembno razmerje med potrebno površino tkanine in osenčeno površino, ki jo zagotavlja konstrukcija (preglednica 4-3). Stremimo k čim večji osenčeni površini in čim manjšemu prej omenjenemu razmerju. Med obravnavanimi konstrukcijami je po teh kriterijih v primerjavi z ostalimi najbolj optimalna druga (svetlo oranžno obarvana vrstica), t.j. dežnik, čeprav je običajno izraba površine tkanine ravno pri konusnih oblikah najmanjša. Največjo površino osenčimo s četrtem primerom, vendar je izraba materiala v tem primeru zelo slaba, saj potrebujemo skoraj dvakrat toliko materiala, kolikor površine pokrijemo. Najmanjše razmerje med površinama je v prvem primeru, vendar je tudi osenčena površina skoraj 2-krat manjša kot v ostalih primerih.

Preglednica 4-3: Ekonomična izraba materiala in cena membrane

Primer	Opis konstr.	Površina tkanine [m ²]	Osenčena površina [m ²]	Količnik [l]	Cena membrane [€]
Primer 1:	Konusna konstr. na loku	18,61	17,08	1,09	90
Primer 2:	Dežnik	42,02	35,83	1,17	204
Primer 3:	Tri jadra	44,17	35,55	1,24	214
Primer 4:	Dva deltoida	76,84	41,53	1,85	373
Primer 5:	Osmerokotnik	39,33	32,46	1,21	191

V zadnjem stolpcu je ocenjen strošek materiala, ki bi ga potrebovali za izdelavo membrane, delo ni všteto. Okvirne cene PET/PVC tkanine smo uspeli dobiti na svetovnem spletu, za izračun pa smo vzeli povprečno vrednost 4,40 €/m². Cene se razlikujejo predvsem zaradi različnih zaključnih premazov.

Pri izračunu cene membrane smo površino tkanine, ki jo izračuna računalniški program glede na ravnovesno obliko, nekoliko povečali, saj v omenjeni vrednosti ni upoštevanih več dejavnikov, ki bodisi zmanjšujejo bodisi povečujejo potrebno količino materiala. Mednje sodijo:

- kompenzacija krojev (zmanjšanje krojev zaradi raztezka ob vnosu prednapetja),
- popačenje zaradi projekcije na ravnino (dvojno ukrivljene ploskve ni mogoče preslikati na ravnino brez določenega odstopanja),
- varjenje (za njegovo izvedbo je potrebno kroje povečati, da se ti med sabo prekrivajo, ali pa dodati trak tkanine na mesto zvara) in
- izvedba robnih in kotnih detajlov.

Povečanje smo ocenili na 10% površine membrane.

Seveda je cilj najti najcenejšo konstrukcijo, ki pa mora hkrati tudi osenčiti čim večjo površino. Čeprav je bila prej kot najbolj optimalna glede ekonomične izrabe materiala izbrana druga

konstrukcija, pa tukaj pridemo do dileme, saj je cenejša konstrukcija, ki prekrije le 3 m² manj površine (vrstica obarvana temno oranžno). Ker predvidevamo, da bodo na končno odločitev o najcenejši konstrukciji vplivali še drugi dejavniki, velja omeniti tudi tretjo konstrukcijo, ki je komaj kaj dražja od omenjenih dveh, prekrije pa približno isto površino. Najcenejša je seveda prva konstrukcija, ki ima najmanjši količnik in prekrije najmanjše območje, najdražja pa četrta, ki tudi prekrije največje območje.

Kabli, togi elementi in ogliščni detajli

V naslednjih preglednicah (preglednica 4-4, 4-5 in 4-6) smo prikazali potrebne količine posameznih gradbenih elementov za izdelavo konstrukcije, njihovo ceno in njeno primerjavo s površino, ki jo membrana pokriva. Tako kot v primeru membrane tudi tukaj stremimo k čim nižji ceni in čim večji površini, torej k čim manjšemu količniku med celotnim stroškom za posamezen element in pokrito površino. Najbolj optimalne primere smo označili z oranžno barvo, najslabše pa z rdečo.

V fazi idejnega načrta konstrukcije natančne dimenzije membrane in obremenitve konstrukcije še niso znane, zato tudi nismo mogli določiti dimenzij elementov in njihove točne cene. Izbrali smo nekakšno povprečno ceno pri najbolj verjetnih dimenzijah. V primeru ogliščnih detajlov smo sestavili dva tipična detajla, ki sta bila tudi podana s strani enega od proizvajalcev, in sicer enega za priključitev na jambor ali kabel in drugega za priključitev na obstoječo konstrukcijo. Pri izračunu skupne cene detajlov smo upoštevali število enih in drugih na posamezni konstrukciji, čeprav to v preglednici ni izrecno prikazano.

Za ceno jeklenega kabla smo vzeli vrednost 7,97 €/m, za ceno jeklenega cevastega profila 45,37 €/m, za ceno ogliščnega detajla, ki membrano vpenja na jambor ali kabel, 520 €/kos in za ceno ogliščnega detajla, ki membrano vpenja na objekt, 536 €/kos.

Preglednica 4-4: Količina kablov in njihova cena

Primer	Opis konstr.	Robni kabli [m]	Ostali kabli [m]	Skupaj kabli [m]	Cena kablov [€]	Cena na pokrito površino [€/m ²]
Primer 1:	Konusna konstr. na loku	113,78	15,30	129,08	1028	60,20
Primer 2:	Dežnik	25,51	31,85	57,36	457	12,75
Primer 3:	Tri jadra	61,35	57,33	118,68	945	26,59
Primer 4:	Dva deltoida	57,87	23,37	81,24	647	15,58
Primer 5:	Osmerokotnik	66,96	0,00	66,96	533	16,43

Preglednica 4-5: Količina togih elementov in njihova cena

Primer	Opis konstr.	Togi elementi [m]	Cena jeklenih nosilcev [€]	Cena na pokrito površino [€/m ²]
Primer 1:	Konusna konstr. na loku	15,71	713	41,73
Primer 2:	Dežnik	16,13	732	20,43
Primer 3:	Tri jadra	14,58	662	18,61
Primer 4:	Dva deltoida	8,30	377	9,07
Primer 5:	Osmerokotnik	16,00	726	22,36

Preglednica 4-6: Količina detajlov in njihova cena

Primer	Opis konstr.	Število ogliščnih detajlov [l]	Cena ogliščnih detajlov [€]	Cena na pokrito površino [€/m ²]
Primer 1:	Konusna konstr. na loku	6	3136	183,59
Primer 2:	Dežnik	6	3672	102,47
Primer 3:	Tri jadra	12	6287	176,86
Primer 4:	Dva deltoida	8	4192	100,93
Primer 5:	Osmerokotnik	12	6287	193,69

Kar v dveh primerih se kot najbolj optimalen izkaže četrti primer, k čemur smo tudi stremeli pri oblikovanju te strukture. Tudi dežnikasta konstrukcija je med bolj optimalnimi glede porabe finančnih sredstev, čeprav ocena cene njenih ogliščnih detajlov ni najbolj realna, ker smo za ceno nateznega obroča upoštevali najdražji detajl, v realnosti pa je ta gotovo višja.

Kot najslabša konstrukcija s stroškovnega vidika je prva, ki zmaga kar v dveh kategorijah, vendar so ji tudi druge blizu. Temu najbrž botruje izbira loka kot podpornega elementa.

Najdražja glede na ogliščne detajle je zadnja konstrukcija, saj jo sestavljajo tri jadra, torej ima 12 oglišč, kolikor jih ima tudi tretja konstrukcija, vendar ta pokriva nekoliko večjo površino, zato je njen količnik nekoliko nižji.

Celotna konstrukcija

Ceno posameznih delov konstrukcije in ceno celotne konstrukcije smo prikazali v spodnji preglednici (preglednica 4-7). Izračunali smo tudi ceno celotne konstrukcije na velikost pokrite površine.

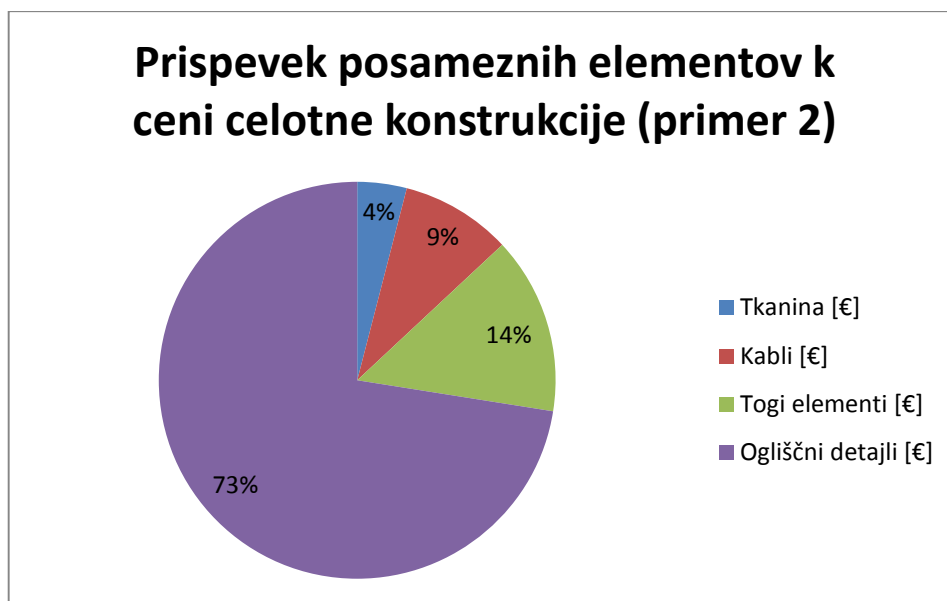
Preglednica 4-7: Stroški celotne konstrukcije po delih in skupaj

Primer	Opis konstr.	Tkanina [€]	Kabli [€]	Togi elementi [€]	Ogliščni detajli [€]	Skupaj [€]	Skupaj na pokrito površino [€/m ²]
Primer 1:	Konusna konstr. na loku	90	1028	713	3136	4967	291
Primer 2:	Dežnik	204	457	732	3672	5064	141
Primer 3:	Tri jadra	214	945	662	6287	8108	228
Primer 4:	Dva deltoida	373	647	377	4192	5588	135
Primer 5:	Osmerokotnik	191	533	726	6287	7737	238

Kot najcenejša konstrukcija na kvadratni meter se izkaže četrti, pri kateri je bilo to tudi glavno vodilo pri oblikovanju, sledi pa ji dežnikasta struktura, pri kateri, kot smo že omenili, stroški za material niso v celoti korektno izračunani.

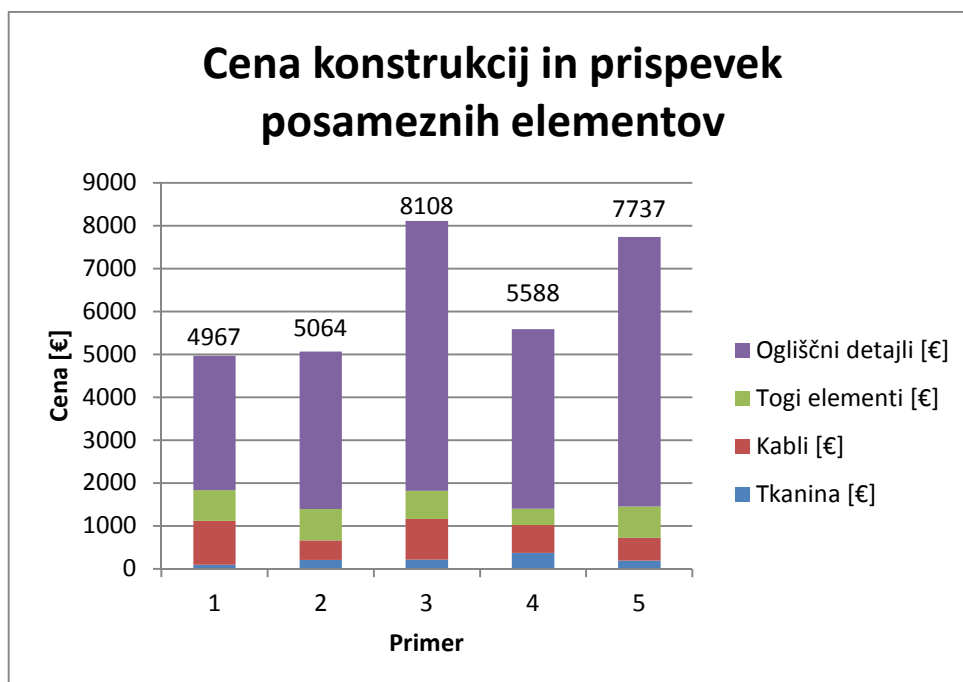
Najdražja konstrukcija na kvadratni meter je prva, za kar je v največji meri kriv izbor loka kot podporne konstrukcije ter veliko število ogliščnih detajlov, ki imajo bolj estetsko vlogo.

Na primeru dežnikaste konstrukcije smo prikazali prispevek posameznega gradbenega materiala k ceni celotne konstrukcije (grafikon 4-1). Največji delež prispevajo ogliščni detajli, sama tkanina pa predstavlja minimalnega.

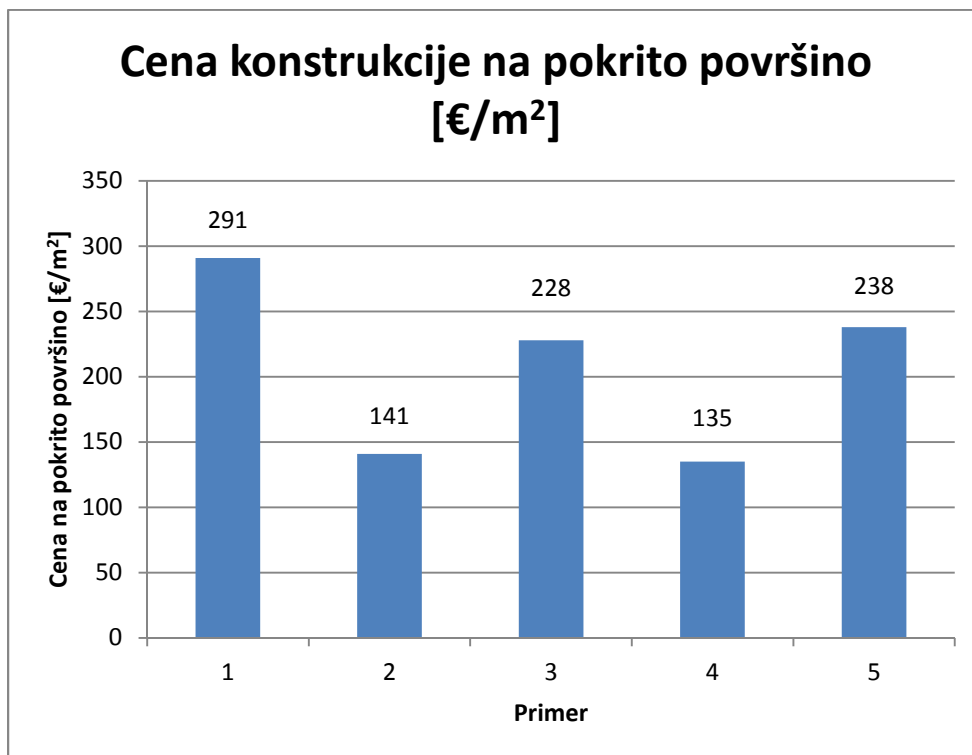


Grafikon 4-1: Prispevek posameznih gradbenih elementov k ceni celotne konstrukcije

V naslednjem grafikonu (grafikon 4-2) so prikazane cene celotne konstrukcije in posameznih delov. Najdražja je tretja konstrukcija zaradi velikega števila oglišč in kablov. Če gledamo samo na ceno konstrukcije v celoti, je najcenejša prva, vendar ta ni veliko cenejša od druge, ki pokrije bistveno večje območje.



Grafikon 4-2: Cene konstrukcij in prispevki posameznih delov



Grafikon 4-3: Cena konstrukcij na kvadratni meter pokrite površine

Ocena stroška materiala za izdelavo konstrukcije na kvadratni meter pokrite površine je prikazana na zgornjem grafikonu (grafikon 4-3). Ta lahko potrdi zaključke iz prejšnjih odstavkov – najcenejši sta druga in četrta konstrukcija, najdražja pa prva.

Naj še enkrat omenimo, da so prikazane cene le grobe ocene in da bolj kot za realno oceno končnega stroška materiala za izgradnjo služijo kot orodje za primerjavo.

4.7.3 KOMENTAR

Vrnimo se k osnovnim zahtevam. Te so bile:

- estetskost in inovativnost konstrukcije,
- lahka odstranljivost,
- cenovna ugodnost in
- funkcionalnost (ne predstavlja ovire za zaposlene).

Lahka odstranljivost konstrukcije je značilnost vseh obravnavanih primerov oz. v primerjavi z armiranobetonskimi splošna lastnost prednapetih membranskih konstrukcij.

Ves čas oblikovanja konstrukcij smo se trudili, da nobena izmed njih ne bi predstavljala ovire za zaposlene, torej predvsem, da ne zastira oken stavbe računovodstva. Za bolj natančno določitev vpliva postavitve posamezne konstrukcije na osvetlitev obstoječe zgradbe bi bile potrebne dodatne analize. Zaključimo lahko, da je tudi tej zahtevi v zadovoljivih okvirih zadoščeno v vseh obravnavanih primerih.

Kot odločilna dejavnika sta nam torej ostala estetskost in inovativnost konstrukcije ter njena cenovna ugodnost. Analiza stroškov za material je bila podrobneje opravljena v prejšnjem poglavju, prvi dejavnik pa je bolj subjektiven in odvisen od želenega učinka.

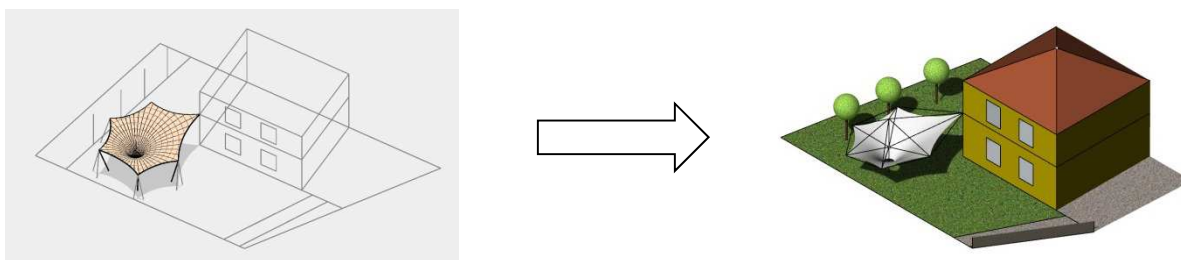
Menimo, da je med oblikovanimi konstrukcijami najbolj interesantna zadnja, pa tudi cena na kvadratni meter ni med najvišjimi. Kot drugo bi izbrala četrto konstrukcijo, ki je tudi najcenejša.

5 STATIČNI ANALIZI DVEH ZASNOV

Po osnovanju arhitektonske zasnove konstrukcije se začne faza projektiranja, ki je bližje inženirjem – statična analiza. Kot smo že omenili, postopek načrtovanja ni enak postopkom pri klasičnih konstrukcijah in z njim še nismo bili dodobra seznanjeni. Problem je predstavljalo tudi modeliranje membran, saj želenih oblik konstrukcije v nekaterih primerih ni bilo mogoče zasnovati tako, kot smo si v idejnih načrtih zamislili. Zato smo se odločili za modeliranje in analizo dveh enostavnejših primerov izmed idejnih zasnov, skozi katere smo lahko dodobra preučili princip modeliranja in statične analize ter kritično ocenili rezultate analize. Izbrali smo »Dežnik« (primer 2 med idejnimi načrti), ki je za razliko od ostalih konična konstrukcija, ter »Tri jadra« (primer 3 med idejnimi načrti), ki je bil med idejami izbran za enega izmed najbolj primernih za postavitev.

Dve izbrani rešitvi smo zmodelirali, na njih izvedli statično analizo ter dimenzionirali osnovne dele konstrukcije.

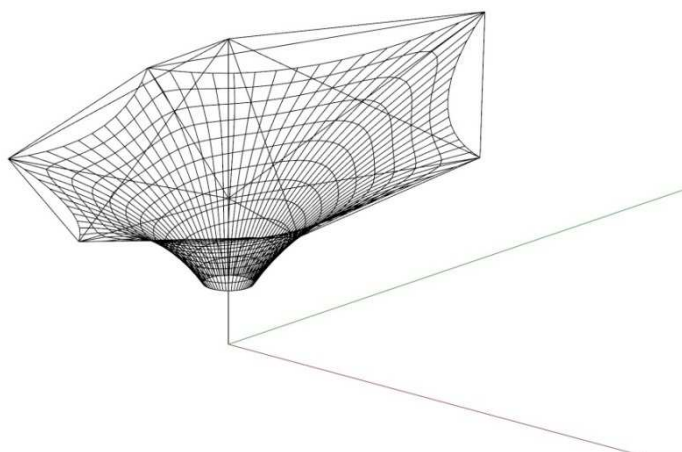
5.1 PRIMER 1: DEŽNIK



Slika 5-1: Od idejnega načrta do modela konstrukcije "Dežnik"

Pri končni zasnovi za projektiranje smo ohranili obliko pravilnega šesterokotnika, s tem da smo iz včrtane krožnice potisnili dve oglišči, ki stojita bližje objektu, tako da so napetosti v tkanini bolj enakomerno razporejene (slika 5-2). Nižinska točka je ostala v središču šesterokotnika iz istih razlogov. Ker so bili kroji preveč deformirani na mestih, kjer so se približevali nižinski točki, smo to dvignili na višino 1 m in povečali natezni obroč na velikost radija 0,4 m.

Po obodu membrane so predvideni kabli, ki se v ogliščih vpenjajo na podporno konstrukcijo. Ta je podobna konstrukciji dežnika in izhaja iz središčnega jambora, ki je togo vpet v podlago. Tudi ostali deli podporne konstrukcije so med seboj togo vpeti. Ravlina, na kateri se oglišča nahajajo, je ostala nagnjena, tako da se oglišče, ki je vpeto v objekt, nahajala na višini 4 m, nasprotno pa na višini 2,5 m (slika 5-2). Najdaljša diagonala je dolga 9,5 m, diagonala, ki je pravokotna nanjo, pa 6,6 m. Višina konstrukcije je ostala 4 m, jambor je visok 5 m in členkasto vpet v tla.



Slika 5-2: Model membrane s podporno konstrukcijo

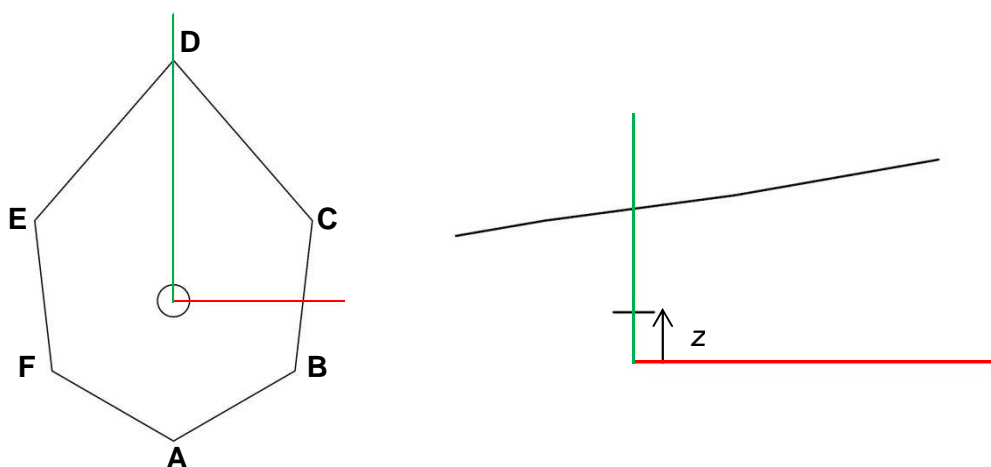
5.1.1 ISKANJE OBLIKE

Kot smo že večkrat omenili, je projektiranje prednapetih membran svojevrsten proces, ki ga ne najdemo pri ostalih, klasičnih konstrukcijah. Med prvimi posebnostmi je iskanje ravnovesne oblike ploskve, ki bo izdelana iz tkanine, saj mora biti ta po celotni površini in pri vseh možnih obremenitvah v nategu. Pri tem nam pomagajo računalniški programi, v našem primeru vtičnik MPANEL.

Vhodni podatki

Pred zagonom relaksacije mreže, ki predstavlja prednapeto membrano, moramo, večinoma grafično, vnesti vhodne podatke, na podlagi katerih nato program postavi konstrukcijo v ravnovesno lego. Gre za vris fiksnih točk (slika 5-3), določitev prednapetja membrane, nateznih sil v kablji ter gostote mreže, ki predstavlja model membrane.

Koordinate fiksnih točk v ravnini ter pozicija nateznega obroča



Slika 5-3: Skica fiksnih točk (levo) in nateznega obroča (desno) ¹

¹ Opomba: Rdeča in zelena linija v vsakem pogledu predstavljata koordinatni osi, ki definirata ravnino, v kateri je model predstavljen, torej nista vedno isti koordinatni osi.

Fiksne točke:

$$A = (0,00; -3,50; 2,50)$$

$$B = (3,03; -1,75; 2,80)$$

$$C = (3,46; 2,00; 3,30)$$

$$D = (0,00; 3,00; 4,00)$$

$$E = (-3,46; 2,00; 3,30)$$

$$F = (-3,03; -1,75; 2,80)$$

Natezni obroč:

$$r = 0,40\text{m}$$

$$z = 1\text{m}$$

Prednapetje membrane

Koeficient prednapetja: $k_p = 1,3$

Dovoljeni so različni nivoji prednapetja v smeri osnovnih in votkovnih niti, saj to omogoča izračun najbolj optimalne oblike konične konstrukcije.

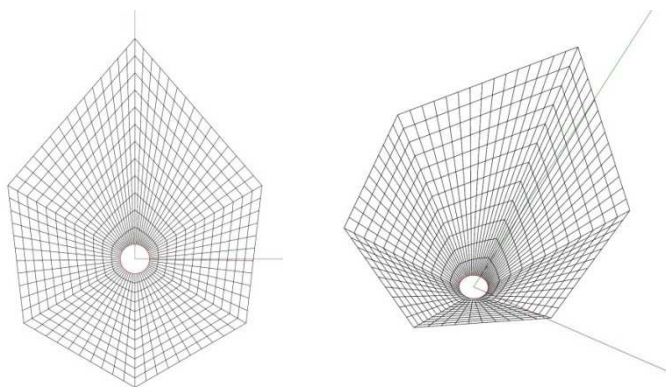
Napetosti v kablji

Koeficient napetosti v vseh kablji: $k_k = 1$

Pri tem koeficient k_k predstavlja faktor, za katerega povečamo natezne sile v kablji, ki v njem nastanejo zaradi predvidenega prednapetja tkanine. Če v membrano vnesemo prednapetje velikosti npr. 0,5 kN/m, ki povzroči obremenitev vzdolž 5 m dolgega kabla v velikosti 0,3 kN/m, ima kabl pri koeficientu $k_k = 1$ notranjo silo 1,5 kN, pri koeficientu $k_k = 1,5$ pa 2,25 kN [24]. Gre torej za dodatno prednapetje kabla.

Gostota mreže

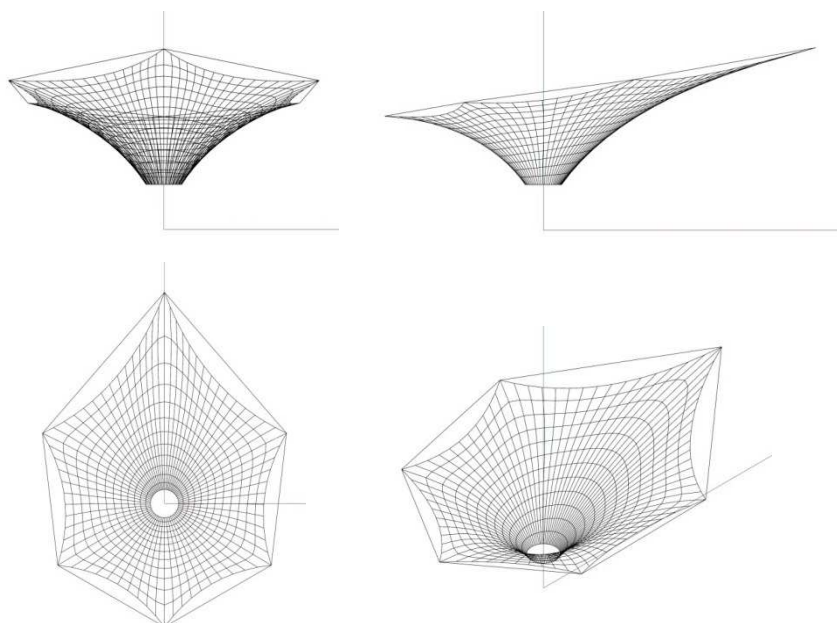
Model bo sestavljen iz 6 mrež, vsako smo v obeh smereh razdelili na 12 enako širokih delov (slika 5-4).



Slika 5-4: Tloris (levo) in tridimenzionalni pogled (desno) na še ne sproščene mreže

Izhodni podatki

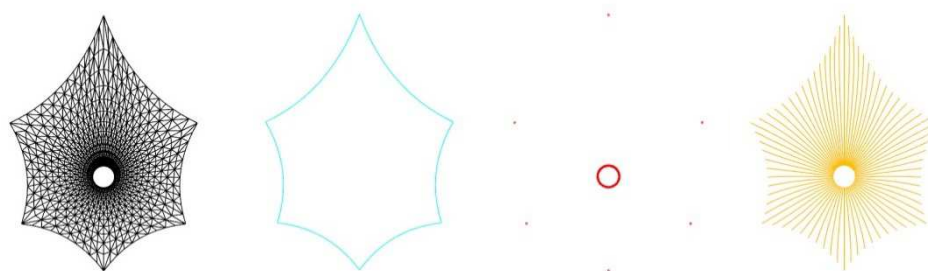
Glede na naše vhodne podatke nam program poišče ravnovesno obliko modela (slika 5-5). Javi nam tudi podatke o postopku sproščanja, kot sta rezidualna napaka in število iteracij. V našem primeru je bila rezidualna napaka po dveh ciklih 250 iteracij manjša od 0,0001 pri vseh mrežah, torej je model dokončno sproščen.



Slika 5-5: Frontalni pogled (levo zgoraj), pogled s strani (desno zgoraj), tlorisni (levo spodaj) in izometrični pogled na sproščen model konstrukcije »Dežnik«

5.1.2 STATIČNA ANALIZA

Najprej nam program vhodno konstrukcijo razdeli na končne elemente, izriše robne kable in podpore glede na naše vhodne podatke (slika 5-6). Membrano smo vpeli v dokaj togo podporno konstrukcijo, zato smo jo modelirali kot da je v robovih dežnika togo vpeta. Definirati moramo tudi orientacijo lokalnega koordinatnega sistema, torej x smer, ki običajno poteka v smeri osnovnih niti tkanine. Ta v našem primeru poteka pravokotno na robne kable proti nateznemu obroču.



Slika 5-6: Pretvorba konstrukcije v končne elemente (skrajno levo), robni kabli (sredina levo), podpore (sredina desno) in smer koordinate x (skrajno desno)

Začetna izbira materialov

Pred začetkom analize moramo podati lastnosti materialov, iz katerih je konstrukcija izdelana. Izbirati moramo premišljeno, saj je odziv konstrukcije odvisen tudi od lastnosti in dimenzij izbranih materialov. Za membrano smo, kot je bilo že v idejni fazi predvideno, izbrali PET/PVC membrano, zanjo pa vnesli vrednosti, ki jih priporoča program sam. Te so:

$$E_x = E_y = 300\text{kN/m}$$

$$G = 30\text{kN/m}$$

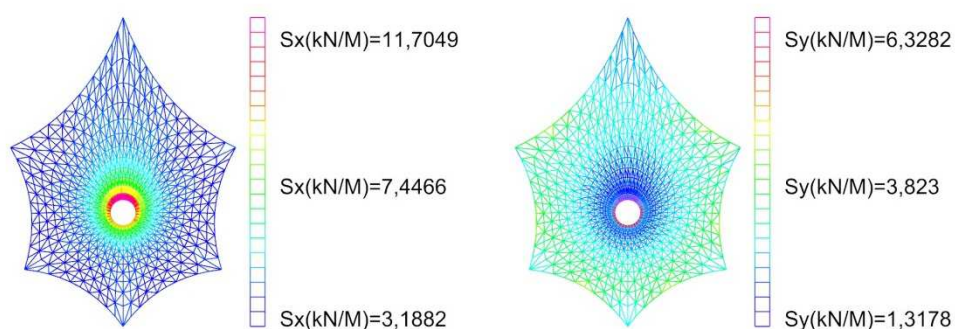
$$\nu = 0,3$$

$$f_{ux} = f_{uy} = 56 \text{ kN/m [25]}$$

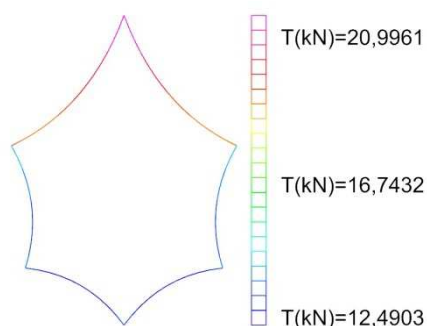
Za kable smo vnesli priporočene vrednosti elastičnega modula za galvanizirane kable ($E = 180 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$) [28], predviden prerez kablov pa je 8 mm.

Stanje prednapetja

Na spodnjih slikah so prikazane napetosti v membrani in v kablji ob vnosu predvidenega prednapetja (sliki 5-7 in 5-8). Opazimo lahko, da so napetosti v osnovni smeri ($n_{xx,min} = 3,19 \text{ kN/m}$) tudi dvakrat večje od tistih v votkovni ($n_{yy,min} = 1,32 \text{ kN/m}$), kar gre pripisati specifični obliki take konstrukcije. Glede na velike napetosti v okolici nateznega obroča že v stanju prednapetja ($n_{xx,max} = 11,70 \text{ kN/m}$) predvidevamo, da bo potrebno na tem mestu material ojačati.



Slika 5-7: Napetosti v membrani v stanju prednapetja v osnovni (levo) in votkovni smeri (desno)



Slika 5-8: Sile v kablji v stanju prednapetja

V kablji pride do največjih nateznih sil v okolici priključka na objekt, te znašajo $T_{max} = 21,00 \text{ kN}$. Razlog za to je, da smo omenjeno oglišče pomaknili nekoliko iz pravičnega šestkotnika, zato morajo tam kablji ponuditi večji odpor za ohranjanje oblike.

Obtežbe

Kot je bilo že omenjeno, bomo obravnavali le dva vpliva na konstrukcijo, in sicer sneg ter veter. Ostali vplivi, vključno z lastno težo tkanine, so zanemarljivi ali niso kritični.

Sneg

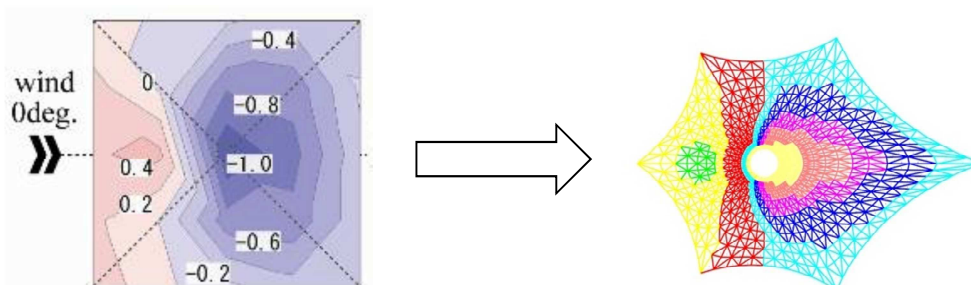
Ljubljana se nahaja v coni A2, na nadmorski višini približno 300 m, kar pomeni, da je vrednost obtežbe snega enaka $s_k = 1,51\text{kN/m}^2$ [26]. Razporedimo jo enakomerno po celotni konstrukciji, s tem da upoštevamo koeficient $\mu = 0,8$ [27].

$$s_1 = 0,8 \cdot 1,51\text{kN/m}^2 = 1,21\text{kN/m}^2$$

Veter

Gre za cono 1, teren kategorij II in povprečno višino konstrukcije 2 m. Osnovna hitrost vetra je torej $v_k = c_e \cdot q_b = 1,42 \cdot 0,25\text{kN/m}^2 = 0,36\text{kN/m}^2$ [28] [29].

Upoštevamo obtežbo vetra kot srka, enakomerno razporejenega po celotni površini in veter, ki piha od spodnje strani konstrukcije proti najvišji točki. Koeficiente za primer take razporeditve dobimo iz rezultatov testov v vetrnem tunelu. Ker na voljo ni bilo rezultatov na konstrukciji, kot je naša, smo uporabili rezultate za konično konstrukcijo z visoko točko kvadratne tlorisne oblike (slika 5-9). Koeficiente smo smiselno nanesli na obravnavani model.



Slika 5-9: Rezultati testov v vetrnem tunelu za konično konstrukcijo z visoko točko (levo) [30] ter razporeditev vetrne obtežbe v smeri proti visoki točki na modelu (desno)

Razmerje višine s širino konične konstrukcije, na podlagi katerega smo izbrali primerne rezultate testov iz vetrnega tunela, znaša $h/L \cong 0,3$.

Pritiski na membrano zaradi vpliva vetra, ki piha pravokotno na eno od stranic, glede na koeficiente, predlagane v [30]:

$$v_1 = c_{p1} \cdot v = -1,0 \cdot 0,36\text{kN/m}^2 = -0,36\text{kN/m}^2$$

$$v_2 = c_{p2} \cdot v = -0,8 \cdot 0,36\text{kN/m}^2 = -0,288\text{kN/m}^2$$

$$v_3 = c_{p3} \cdot v = -0,6 \cdot 0,36\text{kN/m}^2 = -0,216\text{kN/m}^2$$

$$v_4 = c_{p4} \cdot v = -0,4 \cdot 0,36\text{kN/m}^2 = -0,144\text{kN/m}^2$$

$$v_5 = c_{p5} \cdot v = -0,2 \cdot 0,36\text{kN/m}^2 = -0,072\text{kN/m}^2$$

$$v_6 = c_{p6} \cdot v = 0,0 \cdot 0,36\text{kN/m}^2 = 0,00\text{kN/m}^2$$

$$v_7 = c_{p7} \cdot v = 0,2 \cdot 0,36\text{kN/m}^2 = 0,072\text{kN/m}^2$$

$$v_8 = c_{p8} \cdot v = 0,4 \cdot 0,36\text{kN/m}^2 = 0,144\text{kN/m}^2$$

Obtežne kombinacije

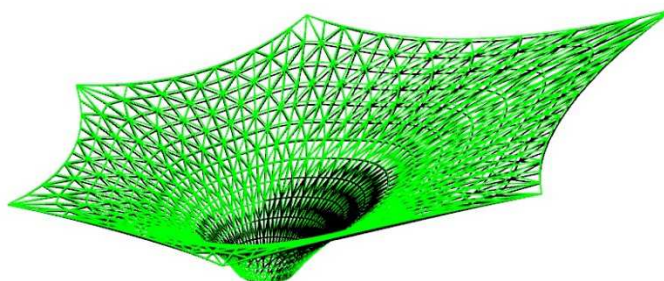
Upoštevali smo karakteristične vrednosti vseh vplivov, le pri kombinaciji snega s vetrom smo slednjega pomnožili z faktorjem ψ_0 po standardu SIST EN 1990. Ta je enak 0,6 [31].

1. Prednapetje '+' sneg
2. Prednapetje '+' veter (srk)
3. Prednapetje '+' veter y
4. Prednapetje '+' sneg '+' $0,6 \cdot$ veter y

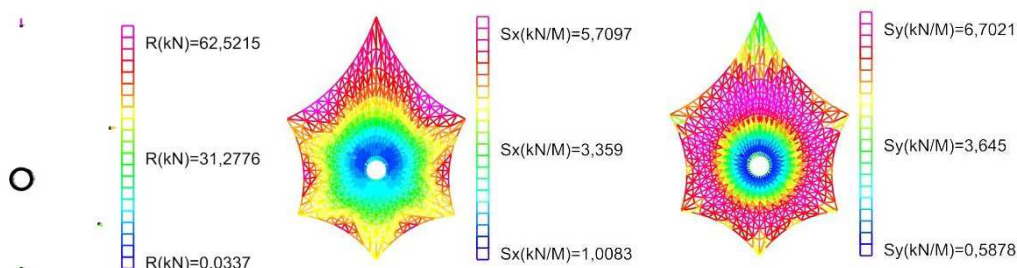
Rezultati analize

1. Prednapetje '+' sneg

Iz primerjave pomikov konstrukcije v osnovnem stanju in v stanju po nanosu obtežbe zaradi vpliva snega (slika 5-10) lahko opazimo, da se konstrukcija pod obtežbo snega pomakne rahlo navzdol in navzven.

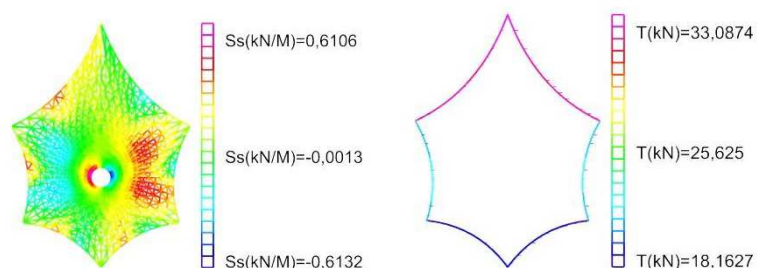


Slika 5-10: Deformirana oblika (črne barve) po nastopu obtežbe snega v primerjavi z izhodiščno obliko (zelene barve)



Slika 5-11: Reakcijske sile (skrajno levo), notranje napetosti v osnovni smeri (v sredini) in vtokovni smeri (skrajno desno) pri obtežbi s snegom

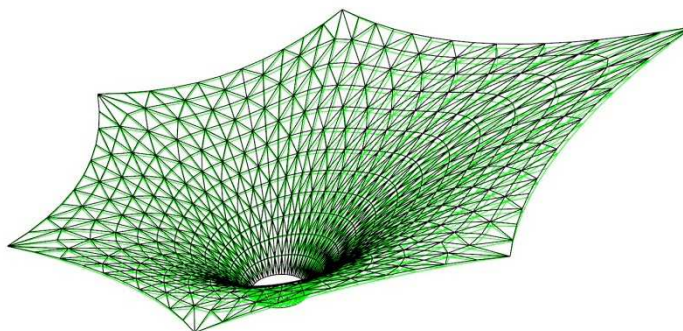
Ob obtežbi snega največja reakcijska sila nastopi v zgornji točki, ki se vpenja v objekt, saj nosi tudi največjo površino membrane in s tem največjo obtežbo (slika 5-11 levo). Notranje napetosti se v obeh smereh najbolj povečajo v zgornjem delu konstrukcije in po obodu (slika 5-11 v sredini in desno), proti nateznemu obroču pa se zmanjšujejo, tako da se prednapetje skoraj izgubi. Največje napetosti v osnovni smeri so $n_{xx,max} = 5,71\text{kN/m}$, v vtokovni pa $n_{yy,max} = 6,70\text{kN/m}$.



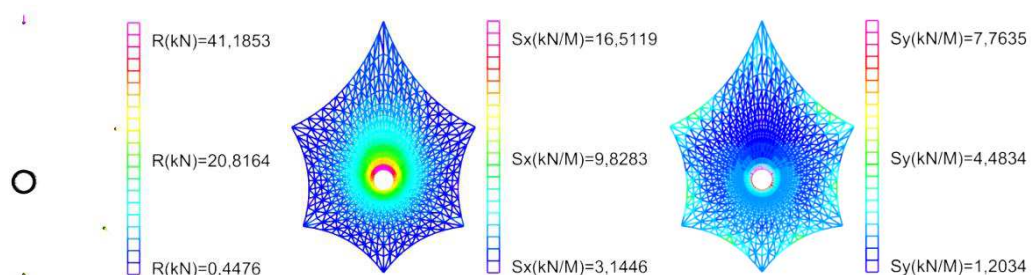
Slika 5-12: Strižne napetosti (levo) in sile v kablích (desno) pri obtežbi s snegom

Strižne napetosti so majhne (slika 5-12 levo), zato ne bodo povzročale večjih težav pri projektiranju. Največje sile v kablích so v zgornjem delu konstrukcije, kjer se dežnik priključuje na objekt (slika 5-12 desno). Tam so največje tudi napetosti v membrani ter reakcijske sile.

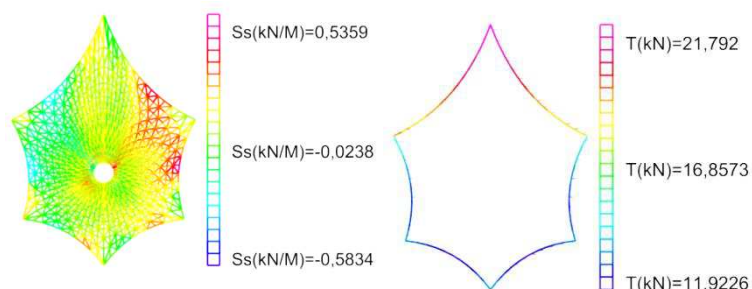
2. Prednapetje '+' veter (srk)



Slika 5-13: Deformirana oblika (črne barve) po nastopu obtežbe zaradi vpliva vetra v primerjavi z izhodiščno obliko (zelene barve)



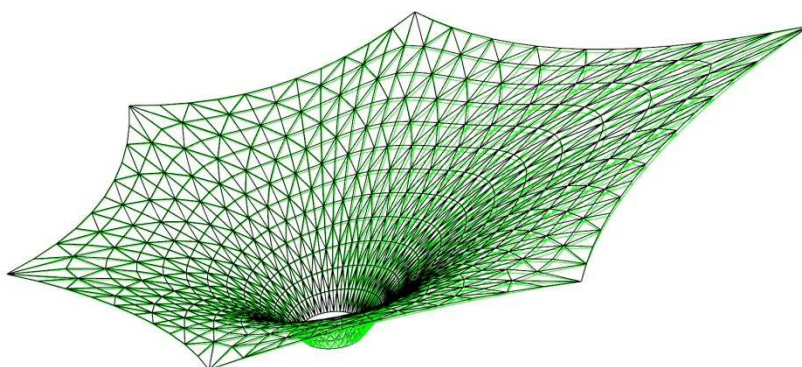
Slika 5-14: Reakcijske sile (skrajno levo), notranje napetosti v osnovni smeri (v sredini) in vtokovni smeri (skrajno desno) pri obtežbi zaradi vpliva vetra (srk)



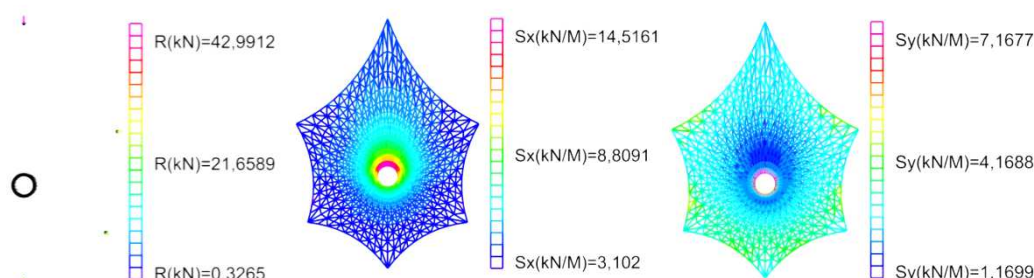
Slika 5-15: Strižne napetosti (levo) in sile v kablích (desno) pri obtežbi zaradi vpliva vetra (srk)

Konstrukcija se pod obtežbo zaradi vpliva vetra kot srka malce dvigne (slika 5-13), reakcijske sile so še vedno največje v zgornji podpori, in sicer $R_{max} = 4,19\text{kN}$ (slika 5-14 levo). Vrhovi napetosti se pojavijo v okolici nateznega obroča, v osnovni smeri v velikosti $n_{xx,max} = 16,51\text{kN/m}$ in v vtokovni $n_{yy,max} = 7,76\text{kN/m}$ (slika 5-14 v sredini in desno). Te bomo pokrili z ojačitvijo membrane. Strižne napetosti so zelo majhne (slika 5-15 levo). Največje sile v kabljih se zopet pojavijo v zgornjih dveh kabljih, in sicer v velikosti $T_{max} = 21,79\text{kN}$ (slika 5-15 desno).

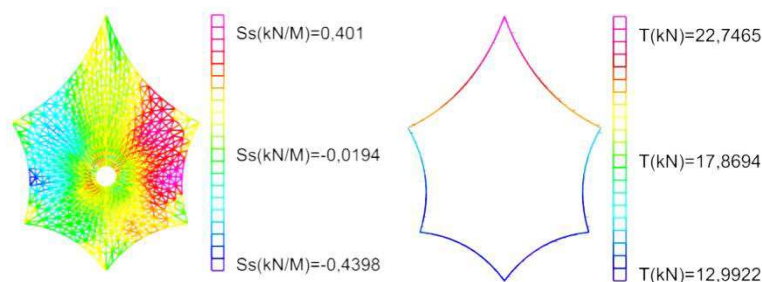
3. Prednapetje '+' veter y



Slika 5-16: Deformirana oblika (črne barve) po nastopu obtežbe zaradi vpliva vetra v smeri y v primerjavi z izhodiščno obliko (zelene barve)



Slika 5-17: Reakcijske sile (skrajno levo), notranje napetosti v osnovni smeri (v sredini) in vtokovni smeri (skrajno desno) pri obtežbi zaradi vpliva vetra v y smeri

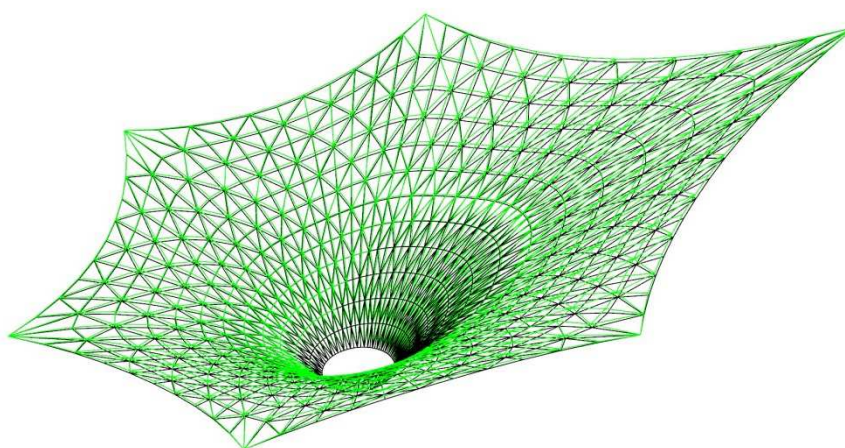


Slika 5-18: Strižne napetosti (levo) in sile v kabljih (desno) pri obtežbi zaradi vpliva vetra v y smeri

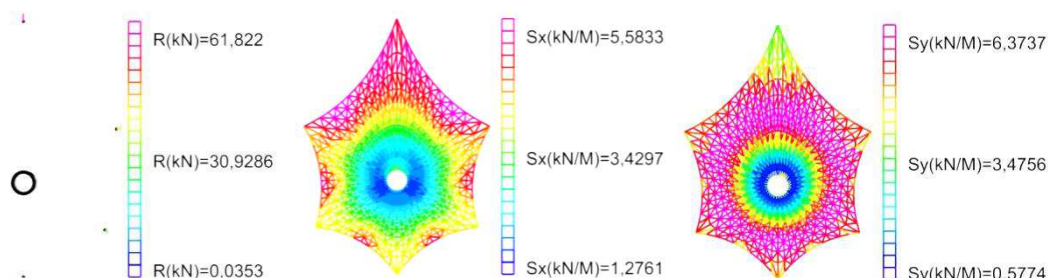
Rezultati analize pri obtežni kombinaciji z vetrom v smeri y so zelo podobni rezultatom prejšnje obtežne kombinacije, ko smo obtežbo zaradi vpliva vetra nanесли enakomerno po

celotni površini membrane. Konstrukcija se zopet premakne rahlo navzgor (slika 5-16), maksimalne reakcijske sile se nekoliko povečajo ($R_{max} = 42,99\text{kN}$) (slika 5-17 levo), medtem ko se notranje napetosti v osnovni in vtokovni smeri malo zmanjšajo ($n_{xx,max} = 14,52\text{kN/m}$ ter $n_{yy,max} = 7,17\text{kN/m}$) (slika 5-17 v sredini in desno) v primerjavi s predhodno obtežno kombinacijo. Strižne napetosti so majhne ($n_{xy,max} = 0,44\text{kN/m}$), največje sile v kabljih pa se nekoliko povečajo, $T_{max} = 22,75\text{kN}$ (slika 5-18).

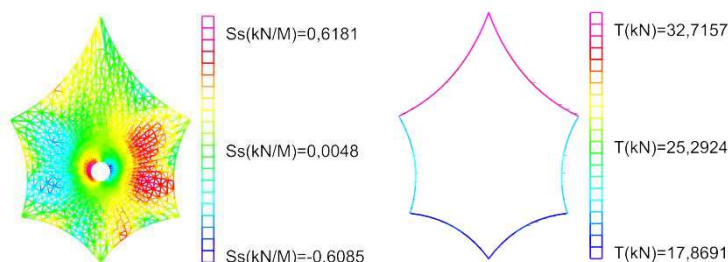
4. Prednapetje '+' sneg '+' $0,6 \cdot$ veter y



Slika 5-19: Deformirana oblika (črne barve) po nastopu obtežbe zaradi snega v kombinaciji z obtežbo zaradi vpliva vetra v smeri y v primerjavi z izhodiščno obliko (zelene barve)



Slika 5-20: Reakcijske sile (skrajno levo), notranje napetosti v osnovni smeri (v sredini) in vtokovni smeri (skrajno desno) pri obtežbi zaradi snega v kombinaciji z obtežbo zaradi vpliva vetra v smeri y



Slika 5-21: Strižne napetosti (levo) in sile v kabljih (desno) pri obtežbi zaradi snega v kombinaciji z obtežbo zaradi vpliva vetra v smeri y

Rezultati analize zadnje obtežne kombinacije so zelo podobni prvi, ko smo na konstrukcijo nanašali le obtežbo zaradi snega. Vse vrednosti so nekoliko manjše kot v prvem obtežnem

primeru, torej $R_{max} = 61,82\text{kN}$, $n_{xx,max} = 5,58\text{kN/m}$, $n_{yy,max} = 6,37\text{kN/m}$, $n_{xy,max} = 0,62\text{kN/m}$ in $T_{max} = 32,72\text{kN}$ (sliki 5-20 in 5-21).

Skupaj

V naslednji preglednici (preglednica 5-1) so zbrani vsi rezultati obtežnih kombinacij obravnavanih pri statični analizi konstrukcije, ki so potrebni za nadaljnjo obdelavo, t.j. dimenzioniranje konstrukcije.

Preglednica 5-1: Največje napetosti v membrani in sile v kablji pri obravnavanih obtežnih kombinacijah

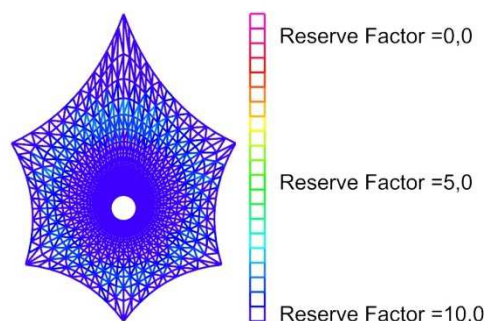
Obtežna kombinacija	Osnovna smer $n_{xx,max}$ [kN/m]	Votkovna smer $n_{yy,max}$ [kN/m]	Osne sile T_{max} [kN]
	Membrana		Kabli
Prednap. '+' sneg	5,71	6,70	33,09
Prednap. '+' veter (srk)	16,51	7,76	21,79
Prednap. '+' veter y	14,52	7,17	22,74
Prednap. '+' sneg '+' 0,6 · veter y	5,58	6,37	32,72

Lokalno povzroča največje obremenitve obtežba zaradi vpliva vetra oz. srka, največje natezne sile pa se pojavijo pri obtežbi zaradi vpliva snega, in sicer v zgornjih dveh kablji.

5.1.3 DIMENZIONIRANJE

Membrana

Glede varnosti smo najprej preverili obtežni primer s snegom, pri čemer se je izkazalo, da izbrani material membrane zadošča po celotni membrani (slika 5-22).



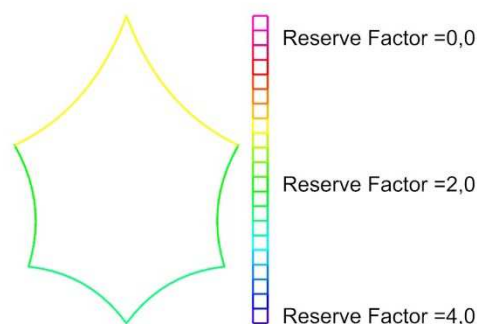
Slika 5-22: Kontrola varnosti membrane pri obtežbi s snegom

Za ostale primere smo ustreznost membrane izračunali ročno. Pri 2. in 3. obtežni kombinaciji se pojavijo vrhovi napetosti samo okrog nateznega obroča, zato smo se odločili, da bomo okoli njega membrano ojačali z dodatno plastjo tkanine. Iz tega sledi, da se bodo napetosti

razporedile na dva kosa tkanine in bodo zato dvakrat manjše. Upoštevali smo varnostni faktor 5,0, ki nam ga je predlagal program [25]. V tem primeru je bila kontrola izpolnjena.

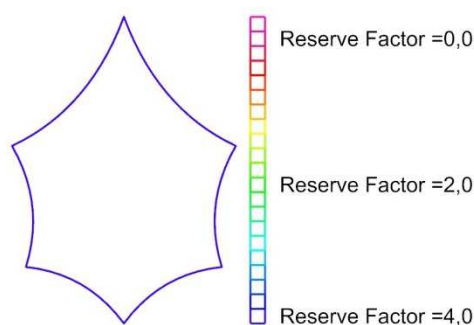
$$\frac{n_{xx,max}}{2} = \frac{16,51\text{kN/m}}{2} = 8,26\text{kN/m} < \frac{f_{ux}}{5} = \frac{56\text{kN/m}}{5} = 11,2\text{kN/m}$$

Kabli



Slika 5-23: Kontrola varnosti robnih kablov pri obtežbi s snegom

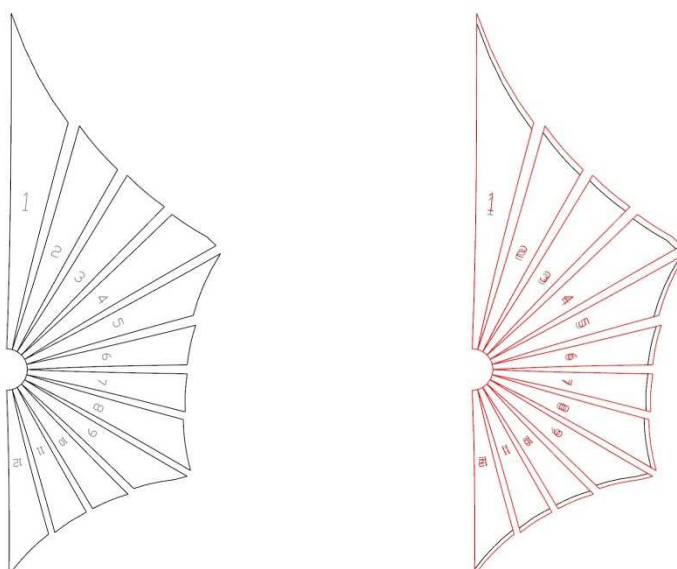
Preverili smo kritično kombinacijo za notranje sile v kablji, t.j. kombinacijo s snegom (slika 5-23), upoštevali smo priporočni faktor 2,5. Kot je razvidno z zgornje slike, se kontrola ni izšla, saj koeficient varnosti v zgornjih dveh kablji pade pod mejo 2,5. Prerez kablov smo zato povečali na 12 mm. Ponovno smo pognali analizo za vse obtežne primere, vendar se rezultati niso bistveno razlikovali od zgoraj prikazanih, zato jih ne bomo prikazovali še enkrat. Kontrolji kablov je bilo v tem primeru zadoščeno, saj so faktorji varnosti v vseh kablji večji od 2,5 (slika 5-24).



Slika 5-24: Kontrola varnosti pri obtežbi s snegom pri povečanih dimenzijah kablov

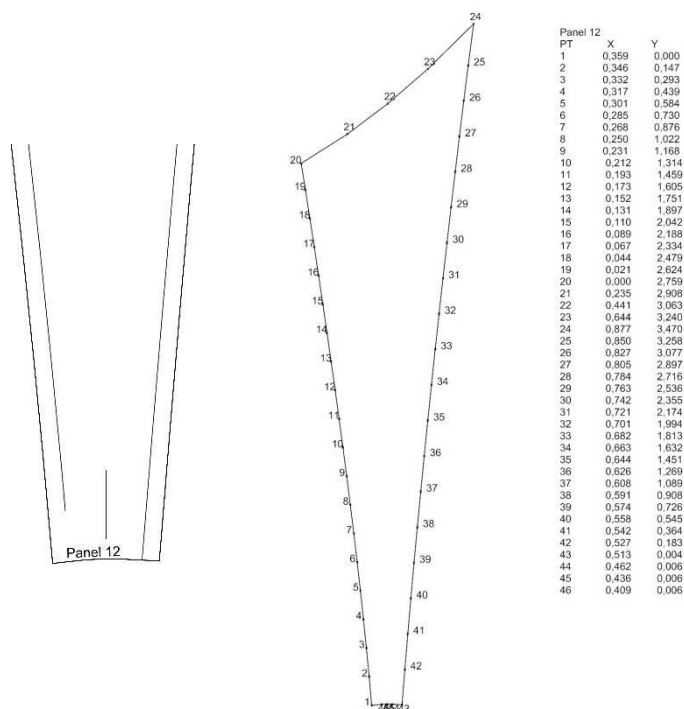
5.1.4 KROJENJE MEMBRANE

Največje napetosti se pojavijo v smeri od nateznega obroča proti robovom, zato smo v tej smeri tudi predvideli potek osnovnih niti in krojenje tkanine. Predvidevali smo, da bo PET/PVC tkanina dobavljiva v širini 4 m, torej kroji ne smejo biti širši od tega, možno pa bi bilo celo izdelati dva kroja v isti širini. Dežnik smo skrojili s pomočjo geodetk (slika 5-25 levo). Strižne deformacije niso bile presežene, gibale so se med 0 in 2% (mejne so pri 5%).



Slika 5-25: Kroji desne polovice membrane (levo) ter izvedba kompenzacije (desno), pri čemer rdeče linije predstavljajo kroje pred, črne pa kroje po kompenzaciji

Kroje je potrebno tudi kompenzirati, torej skrčiti, da je potem napeta membrana predvidene oblike. Vrednost kompenzacije v osnovni in votkovni smeri je bila ista, in sicer 3% (slika 5-25 desno). Dodali smo tudi rob za izvedbo spojev, torej varjenja, vodilno črto, ki označuje konec spoja, smer osnovnih niti, da bodo kroji na tkanini pravilno orientirani, ter označili kroje z zaporednimi številkami (slika 5-26 levo). Na koncu smo izrisali načrt kroja za ročni razrez, t.j. v obliki x in y koordinat (slika 5-26 desno).



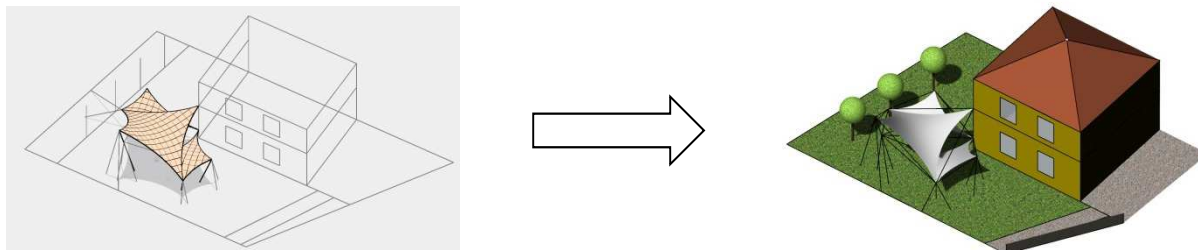
Slika 5-26: Detajl kroja z vodilno črto, smerjo osnovnih niti ter številčno oznako (levo) in načrt kroja za ročni razrez

5.1.5 GRADNJA

Najprej fiksiramo membrano na palično konstrukcijo, ki jo nosi jambor. Dvignemo jambor in ga fiksiramo s pomočjo stabilizacijskih kablov. Nato začnemo počasi spuščati natezni obroč k tlu, pri čemer moramo paziti, da pri tem ne pride do prevelikih koncentracij napetosti v okolici obroča, saj bi to lahko pripeljalo do pretrga konstrukcije. Tkanino v okolici nateznega obroča ojačamo z dodatno plastjo materiala, kot je bilo dimenzionirano.

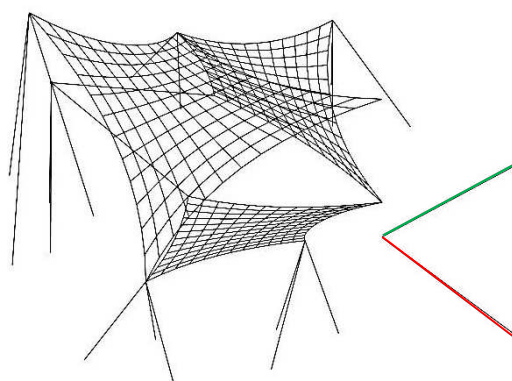
5.2 PRIMER 2: TRI JADRA

Zasnove konstrukcije nismo veliko spreminjali od idejne, glavna sprememba je bila, da smo na mesto, kjer se je konstrukcija prej vpenjala v tla, zdaj postavili jambor (slika 5-27). Dimenzije in oblika konstrukcije so se rahlo spreminjale med sproščanjem membrane (slika 5-28). Razmerje prednapetja je ostalo 1:1.



Slika 5-27: Od idejnega načrta do modela konstrukcije »Tri jadra«

Kasneje smo, ker smo imeli velike težave pri korektnem modeliranju konstrukcije, glavni jambor togo vpeli v tla pod nagibom. Tako smo ohranili obliko iz idejnega načrta, pri kateri se v isti jambor vpenjajo vsa tri jadra, pri izračunu notranjih sil pa smo ostali na varni strani.



Slika 5-28: Model membrane s podporno konstrukcijo

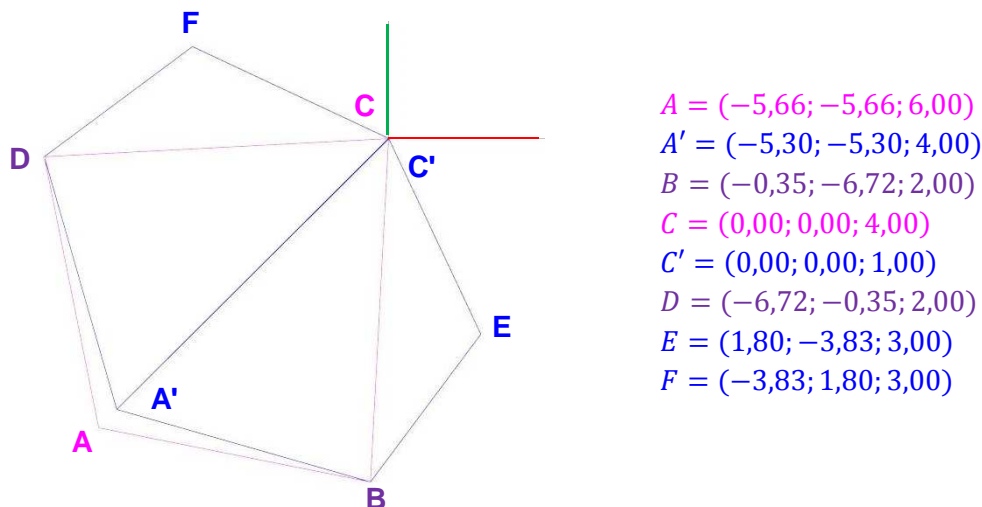
5.2.1 ISKANJE OBLIKE

Tako kot v predhodnem primeru »Dežnik« smo morali tudi v tem poiskati ravnovesno obliko membrane. Uporabili smo program MPanel.

Vhodni podatki

V nadaljevanju so predstavljeni vhodni podatki, ki smo jih potrebovali, preden smo lahko zmodelirali membrano ter jo sprostili, in sicer koordinate fiksnih točk (slika 5-29), prednapetje v membrani in napetosti v kablji ter gostota mreže.

Koordinate fiksnih točk



Slika 5-29: Skica in koordinate fiksnih točk, na kateri so elementi povezani s centralno membrano obarvani rožnato, elementi v povezavi s stranskima membrana modro ter skupne točke vijolično

Prednapetje membrane in napetosti v kablji

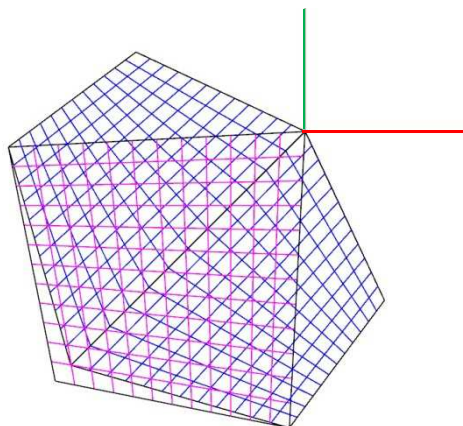
Koeficient prednapetja: $k_p = 1,0$

Koeficient napetosti v vseh kablji na obodu membran: $k_k = 1$

Togost povezovalnih kablov je 10, kar pomeni, da imamo nad končno dolžino povezovalnih kablov manjši nadzor. Če bi jim predpisali togost 100, bi programu dovoljevali, da v procesu iskanja oblike variira izrisano dolžino kablov za 1%. Torej se bi lahko v ravnovesni legi njihova dolžina od v začetku izrisane razlikovala za $\pm 1\%$. Z večanjem togosti se pogoj glede ohranjanja dolžine zaostre in obratno [24].

Gostota mreže

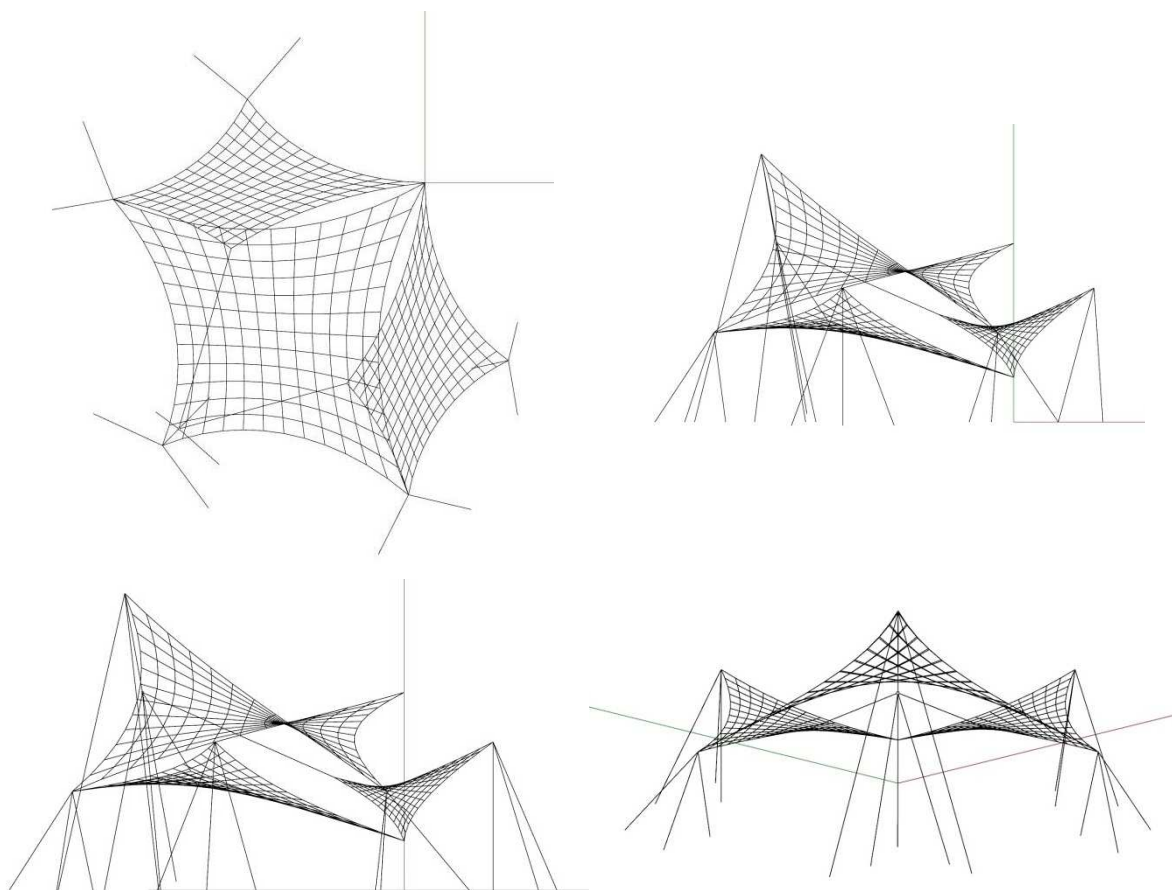
Model je sestavljen iz 3 mrež, ki medsebojno nista direktno povezani. Vsako smo v obeh smereh razdelili na 12 enako dolgih delov (slika 5-30).



Slika 5-30: Tloris še ne sproščenih mrež

Izhodni podatki

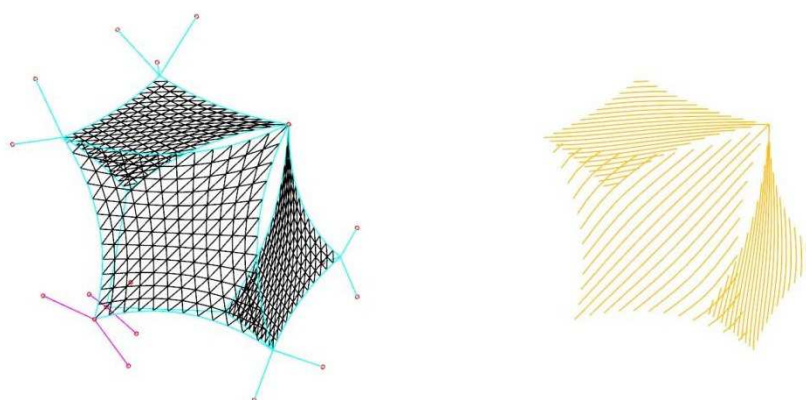
Glede na naše vhodne podatke nam program poišče ravnovesno obliko modela (slika 5-31). Rezidualna napaka po 250 iteracijah je bila manjša od 0,0001 pri vseh mrežah, torej je model dokončno sproščen in primerno zasnovan.



Slika 5-31: Tloris (levo zgoraj), frontalni pogled (desno zgoraj), pogled z desne (levo spodaj) ter pogled s sprednjega dela (desno spodaj) na sproščen model konstrukcije »Tri jadra«

5.2.2 STATIČNA ANALIZA

Kot smo že omenili, smo na koncu konstrukcijo modelirali tako, da je bil centralni steber togo vpet v podlago pod določenim kotom. Ostali jambori ter stabilizacijski kabli so bili modelirani kot elementi s podano togostjo ali začetno dolžino. Vse membrane so obdane z robnimi kabli. Smer osnovnih niti poteka v centralnem jadru v pričakovani smeri največjih napetosti, v stranskih pa pravokotno na pričakovano smer največjih napetosti, saj sprememba smeri za vsako mrežo posebej v programu ni podprta (slika 5-32).



Slika 5-32: Pretvorba konstrukcije v končne elemente, robni kabli, podpore (levo) in smer koordinate x (desno)

Začetna izbira materialov

Pred začetkom analize smo podali lastnosti materialov, natančneje membrane, kablov ter stebrov. Izbrali smo PET/PVC membrano Ferrari Precontrain 702 T2 (Tip I), za katero smo uspeli pridobiti potrebne podatke [13].

$$E_x = E_y \cong 540 \text{ kN/m}$$

$$G = \frac{540 \text{ kN/m}}{10} = 54 \text{ kN/m}$$

$$\nu = 0,3$$

$$f_{ux} = f_{uy} = 60 \text{ kN/m}$$

Za kable na obodu membrane smo vzeli pridobljene vrednosti elastičnega modula za galvanizirane kable proizvajalca Nobles [32].

$$E = 166 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$$

Prerez obodnih kablov je 12 mm, izberemo kable proizvajalca Nobles (1x19) [32].

$$EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 \cdot 0,872 \text{ cm}^2 = 14475 \text{ kN}$$

Prerez kablov, ki vpenjata stranski jadri v glavni jambor, je 18 mm (1x19).

$$EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 \cdot 1,83 \text{ cm}^2 = 30378 \text{ kN}$$

Prerez stabilizacijskih kablov jamborov je 28 mm (1x37).

$$EA = 16600 \text{ kN/cm}^2 \cdot 4,91 \text{ cm}^2 = 81506 \text{ kN}$$

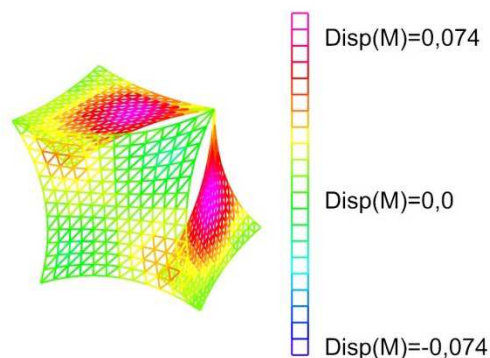
Za jambore izberemo cevi 216/10 in kvaliteto jekla S235 [33].

$$EA = 21000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 64,72 \text{ cm}^2 = 1359120 \text{ kN}$$

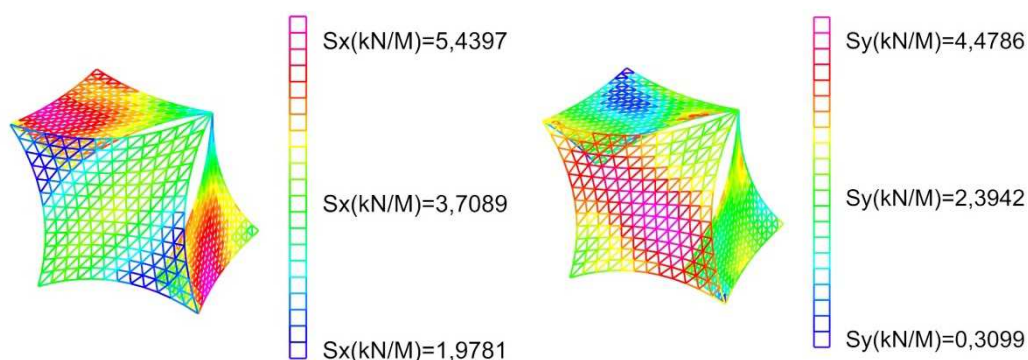
$$F_u = f_{yd} \cdot A = 23,5 \text{ kN/cm}^2 \cdot 64,72 \text{ cm}^2 = 1521 \text{ kN}$$

Stanje prednapetja

Na spodnjih slikah so prikazane napetosti v membrani in v kabljih v stanju prednapetja, ki je na koncu doseglo vrednost 3 kN/m v obeh smereh membrane. Vsa tri jadra so se ob vnosu prednapetja dodatno zravnila, največji pomiki znašajo 7,4 cm (slika 5-33).

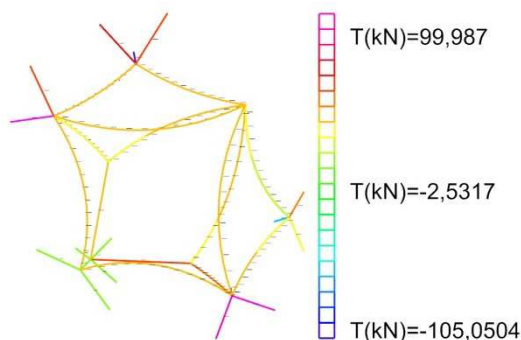


Slika 5-33: Pomiki membran v stanju prednapetja



Slika 5-34: Napetosti v membrani v stanju prednapetja v osnovni smeri (levo) in vtokovni (desno)

Največje napetosti v srednjem jadru se pojavijo v vtokovni smeri ($n_{yy,c,max} = 4,48\text{kN/m}$) in ne v osnovi ($n_{xx,c,max} \cong 4,00\text{kN/m}$), kot smo predvideli, vendar razlika ni velika. Pri stranskih jadrh so napetosti največje v osnovni smeri ($n_{xx,s,max} = 5,44\text{kN/m}$), ki smo jo predpostavili na začetku (slika 5-34).



Slika 5-35: Sile v kabljih v stanju prednapetja

Največje sile so se pojavile v stabilizacijskih kablh pri najbolj južnem jamboru z zgornje slike ($T_{stb,max} = 100\text{kN}$). Tudi obodni kabli imajo največje sile v okolici tega jambora ($T_{ob,max} = 26,19\text{kN}$). Sile v povezovalnih kablh, t.j. kablh, ki povezujejo stranski jadri z glavnim jamborom, sta enaki $T_{pov1} = 28,53\text{kN}$ in $T_{pov2} = 42,68\text{kN}$ (slika 5-35).

Obtežbe

Sneg

Ljubljana se nahaja v coni A2, na nadmorski višini približno 300 m, kar pomeni, da je vrednost obtežbe snega enaka $s_k = 1,51\text{kN/m}^2$ [26]. Razporedimo jo enakomerno po celotni konstrukciji, s tem da upoštevamo koeficient $\mu = 0,8$ [27].

$$s_1 = 0,8 \cdot 1,51\text{kN/m}^2 = 1,21\text{kN/m}^2$$

Veter

Gre za cono 1, teren kategorij II in povprečno višino konstrukcije 2 m. Osnovna hitrost vetra je torej $v_k = c_e \cdot q_b = 1,42 \cdot 0,25\text{kN/m}^2 = 0,36\text{kN/m}^2$ [28][29].

Upoštevamo le obtežbo vetra kot srka, enakomerno razporejenega po celotni površini, saj se je pri analizah predhodnih primerov izkazalo, da ni prišlo do bistvenih razlik pri obtežbi zaradi vpliva vetra, ki je bila razporejena glede na rezultate v vetrnem tunelu.

$$v_s = c_s \cdot v = -1,0 \cdot 0,36\text{kN/m}^2 = -0,36\text{kN/m}^2$$

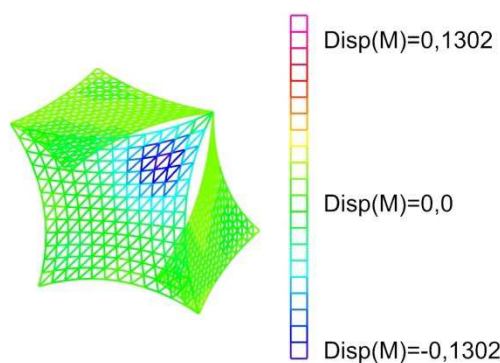
Obtežne kombinacije

Upoštevali smo karakteristične vrednosti vseh vplivov, pri kombinaciji snega z vetrom smo slednjega pomnožili z faktorjem ψ_0 po standardu SIST EN 1990. Faktor je enak 0,6 [31].

1. Prednapetje '+' sneg
2. Prednapetje '+' veter (srk)
3. Prednapetje '+' sneg + 0,6*veter (srk)

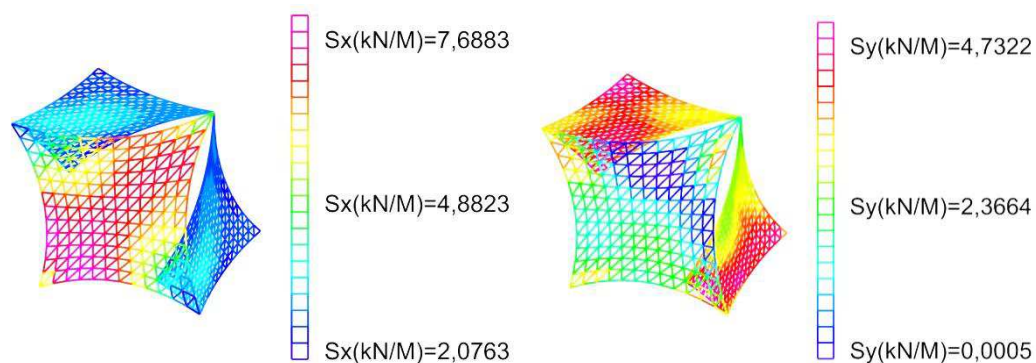
Rezultati analize

1. Prednapetje '+' sneg



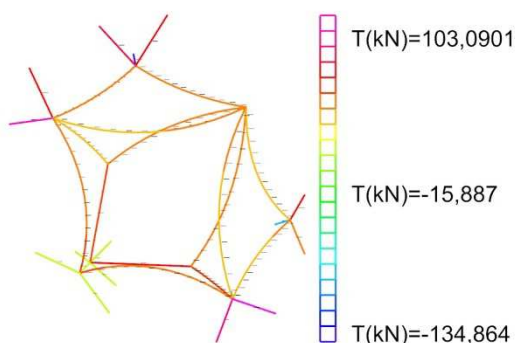
Slika 5-36: Premiki po nastopu obtežbe zaradi snega

Največji pomiki v konstrukciji po nastopu obtežbe zaradi vpliva snega znašajo -13 cm (slika 5-36).



Slika 5-37: Napetosti v osnovni (levo) in vtokovni smeri (desno)

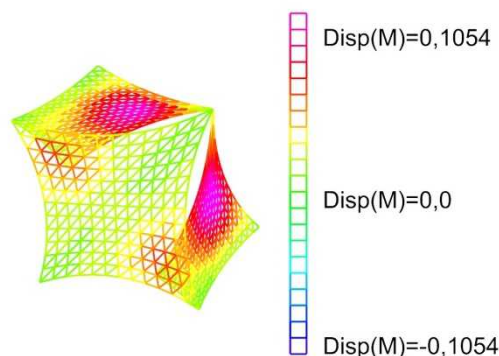
V srednjem jadrju se povečajo napetosti v osnovni smeri, saj je v tej smeri upognjeno navzdol, sedaj znašajo $n_{xx,c,max} = 7,69 \text{ kN/m}$. Napetosti v vtokovni smeri se zmanjšajo. V stranskih jadrju se napetosti v osnovni smeri zmanjšajo na približno 2 kN/m, v vtokovni pa zvišajo na skoraj 5 kN/m (slika 5-37).



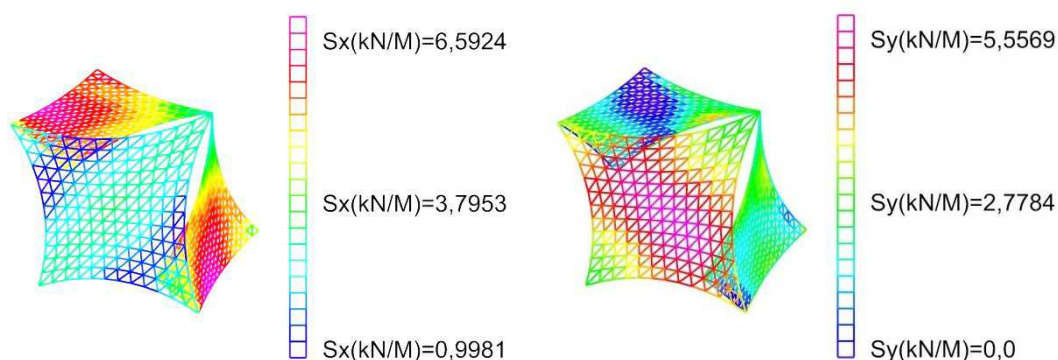
Slika 5-38: Sile v kablju

Največje sile se pojavijo v istih kablju kot pri prednapetju. Sedaj znašajo največje sile v obodnih kablju 43,38 kN, v povezovalnih 55,16 kN, v stabilizacijskih 103,09 kN in v jamborih 134,87 kN (slika 5-38).

2. Prednapetje '+' veter (srk)

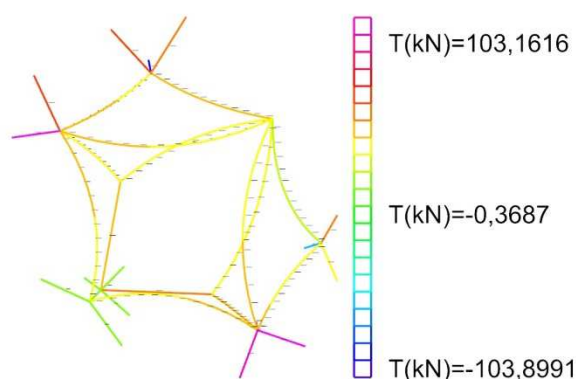


Slika 5-39: Premiki po nastopu obtežbe zaradi vpliva vetra



Slika 5-40: Napetosti v osnovni (levo) in vtokovni (desno) smeri pri obtežbi zaradi vpliva vetra

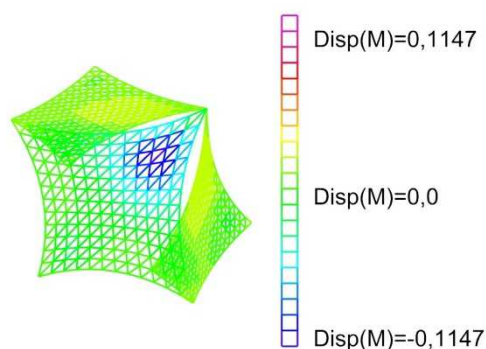
Povečajo se premiki v jadrih, ki so v osnovni smeri ukrivljena navzgor, torej v stranskih jadrih. Ti zdaj znašajo $w = 10,5\text{cm}$ (slika 5-39). V primeru obtežbe s srkom se zgodi ravno obratno, kot pri obtežbi s snegom – povečajo se napetosti v smereh navzgor obrnjenih lokov. Maksimalne napetosti so v osnovni smeri v stranskih jadrih, in sicer $n_{xx,s,max} = 6,59\text{kN/m}$, v vtokovni smeri v srednjem jadru pa $n_{yy,c,max} = 5,56\text{kN/m}$ (slika 5-40).



Slika 5-41: Sile v kablilih

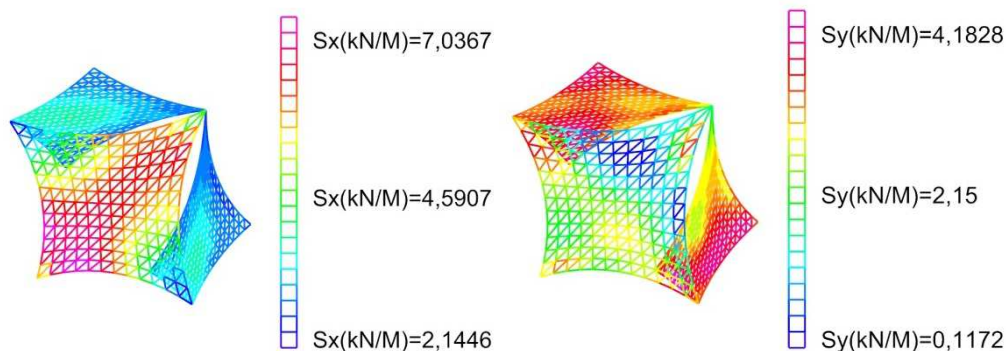
Sile v kablilih se povečajo le v tistih, ki držijo konstrukcijo k tlom, t.j. v stabilizacijskih kablilih spodnjega jambora in najbolj zahodnega. Največje sile v teh kablilih sedaj znašajo $T_{max} = 103,16\text{kN}$ (slika 5-41).

3. Prednapetje '+' sneg '+' 0,6 · veter (srk)



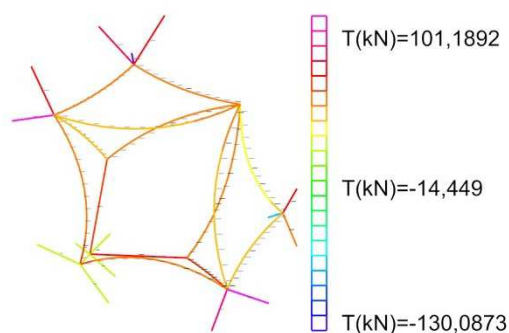
Slika 5-42: Deformirana oblika

Po pričakovanjih se konstrukcija na tako obtežbo odzove podobno kot na kombinacijo obtežbe, pri kateri nastopa le sneg. Maksimalni pomiki so se v primerjavi s 1. obtežnim primerom nekoliko zmanjšali in znašajo 11 cm (slika 5-42).



Slika 5-43: Napetosti v osnovni (levo) in votkovni smeri (desno) pri obtežbi zaradi kombinacije vplivov snega in vetra

V osnovni in votkovni smeri so se napetosti malce zmanjšale v primerjavi s 1. obtežnim primerom, kar je razumljivo, saj tukaj nastopa tudi manjši delež srka, ki ublaži obremenitve zaradi vpliva snega (slika 5-43). Podobno je s silami v kabljih, te se od prvega obtežnega primera le malce zmanjšajo (slika 5-44).



Slika 5-44: Sile v kabljih pri obtežbi zaradi kombinacije vplivov snega in vetra

Skupaj

V naslednji preglednici (preglednica 5-2) so zbrani vsi rezultati obtežnih kombinacij obravnavanih pri statični analizi konstrukcije, ki so potrebni za nadaljnjo obdelavo, t.j. dimenzioniranje konstrukcije.

Preglednica 5-2: Največje napetosti v membrani in sile v kablji pri obravnavanih obtežnih kombinacijah v primeru konstrukcije »Tri jadra«

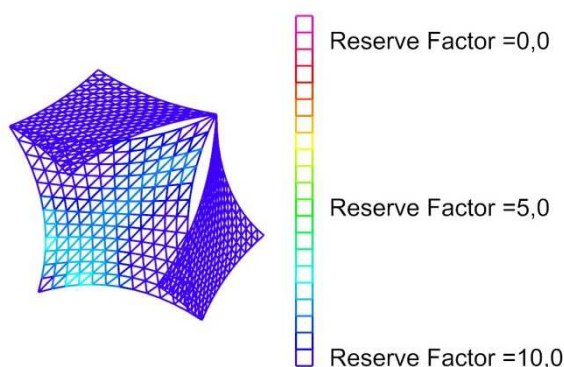
Obtežna kombinacija	Osnovna smer $n_{xx,max}$ [kN/m]	Votkovna smer $n_{yy,max}$ [kN/m]	Obodni kabli	Povezovalna kabela	Stabilizacijski kabli	Jambori
	Membrana		Osne sile T_{max} [kN]			
Prednap. '+' sneg	7,69	4,73	43,38	55,16	103,09	-134,87
Prednap. '+' veter (srk)	6,59	5,56	33,61	38,85	103,16	-103,90
Prednap. '+' sneg '+' 0,6 · veter y	7,04	4,18	41,32	52,39	101,19	-130,09

Lokalno povzroča na membrani največje obremenitve obtežba zaradi vpliva snega. Tudi v obodnih in povezovalnih kablji ter jamborih največje sile nastopijo ob prvem obtežnem primeru, medtem ko je za stabilizacijske kable najbolj neugodna obtežba zaradi vpliva vetra.

5.2.3 DIMENZIONIRANJE

Membrana

Glede varnosti smo preverili obtežni primer s snegom, pri čemer se je izkazalo, da izbrani material membrane zadošča po celotni membrani (slika 5-45). Ugotovitev smo potrdili z računom.



Slika 5-45: Kontrola varnosti pri kritični obtežbi zaradi snega

$$n_{xx,max} = 7,69 \text{ kN/m} < \frac{f_{ux}}{5} = \frac{60 \text{ kN/m}}{5} = 12 \text{ kN/m}$$

Kabli in jambori

Preverili smo nosilnost kablov in jamborov, pri čemer smo upoštevali priporočeni varnostni faktor 2,5. Centralni jambor, ki je v tla togo vpet in na katerega se vpenjajo vse tri membrane, tukaj ni bil dimenzioniran.

Obodni kabli

$$T_{Ed,ob,max} = 43,38\text{kN} \cdot 2,5 = 108,45\text{kN} < T_{Rd,ob} = 126\text{kN}$$

Povezovalna kabla

$$T_{Ed,pov,max} = 55,16\text{kN} \cdot 2,5 = 137,9\text{kN} < T_{Rd,pov} = 265\text{kN}$$

Stabilizacijski kabli

$$T_{Ed,stb,max} = 103,16\text{kN} \cdot 2,5 = 257,9\text{kN} < T_{Rd,stb} = 713\text{kN}$$

Jambora

$$T_{Ed,jam,max} = 134,87\text{kN} \cdot 1,5 = 202,3\text{kN}$$

$$A = 64,72\text{cm}^2$$

$$i = 7,292\text{cm}$$

$$l_u = 3,00\text{m}$$

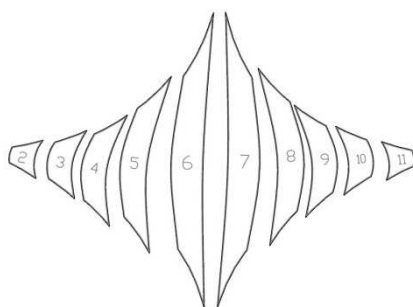
$$\lambda = \frac{300}{7,292 \cdot 93,9 \cdot 1,0} = 0,438$$

$$\chi = 0,94 \text{ (uklonska krivulja a)}$$

$$F_{Ed} = 202,3\text{kN} \leq F_{Rd} = 0,94 \cdot 64,72 \cdot \frac{23,5}{1,0} = 1430\text{kN}$$

5.2.4 KROJENJE MEMBRANE

Največje napetosti se pojavijo v smeri največjih ukrivljenosti, zato smo v tej smeri predvideli potek osnovnih niti in krojenje tkanine. Krojili smo le eno izmed jader, postopek krojenja drugih dveh je identičen. Izbrana PET/PVC tkanina je dobavljiva v širini 1,78 m, torej kroji ne bi smeli biti širši. Strižne deformacije niso bile presežene, gibale so se med 0 in 2% (mejne so pri 5%). Ta način krojenja morda ni najbolj ekonomičen, saj so ukrivljenosti robov krojev zelo velike, kar za sabo prinese težavnejšo izvedbo in veliko odpadnega materiala (slika 5-46).



Slika 5-46: Krojne pole centralnega sedla z izvedeno kompenzacijo

Vrednost kompenzacije v osnovni in vtokovni smeri je bila ista, ker je tudi koeficient prednapetja 1:1, in sicer 3%. Pripravili smo načrte kroja za kontrolo razreza (slika 5-47).



Slika 5-47: Izris za razrez enega izmed krojev (levo) in njegova povečava (desno)

5.2.5 GRADNJA

Najprej vpnemo tekstil med pripravljene ogliščne detajle, potem pa počasi dvigamo jambore v končno lego. Paziti je potrebno na enakomerno hitrost in usklajenost dviganja vseh jamborov, saj je srednji veliko višji od ostalih in zato lahko pride do neenakomernega prednapetja v sredinskem jadrju. Na koncu preverimo geometrijo in prednapetje v membranah.

5.3 KOMENTAR

Ob statični analizi dveh primerov prednapetih membran smo spoznali postopek načrtovanja takih konstrukcij in uporabo računalniških orodij, ki so nam bila na voljo za ta namen (MPanel in MPanel FEA).

Pri modeliranju izbranih idejnih zasnov in iskanju oblike smo naleteli na veliko zapletov, saj se princip modeliranja z uporabljenim programom zelo razlikuje od poznanih. Poleg tega se metoda izračuna ravnovesne lege mreže, ki predstavlja membrano, razlikuje od tiste, ki jo uporablja program, v katerem smo izdelali idejne načrte. Končni modeli so se tako nekoliko razlikovali od tistih, ki smo si jih zamislili v idejni fazi, v obeh primerih je bila spremenjena tudi podporna konstrukcija.

Med statično analizo smo lahko potrdili pričakovane odzive konstrukcij. Ob obtežbi zaradi snega so se navzdol stoječi lokovi nekoliko spustili, notranje napetosti v njihovi smeri pa so se povečale. Nasprotno so se v smereh navzgor stoječih lokov pri obtežbi zaradi snega napetosti zmanjšale. Povečale so se notranje sile v jamborih, ki podpirajo višje točke membrane. Pri obtežbi zaradi vpliva vetra oz. natančneje srka so se napetosti povečale v smeri navzgor stoječih lokov, zmanjšale pa v drugi smeri. V tlačnih elementih so se sile nekoliko zmanjšale, saj taka obtežba dviguje konstrukcijo. Posebnost pri konični konstrukciji so bili vrhovi napetosti v okolici nateznega obroča. Te smo pokrili z dodatno plastjo tkanine na teh mestih.

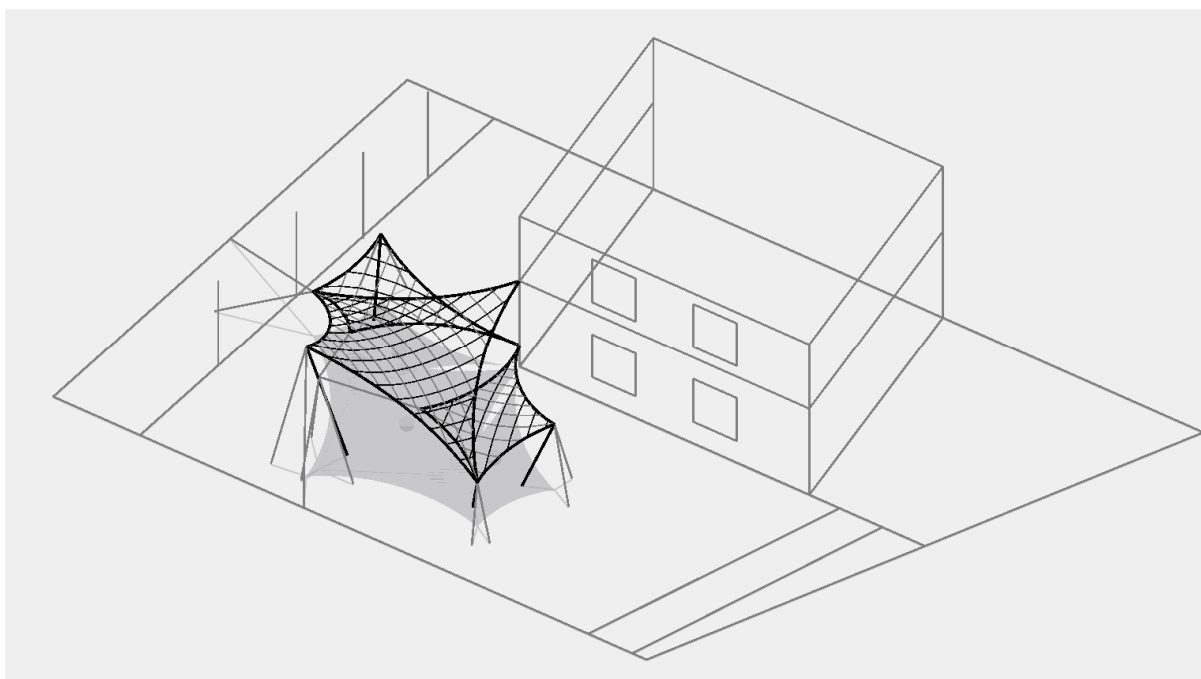
Pri dimenzioniranju tkanine, kablov in podpornih elementov smo upoštevali priporočene faktorje. V primeru konične konstrukcije je bilo potrebno povečati dimenzije robnih kablov, kar je zahtevalo ponoven preračun statike konstrukcije.

Ker dvojno ukrivljenih ploskev, kot so naši primeri prenapetih membran, ne moremo izdelati iz ravnih ploskev, smo morali obliko projicirati na površino, jo rahlo popačiti in razrezati na kroje. Ko te privarimo skupaj, ustvarijo želeno obliko. Izvedli smo tudi kompenzacijo, poleg tega smo dodali robove za varjenje ter označili vsak kraj. Na koncu smo tudi opisali predviden način gradnje konstrukcije.

Iz rezultatov analiz smo izbrali primer, ki smo ga podrobneje obravnavali v naslednjem poglavju. Lahko smo tudi ocenili predvideno prednapetje ter kvaliteto in dimenzije elementov konstrukcije. Poleg tega smo na podlagi teh analiz tudi izboljšali zasnovo konstrukcije.

6 PROJEKT IZBRANE REŠITVE

Izmed predstavljenih idejnih načrtov smo za izdelavo projekta za gradbeno dovoljenje in končno postavitve izbrali konstrukcijo z imenom »Tri jadra«. Ta med predstavljenimi oblikami pokrije sorazmeroma veliko površino glede na porabo tkanine za membrano in ceno celotne konstrukcije. Poleg tega je med lažjimi za postavitev, saj njeno napenjanje poteka točkovno, preko robov, in nima velikega števila stebrov, ki bi zahtevali obsežno betoniranje temeljev. Njena oblika je, glede na zahteve, primerna, dosežena je v sodelovanju z arhitektom in je med predstavljenimi tudi med najbolj izvirnimi. Pri profesorjih in študentih, ki jim je bila predstavljena, je doživela pozitiven odziv, iz česar sklepamo, da njena postavitev ne bi bila moteča.



Slika 6-1: Skica izbrane konstrukcije »Tri jadra«

Vse faze načrtovanja so pri prednapetih membranah tesno povezane med sabo, zato je potrebnih veliko iterativnih postopkov, ki vse do konca spreminjajo osnovno obliko membrane ter podpornih elementov. Geometrijske spremembe, ki so nastale med projektiranjem, so podrobno predstavljene v poročilu, tako kot postopki in standardi, ki smo jih med načrtovanjem upoštevali.

6.1 ZASNOVA

Izhodišče arhitektonske zasnove konstrukcije je podrobneje predstavljeno v poglavju 4.6 Idejni načrti. Glede na rezultate iskanja oblike in preliminarnih analiz smo se že na začetku odločili za nekaj sprememb v zasnovi, ki so prispevale k boljšemu obnašanju konstrukcije, enostavnosti izdelave ter njeni praktičnosti.

Togo vpeti stebri

V fazi idejne zasnove so bili v vseh kotih predvideni členkasto vpeti stebri s po dvema stabilizacijskima kabloma, na enem pa je bilo predvideno sidranje. Čeprav so za prenapete

membrane bolj primerne omenjene podporne konstrukcije, saj znižujejo raven napetosti v tkanini, zmanjšujejo dimenzije podporne konstrukcije ter zahtevajo manjše betonske temelje, pa je število kablov glede na tlorisno površino veliko in bi ti predstavljali oviro pri gibanju v okolici nadstreška. Iz teh razlogov smo se pri končni verziji odločili za togo vpete stebre, ki bodo podpirali vsa oglišča membran, ki niso vpeta v obstoječi objekt.

Vpenjanje in oblika stranskih jader

Velika dolžina kablov, ki napenjajo stranski jadri in ju povezujejo s centralnim stebrom, zahteva večje prednapenjanje povezovalnih kablov, saj je razdalja med elementom podporne konstrukcije in tkanino velika. Poleg tega smo iz preliminarnih analiz ugotovili, da je ravnovesna lega, ki jo dobimo pri iskanju oblike s programom MPanel ob upoštevanju veznih kablov, neugodna za prenos obtežbe zaradi velike razlike v glavnih radijih membrane. Hkrati osenči manjši prostor od predvidenega v idejni fazi, trpi pa tudi estetika celotne konstrukcije. Program FormFinder, s pomočjo katerega smo izdelali začetne zasnove, omenjenih povezav ne upošteva, ravnovesno lego izračuna zgolj na podlagi podanih robov membrane. Iz naštetih razlogov smo stranski jadri povečali tako, da smo ju vpeli direktno v centralni, torej najvišji stebel, ki podpira osrednjo membrano. Oblika sedel bo tako bolj ugodna, izdatneje pa bosta tudi prispevali k senčenju.

Koordinate fiksnih točk

Zaradi spremembe zasnove podporne konstrukcije in vpenjanja stranskih sedel smo morali nekoliko spremeniti tudi tlorisne dimenzije konstrukcije, vendar smo pazili, da so te v čim večji meri sovpadale s predvidenimi. Vse stebre smo postavili vertikalno ob povečanju dimenzij stranskih jader. Posledično se bo nekoliko spremenila tudi oblika centralnega sedla. Stranski stebri, ki so v isti točki ponujali podporo tako stranskim jadrom kot centralnemu, bodo zdaj obremenjeni v dveh točkah, saj smo spustili točko vpenjanja stranskim sedlom. V nasprotnem primeru bi namreč prišlo do dotikanja tkanin, kar bi povzročilo drugačne obremenitve membran in posledično drugačno napetostno stanje v njih. To bi lahko pripeljalo tudi do porušitve tkanine.

6.2 ISKANJE OBLIKE

Ravnovesno lego membran smo, kot je bilo že omenjeno, iskali s pomočjo programa za modeliranje prednapetih membran in pnevmatskih konstrukcij ter njihovo krojenje MPanel. Iskanje oblike s pomočjo računalniškega programa v splošnem poteka v treh fazah, in sicer prvo predstavlja definiranje fiksnih točk, drugo izris povezovalnih kablov in mreže v nesproščenem stanju in tretjo relaksacija konstrukcije v skladu s podanimi parametri.

S primerno programsko opremo je iskanje oblike prednapete membrane dokaj enostavno, vendar ta prav tako enostavno proizvede rezultate, ki so na ekranu prepričljivi, v praksi pa imajo veliko napak. Večinoma je tako zaradi nepravilno specificiranih parametrov in pomanjkanja ukrivljenosti membrane [11]. Torej nam računalniški pripomočki nikakor ne morejo nadomestiti znanja, ki je potrebno za pravilno in učinkovito projektiranje prednapetih membran.

Koordinate fiksnih točk ter modeliranje elementov podpore konstrukcije

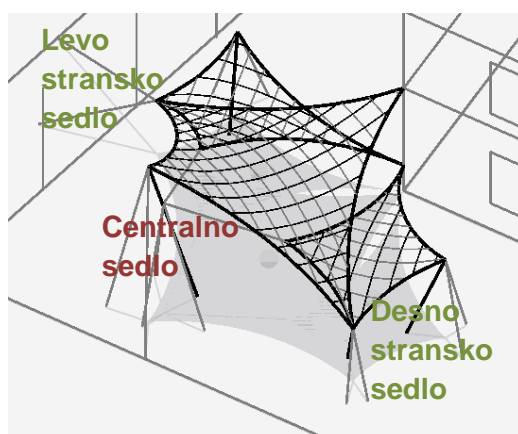
Program MPanel kot vhodne podatke za nadaljnje iskanje oblike zazna tri različne grafične vnose:

- mrežo (angl. mesh), ki predstavlja površino za relaksacijo in se jo ustvari s pomočjo enega izmed orodij v programu,
- tri-dimenzionalno lomljeno črto (angl. 3D polyline), ki definira fiksne točke med relaksacijo kot so točke sidranja, vrhovi jamborov in togi robovi, ter
- črto (angl. line), ki predstavlja povezave kot so palice, jambori in deli kablov [24].

Naj poudarimo, da morajo črte vsebovati natanko 2 točki, eno na začetku in eno na koncu, medtem ko so lomljenke sestavljene iz več kot dveh točk, torej najmanj treh. To je pomembno pri definiranju fiksnih točk, še posebej vrhov konzolno vpetih stebrov. Vozliščem črt in mrež, ki so povezane s točko na lomljenki, so med relaksacijo onemogočeni premiki v vseh treh smereh koordinatnega sistema, medtem ko jim je dovoljena rotacija v vseh smereh. Z drugimi besedami, vozlišča lomljenk predstavljajo členkaste podpore. Iz povedanega sledi, da moramo za modeliranje konzolno vpetih stebrov uporabiti lomljenke s prvo točko na dnu stebra, drugo na vrhu in tretjo zopet na dnu. Črtam, ki predstavljajo različne povezave v konstrukciji, je omogočeno prosto premikanje in sukanje okoli vseh koordinatnih osi, v kolikor niso povezane z vozlišči lomljenih črt, isto velja za vozlišča na mrežah.

Najprej smo torej definirali fiksne točke konstrukcije s pomočjo lomljenk, vsaka od njih pripada enemu izmed sedel. Nato smo dodali konzolno vpete stebre, nekateri med njimi podpirajo dve mreži.

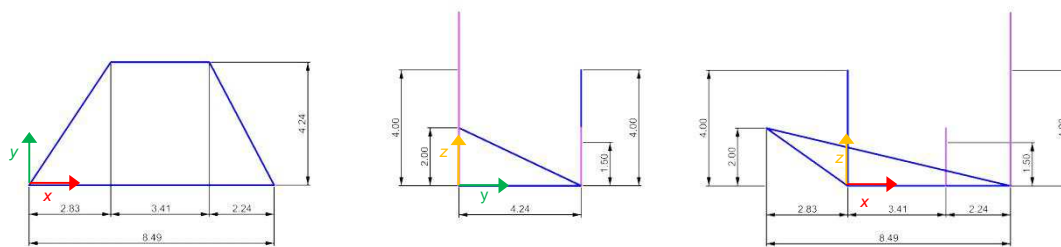
Konstrukcijo sestavljajo, kot je razvidno iz idejne skice, tri sedla, centralno ter levo in desno (slika 6-2). Celotna struktura je simetrična glede na ravnino, ki jo definira linija preko višjih točk centralnega sedla ter koordinata v smeri gravitacijskega pospeška.



Slika 6-2: Poimenovanje sedel

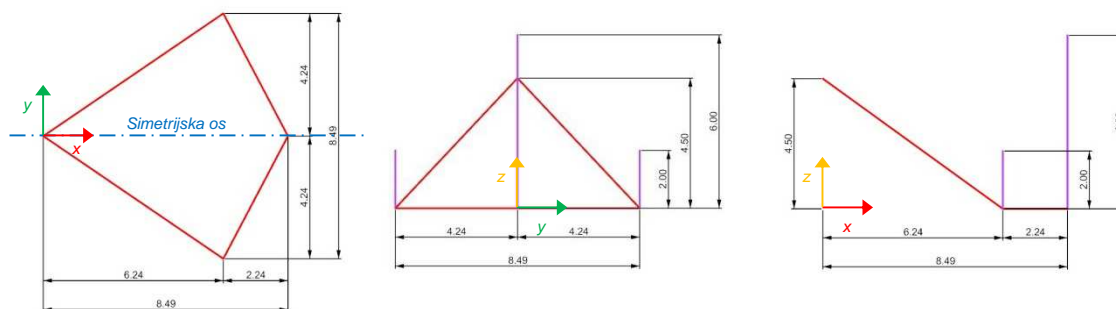
Levo in desno sedlo sta torej enaka, zgolj zrcaljena, zato smo v nadaljevanju predstavili fiksne točke le enega izmed stranskih sedel, in sicer desnega (slika 6-3). V tlorisu stransko sedlo oriše polovica skoraj pravih šestkotnika. Iz narisa je razviden dvig levega vozlišča osnovne lomljenke, ki predstavlja točko vpetja v stavbo. Na skrajni desni je postavljen stebel, v katerega bo stransko sedlo vpeto na višini 4 m. Od tega, centralnega stebra, je proti levi na

oddaljenosti 2,24 m postavljen steber, na katerem bo jadro vpeto na višini 1,5 m, od stavbe proti desni pa je na dolžini 2,83 m steber z višino 4 m.



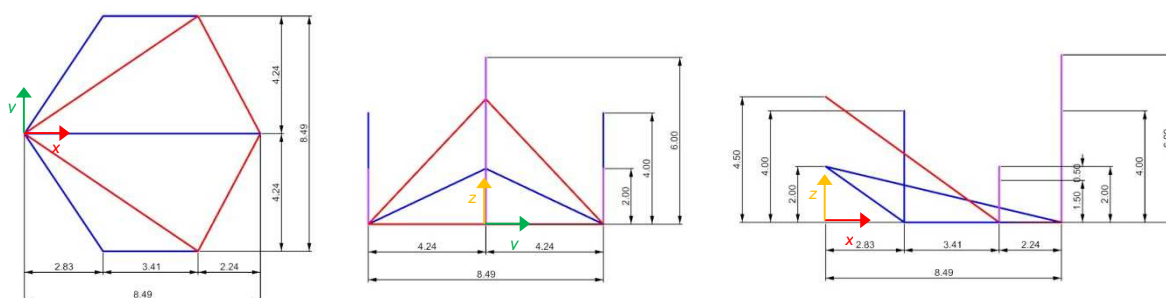
Slika 6-3: Tloris, stranski ris in naris fiksnih točk desnega sedla z dimenzijami (merilo 1:200)

Centralno sedlo je definirano z deltoidom dolžine in širine 8,5m, simetričen je glede na os, ki na tlorisni sliki teče vodoravno skozi sredino širine. Diagonala, pravokotna na prej omenjeno os, je rahlo zamaknjena v desno, tako da sta stranska stebra od centralnega oddaljena 2,24 m. Najvišji, sredinski steber je visok 6 m, na nasprotni strani pa bo sedlo vpeto v objekt na višini 4,5 m (slika 6-4).



Slika 6-4: Tloris, stranski ris in naris fiksnih točk centralnega sedla z dimenzijami (merilo 1:200)

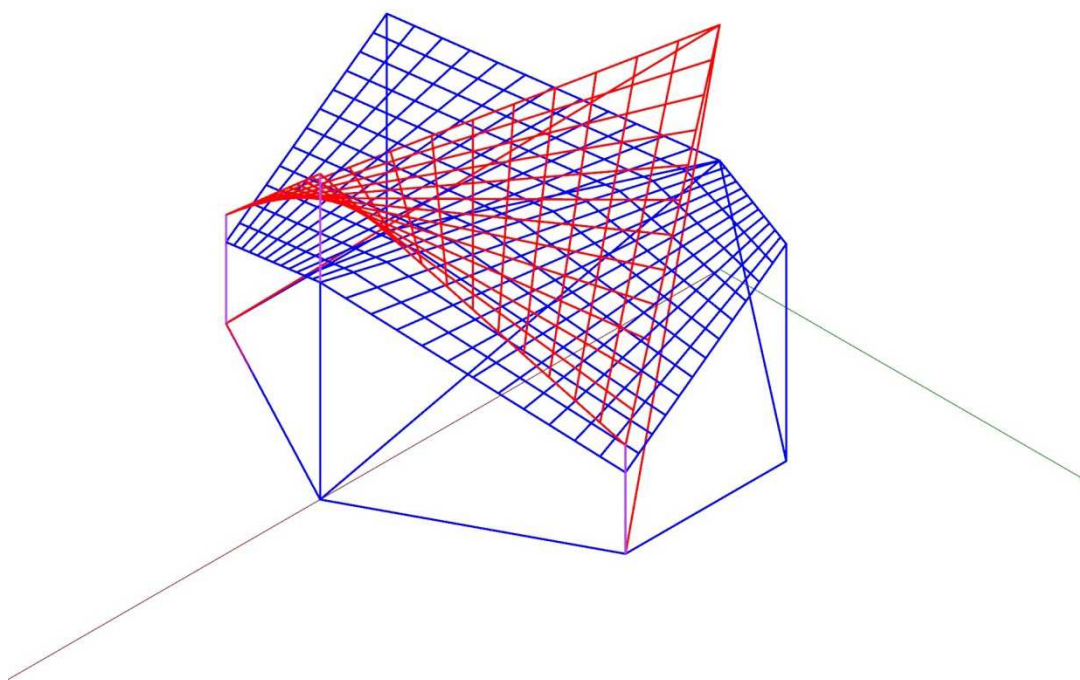
Na sliki 6-5 so predstavljene lomljene črte, katerih vozlišča predstavljajo fiksne točke vseh treh sedel. Za lažjo predstavbo so črte, ki so povezane s centralnim sedlom, obarvane rdeče, črte, ki so povezane s stranskimi, modro ter črte, ki so pomembne za vsa sedla, vijolično. Na tlorisu lahko vidimo, da vsi trije stebri, ki nosijo srednje jadro, podpirajo tudi ostali dve, le na različnih višinah. Centralni steber tako sredinsko sedlo podpira na višini 6 m, ostala dva pa na 4 m, spodnja desni in levi steber, če gledamo od osrednjega stebra proti obstoječi stavbi, pa vpenjata centralno sedlo na višini 2 m ter stranski na 1,5 m.



Slika 6-5: Tloris, stranski ris in naris fiksnih točk centralnega (rdeča) in stranskih (modra) sedel ter skupne fiksne točke (vijolična) (merilo 1:200)

Modeliranje membran

Na predstavljene fiksne točke smo nato vpeli mrežo z orodjem, ki ga ponuja MPanel, in sicer z vnašanjem kotov membrane (slika 6-6). Vse tri mreže so v obeh smereh razdeljene na 12 enakih delov, torej je število črt, ki ga podamo programu pred risanjem mrež, v eni in drugi smeri enako $M_{sur} = N_{sur} = 13$. Tudi v tem primeru je centralno sedlo obarvano rdeče, stranski pa modro. Daljših kablov ter palic, ki bi pomembno vplivali na iskanje oblike sedel, v zasnovi konstrukcije ni predvidenih.



Slika 6-6: Mreže, povezane s svojimi fiksnimi točkami (merilo 1:100)

Relaksacija mrež

Relaksacija mreže s programom MPanel poteka z algoritmom konstantnih napetosti (angl. constant stress algorithm – CSA), ki daje približno iste rezultate, kot bi jih dobili pri eksperimentalnem iskanju oblike s pomočjo milnice [24].

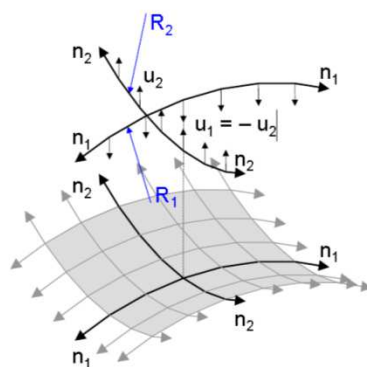
Rezultati iskanja oblike prednapete membrane s pomočjo računalniških programov so v veliki meri odvisni od metode in algoritmov, ki jih program uporablja, tako se nam lahko zgodi, da nam isti vhodni podatki ne bodo dali istih rešitev pri uporabi različnih programskih orodij. Iz povedanega sledi, da je pomembno poznavanje metod in lastnosti, po katerih programi delujejo.

Algoritem konstantnih napetosti (CSA)

Algoritem torej daje približno iste rezultate, kot bi jih dobili pri eksperimentalnem iskanju oblike s pomočjo milnice, z drugimi besedami išče obliko, pri kateri so vse napetosti v vsaki točki na membrani v obeh smereh med sabo enake. To lahko ponazorimo z enačbo

$$\frac{n_1}{R_1} - \frac{n_2}{R_2} = H = 0$$

pri čemer n_1 in n_2 predstavljata napetosti v glavnih smereh, R_1 in R_2 absolutni vrednosti glavnih radijev ukrivljenosti ter H površinsko napetost, ki je v primeru milnice enaka 0. Ker je membrana dvojno ukrivljena, glavna radija kažeta v nasprotnih smereh, torej je eden od njiju pozitiven, drugi pa negativen, kar rezultira v negativni predznak drugega člena enačbe. Vsi parametri so predstavljeni tudi na spodnji sliki (slika 6-7).



Slika 6-7: Napetosti (n_1 in n_2), glavni radiji (R_1 in R_2) ter pomiki (u_1 in u_2) dvojno ukrivljene membrane

Če torej upoštevamo lastnosti milnice, pri kateri so napetosti v obeh glavnih smereh enake ($n_1 = n_2$), lahko zgornjo enačbo zapišemo kot

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = 0$$

torej je vsota glavnih ukrivljenosti (ti sta različnega predznaka) enaka 0 [11]. Ker se milnica tako kot vsi ostali naravni sistemi stabilizira v minimalnem energijskem stanju, ustvarja minimalne površine [11]. Ta lastnost izhaja iz dejstva, da je milnica sestavljena iz dveh plasti negativno nabitih ionov, ki se postavijo tako, da njihove glave gledajo proti tekočini, repi pa proti plinu [11]. Najmanjša energija, ki je potrebna, da se obe plasti ionov postavita v tanek film, tako zahteva, da se plasti postavita v obliko minimalne površine med danimi robovi.

Približno takšni so tudi principi algoritma, ki ga uporablja omenjeni program. Vsaki niti v mreži pripiše nateg, tako da ta lahko predstavlja membrano v njeni okolici. Med relaksacijo se vsako vozlišče pomakne v ravnovesno lego skupaj z nitmi, ki so nanj pripete [24]. Nateg v njih je izračunan glede na širino sosednjih celic [24], torej širše kot so celice, manjše so natezne napetosti na meter membrane. Sile v nitih, ki predstavljajo votkovno smer, so modificirane glede na koeficient napetosti v osnovni in votkovni smeri, ki ga pred relaksacijo podamo [24]. Naj poudarimo, da gre za postopek prilagajanja oblike membrane njenim notranjim napetostim, ta dva parametra pa sta odvisna med seboj, torej so za pridobitev ravnovesne lege potrebni iterativni postopki izračuna. V omenjenem programu se napetosti v nitih posodobijo pri vsaki 10. iteraciji oblike, kar je po besedah avtorjev dovolj, da te sledijo spremembam oblike mreže [24].

Oblika membrane pri relaksaciji je nadzirana preko koeficienta napetosti v osnovni in vtokovni smeri. Pri večini osnovnih oblik je ta enak ali blizu 1,0, največje oziroma najmanjše vrednosti dosega pri koničnih konstrukcijah, od 0,33 do 0,66, vendar je v teh primerih potrebno paziti, da lahko tkanina take napetosti tudi v realnosti prevzame. V splošnem se uporablja koeficiente od 0,25 do 4,0. Za doseg želenih oblik lahko uporabimo tudi možnost spremenljivih napetosti v osnovni smeri, kar je posebej primerno za konične oblike z majhnimi vrhnjimi obroči, saj tako povečamo nateg v nitih v njegovi bližini, kjer so si sicer te zelo blizu skupaj [24].

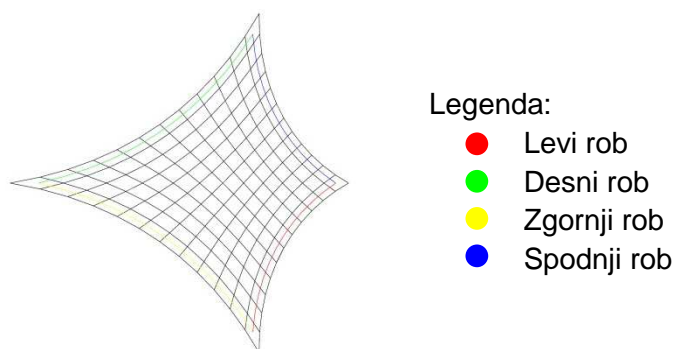
Nateg v nitih, ki predstavljajo kable, je odvisen od dolžine kabla. Ostale črte, ki predstavljajo bodisi toge bodisi fleksibilne povezave, imajo predpisano togost ali nateg. Toge povezave (angl. guy) imajo definirano togost tako, da vrednost 100 pomeni spremembo dolžine za 1%, kabelske povezave (angl. cable) pa imajo predpisano natezno silo, ki je povprečje natega v osnovni smeri, pomnoženo z izbranim koeficientom [24].

V programu imamo tri možnosti za relaksacijo modelov glede na vrsto robov, ki jih želimo imeti. Te možnosti so:

- **togi robovi**, pri kateri se vsi robovi mreže pritrdijo na lomljenko, ki jih definira,
- **robovi s kablji**, pri kateri vsi robovi vsebujejo kable, ter
- **združeni robovi**, ki se jih uporablja, ko hočemo obliko konstrukcije sestaviti iz več mrež, na ostalih robovih pa so postavljeni kablji [24].

Model moramo relaksirati toliko časa, dokler napaka ne pade pod 0,0001, torej so iteracije konvergirale proti rešitvi, ki je zadovoljivo natančna. Program nam o tej vrednosti tudi poroča.

Poleg že omenjenega je potrebno paziti na smer poteka osnovnih niti, katerih smer je predpostavljena z orientacijo mreže. Osnovne niti potekajo od dna k vrhu mreže, od desne proti levi pa vtokovne niti, zato moramo paziti tudi pri orientaciji mreže (slika 6-8). Program ponuja še možnost diagonalno postavljenih niti, s katerimi lahko elegantno kontroliramo poves sedla [24].



Slika 6-8: Orientacija mreže in legenda

Kablom v mreži predpišemo določen koeficient, s katerim so pomnožene sile iz membrane. Izberemo lahko možnost enakih nategov v kablji na vseh straneh, če bomo v nadaljevanju uporabili detajle, ki omogočajo nadaljevanje kablov čez kot membrane. Priloženo je tudi računalno, s katerim lahko omenjeni koeficient izračunaš iz razmerja povesa kabla in njegove dolžine [24].

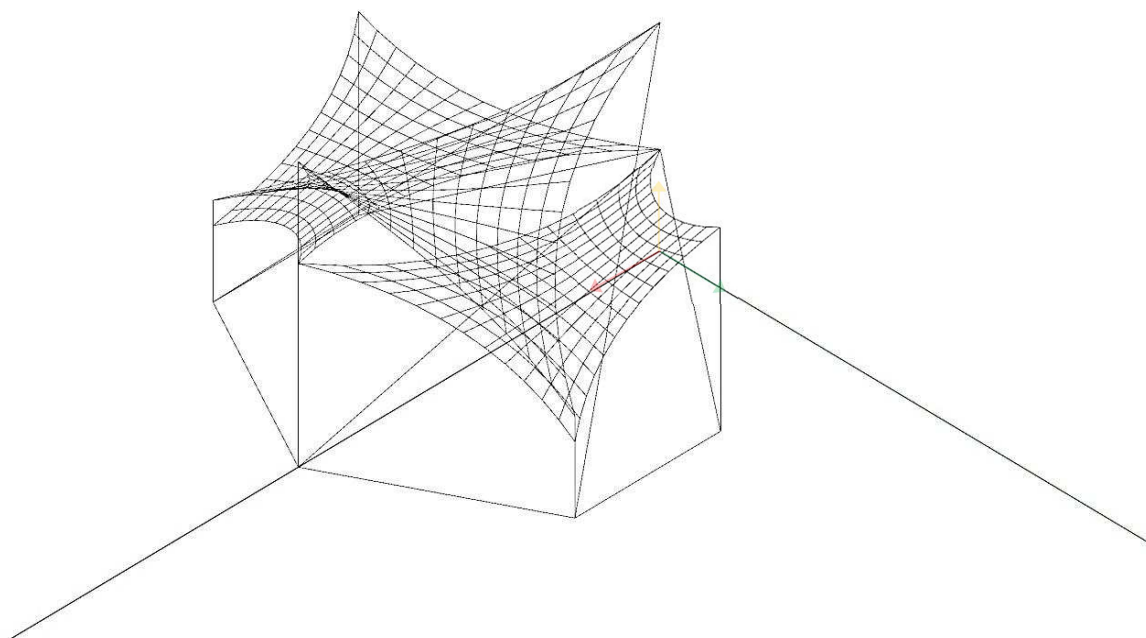
Pri relaksaciji modela konstrukcije, ki ga obravnavamo v tej nalogi, smo uporabili možnost robov s kabli. Napetostni koeficient med osnovno in votkovno stranjo je bil 1,0, uporabili smo diagonalne niti. Koeficient natega v kablji je bil na vseh robovih enak, in sicer 1,0. Predvideli smo maksimalno število iteracij 250 ter toleranco 0%.

Po končani relaksaciji nam program vrne poročilo o poteku relaksacije (Slika 6-9), iz katerega razberemo, da je program tri mreže, pri katerih po robovih potekajo kabli, modeliral s 512 vozlišči in 1368 povezavami. Za doseg končne napake 0,00000334319 je rabili 251 iteracij.

```
Relaxing cable edge mesh
found 3 meshes and 0 lines and 12 3Dpolys
modeled with 512 nodes and 1368 links
average warp spacing =0,330015
average weft spacing =0,413002
average cable tension =6,339368
Iteration 251 residual 0,00000334319
```

Slika 6-9: Poročilo o poteku postopka relaksacije s programom MPanel za naš model

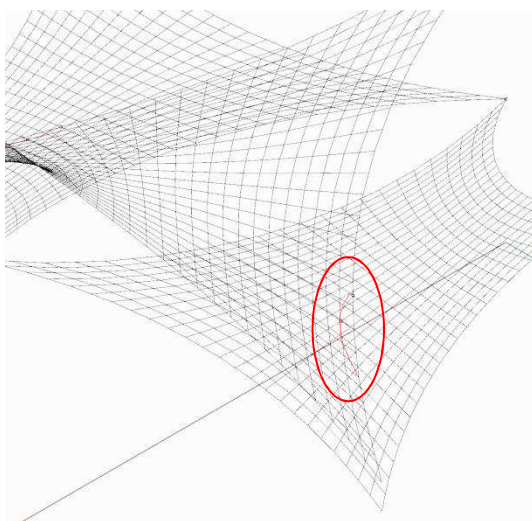
Iz razbranega sklepamo, da so mreže v celoti sproščene, saj je rezidualna napaka manjša od 0,0001. Oblike relaksiranih membran so prikazane na spodnjih slikah (slika 6-10).



Slika 6-10: Model s sproščenimi mrežami (merilo 1:100)

Pri natančnejšem preučevanju in kontroli oblike smo zapazili, da obstaja možnost, da se srednja membrana, ki je postavljena nad stranski dve, dotika spodnjih dveh. To lahko spremeni delovanje membran, torej njihov odziv na obtežbo, saj se v eni izmed smeri ali ne bodo mogle premakniti ali pa bodo na tem mestu prejemale dodatno obremenitev. Ker so se

membrane med sabo res dotikale, smo spremenili mesto pripenjanja srednjega in stranskih sedel iz 2,0 m in 1,5 m na 2,5 m in 1,8 m, torej smo povečali razdaljo med njima (slika 6-11).



Slika 6-11: Presek sproščenih membran označen z rdečo

6.3 STATIČNA ANALIZA

Statična analiza v primeru prednapetih membran je zelo zahtevna naloga, zato je izračun brez za to primerne računalniške opreme skoraj nemogoč. Sami smo analizo opravili s pomočjo programa MPanel FEA, ki, kot samo ime pove, uporablja metodo končnih elementov (MKE, angl. finite-element method – FEA). Največji problem pri analizi takih konstrukcij so relativno velike deformacije površine, saj so veliko bolj fleksibilne od klasičnih togih konstrukcij. Pri slednjih večinoma zadostujejo linearne statične analize, ki predpostavljajo majhne pomike elementov, medtem ko se moramo pri analizi membran poslužiti nelinearnih analiz, ki zajamejo velike pomike in njihov vpliv na notranje statične količine. Tako kot pri postopku iskanja oblike je tudi ta vrsta analize sestavljena iz več iteracij, med katerimi se obtežba na konstrukcijo nanaša v manjših inkrementih. Po vsakem dodanem delu obtežbe se izračuna nova oblika konstrukcije, nanjo pa se nato nanese naslednji inkrement obtežbe. [11]. Iz opisa postopka lahko vidimo, da so notranje statične količine v elementih konstrukcije odvisne od odziva konstrukcije na obtežbo, torej moramo biti zelo pozorni, da že v osnovni fazi čim bolj natančno predvidimo obliko, dimenzije in materiale podporne konstrukcije ter membran.

Preden pripravimo model za statično analizo, moramo oceniti začetne vrednosti prednapetja v membrani ter nivo nateznih sil v robnih kablji, s pomočjo teh pa lahko izberemo začetno prednapetje membrane in dimenzije robnih kablov. Nadaljujemo z natančno izbiro materialov na podlagi njihovih karakteristik ter z izračunom manjkajočih lastnosti, ki so potrebne za analizo. Na tej stopnji lahko že analiziramo konstrukcijo za stanje prednapetja.

Za natančno analizo in zadostitev zahtevam, ki jih postavljajo nacionalni standardi na področju gradnje, izberemo obtežbe, ki jih mora naša konstrukcija prenesti. Te so tesno povezane z določitvijo primernih faktorjev varnosti. Pri linearni statični analizi lahko med seboj obtežbe ali rezultate različnih vplivov kombiniramo v katerikoli fazi izračuna, medtem

ko to pri nelinearni analizi ni mogoče. Različni vplivi morajo biti pomnoženi z ustreznimi faktorji, rezultatov pa med seboj na koncu ne moremo seštevati.

Rezultate analize moramo kritično ovrednotiti in na njihovi podlagi dimenzionirati dele konstrukcije.

6.3.1 OCENA ZAČETNEGA PREDNAPETJA IN ZAČETNIH DIMENZIJ KABLOV

Kot smo že omenili, je potrebno sprva oceniti nivo prednapetja v membrani ter osnovne dimenzije elementov, ki sestavljajo konstrukcijo, saj je preračun notranjih sil v veliki meri odvisen tudi od teh.

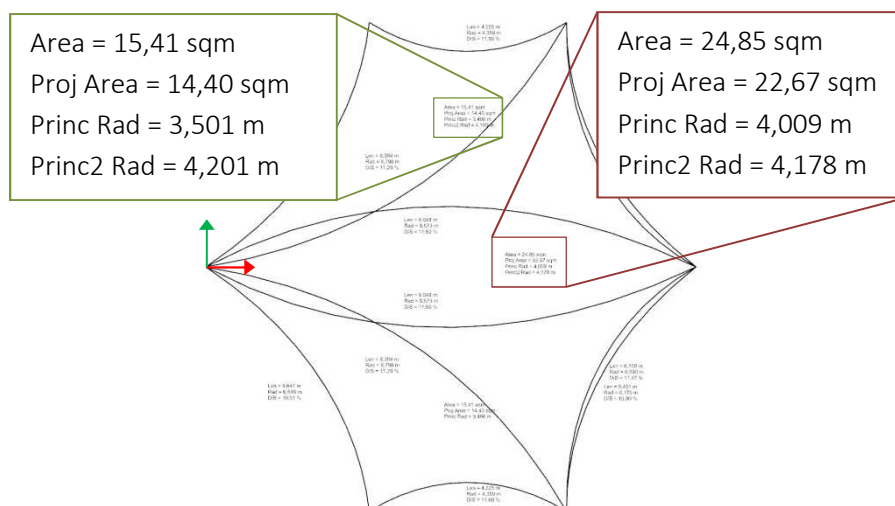
ZAČETNO PREDNAPETJE V MEMBRANI

Oceno potrebnega prednapetja membrane izračunamo po kotelni formuli, pri čemer upoštevamo, da je membrana dvojno ukrivljena, tako da se obtežba porazdeli na obe dve ukrivljenosti glede na razmerje radijev. Enačba se glasi

$$n_i = r_i \cdot p,$$

pri čemer n_i predstavlja vrednost napetosti v membrani v i -ti smeri, r_i velikost glavnega radija v smeri i ter p pritisk, ki ga obtežba povzroča na membrano [24].

Iz programa smo pridobili podatke o sproščeni obliki membrane (Slika 6-12).



Slika 6-12: Poročilo o osnovni geometriji membran (merilo 1:100)

Centralno sedlo

Ker smo izbrali koeficient napetosti v membrani 1,0, sta si tudi glavna radija zato podobna. Glede na to, da sta približno enaka, lahko obtežbo, ki deluje na membrano, razdelimo na polovico in izračunamo njen vpliv na eno izmed smeri membrane.

Predvidevamo, da bo največjo obremenitev membrane povzročala obtežba snega, katere karakteristična vrednost je za področje Ljubljane enaka $s_k = 1,51\text{kN/m}^2$, zaradi naklona membrane, pa jo bomo zmanjšali s koeficientom $\mu = 0,8$, torej je končna obtežba enaka

$$s_1 = 0,8 \cdot 1,51\text{kN/m}^2 = 1,21\text{kN/m}^2.$$

Izračunamo

$$n_y = r_y \cdot p = 4,18\text{m} \cdot \frac{1,21}{2}\text{kN/m}^2 = 2,53\text{kN/m},$$

torej bi bilo primerno prednapetje 3 kN/m.

Stranski sedli

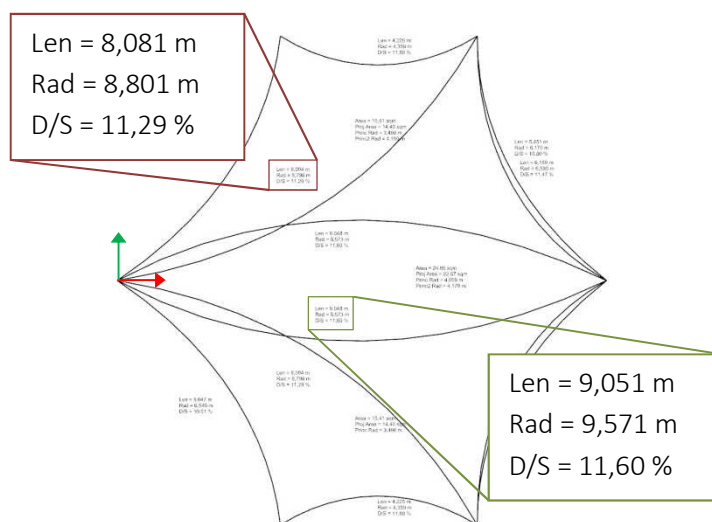
Ker je v smeri obremenitve s snegom postavljen manjši radij, predvidevamo, da potrebno prednapetje ne bo večje od tistega v srednjem sedlu. Tudi v stranskih membranah predvidevamo prednapetje 3 kN/m.

ZAČETNE DIMENZIJE KABLOV

Podobna enačba kot za membrane velja tudi za robne kable.

$$T_c = r_c \cdot n_i$$

Pri tem T_c predstavlja nateg v kablju, r_c radij ukrivljenosti kabla, n_i pa napetosti v membrani.



Slika 6-13: Poročilo o osnovni geometriji robnih kablov (merilo 1:100)

Centralno sedlo

Izračunamo

$$T_c = r_c \cdot n_y = 8,80\text{m} \cdot (3\text{kN/m} + 2,53\text{kN/m}) = 48,66\text{kN}$$

Iz izračuna predvidevamo, da bo moral kabel zdržati 48,66 kN natezne sile, ne da bi se pretrgal. V katalogu galvaniziranih vrvi [32] najdemo tako, ki ustreza tem pogojem, tudi če upoštevamo materialni faktor za jeklene konstrukcije

$$T_u = T_c \cdot \gamma_{M0} = 48,66 \text{ kN} \cdot 1,15 = 55,96 \text{ kN}.$$

Pogojem ustreza galvanizirana vrv premera 10 mm z najmanjšo silo ob pretrgu 88 kN.

Stranski sedli

Izračunamo

$$T_c = r_c \cdot n_y = 9,57 \text{ m} \cdot (3 \text{ kN/m} + 2,53 \text{ kN/m}) = 52,92 \text{ kN}$$

$$T_u = T_c \cdot \gamma_{M0} = 52,92 \text{ kN} \cdot 1,15 = 60,86 \text{ kN}.$$

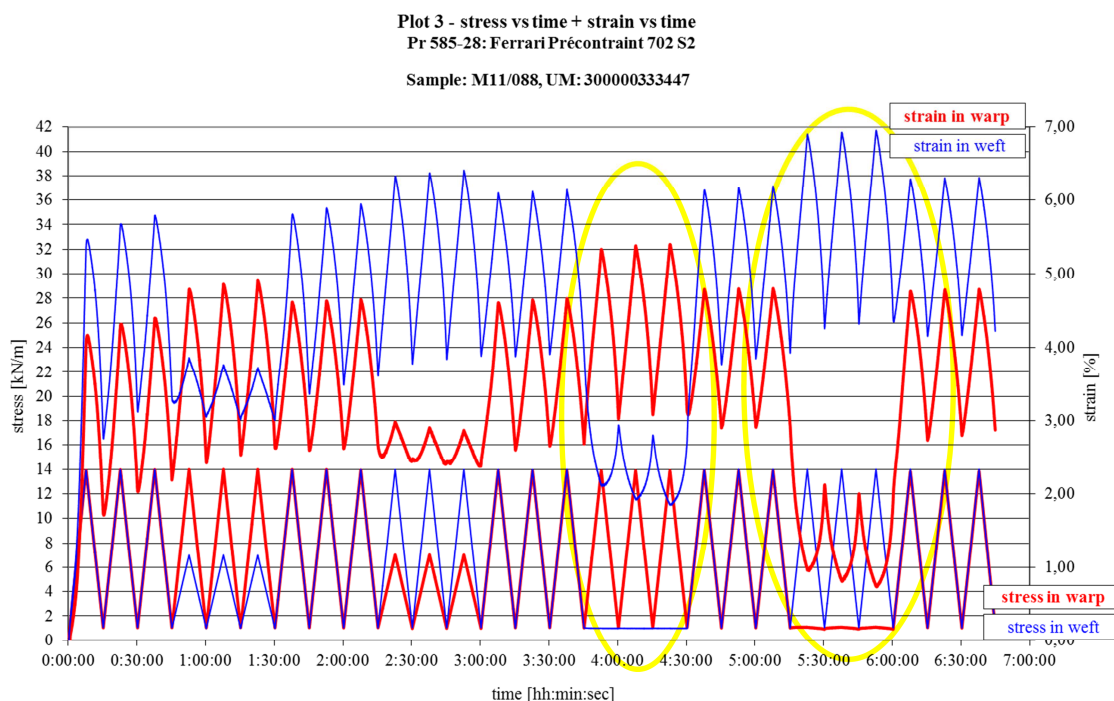
Tudi v tem primeru pogojem ustreza galvanizirana vrv premera 10 mm z najmanjšo silo ob pretrgu 88 kN.

6.3.2 IZBIRA MATERIALOV IN NJIHOVE KARAKTERISTIKE

MEMBRANA

Že v fazi idejni načrtov smo za najbolj primerno izmed tehničnih membran izbrali PET/PVC membrano. Najboljše lastnosti med njimi izkazujejo Ferrarijeve tkanine Precontraint, ki so s posebnim postopkom izdelane tako, da imajo skoraj enake lastnosti v obeh smereh, v osnovni in votkovni. Poleg tega se tudi manj raztezajo. Ker gre za manjšo konstrukcijo in običajne oblike, smo se odločili za membrano tipa I, Ferrari Precontrain 702 S2. Od njihovega predstavnika smo tudi pridobili rezultate biaksialnih testov, iz katerih smo nato razbrali in izračunali osnovne karakteristike.

Izračun modula elastičnosti iz grafov napetosti v odvisnosti od časa in deformacij v odvisnosti od časa



Grafikon 6-1: Graf napetosti in deformacije v odvisnosti od časa

Obtežbo bo membrana večinoma prevzemala le v eni smeri, medtem ko bodo v drugi smeri napetosti blizu 0 kN/m, saj bo večinoma šlo za sneg (obtežba v smeri gravitacijske sile) in veter oziroma srk vetra (obtežba v nasproti smeri gravitacijske sile). Iz tega razloga smo vrednosti napetosti in deformacij v osnovni in votkovni smeri razbrali z dela poskusa, kjer je bila obremenjena le ena izmed strani tkanine, tako kot je označeno na zgornjem grafu (grafikon 6-1). Prednapetje v obeh straneh je tekom celotnega poizkusa enako 1 kN/m. Nato smo vrednosti elastičnega modula v eni in drugi smeri izračunali iz enačb, ki smo jih pridobili iz [12], pri čemer smo ločili vrednosti elastičnega modula v osnovni smeri pri delovanju obremenitve v votkovni (E_{2211}) ter elastičnega modula v votkovni smeri pri delovanju obremenitve v osnovni smeri (E_{1122}).

Ko poteka obremenjevanje v osnovni smeri in so napetosti v votkovni enake 0 kN/m, veljata naslednji enačbi

$$n_{11} = E_{1111} \cdot \Delta\varepsilon_{11} + E_{1122} \cdot \Delta\varepsilon_{22}$$

$$0 = E_{2211} \cdot \Delta\varepsilon_{11} + E_{2222} \cdot \Delta\varepsilon_{22}$$

Ko poteka obremenjevanje v votkovni smeri in so napetosti v osnovni enake 0 kN/m, veljata naslednji enačbi

$$0 = E_{1111} \cdot \Delta\varepsilon_{11} + E_{1122} \cdot \Delta\varepsilon_{22}$$

$$n_{22} = E_{2211} \cdot \Delta\varepsilon_{11} + E_{2222} \cdot \Delta\varepsilon_{22}$$

Ko vstavimo vrednosti, ki smo jih razbrali iz grafa, v enačbe, dobimo sistem enačb.

$$\begin{aligned}13 &= E_{1111} \cdot 0,024 + E_{1122} \cdot 0,010 \\0 &= E_{2211} \cdot 0,024 + E_{2222} \cdot 0,010 \\0 &= E_{1111} \cdot 0,013 + E_{1122} \cdot 0,027 \\13 &= E_{1122} \cdot 0,013 + E_{2222} \cdot 0,027\end{aligned}$$

Po krajšem računanju dobimo vrednosti elastičnih modulov.

$$\begin{aligned}E_{1111} &= 691 \text{ kN/m} \\E_{1122} &= -344 \text{ kN/m} \\E_{2211} &= -271 \text{ kN/m} \\E_{2222} &= 625 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

S pomočjo enačb, pridobljenih iz [13] nato izračunamo Poissonov koeficient, ki se pri tkaninah razlikuje v obeh smereh.

$$\begin{aligned}v_{12} &= \frac{E_{1122}}{E_{1111}} = \frac{344}{691} = 0,50 \\v_{21} &= \frac{E_{2211}}{E_{2222}} = \frac{271}{626} = 0,43\end{aligned}$$

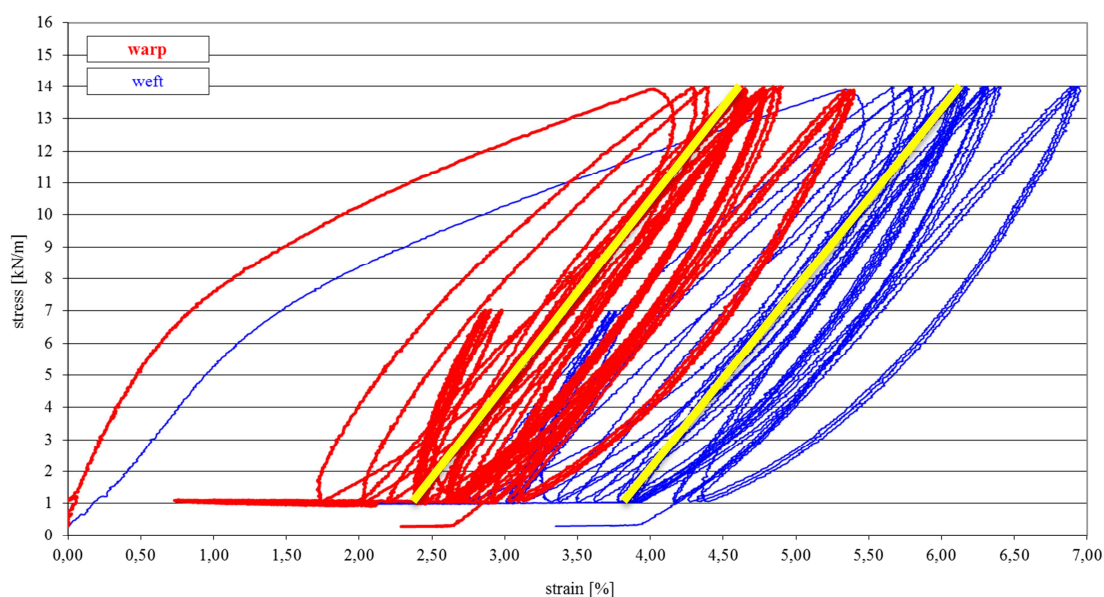
Nato lahko izračunamo vrednost elastičnega modula v obeh smereh.

$$\begin{aligned}E_1 &= E_{1111}(1 - v_{12} \cdot v_{21}) = 691(1 - 0,50 \cdot 0,43) = 540 \text{ kN/m} \\E_2 &= E_{2222}(1 - v_{12} \cdot v_{21}) = 626(1 - 0,50 \cdot 0,43) = 490 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

Izračun modula elastičnosti iz grafov napetosti v odvisnosti od deformacij

Ker so končne izračunane vrednosti modula elastičnosti zelo velike (sam program nam je predlagal membrano tipa I z vrednostjo elastičnega modula 300kN/m), smo poskusili pridobiti vrednosti še po drugem postopku, ki je predstavljen v [34]. V tem primeru smo grafično razbrali povprečno obnašanje tkanine v obeh smereh med poizkusom in iz razbranega izračunali iskani vrednosti.

Plot 4 - stress vs strain for "all cycles"
Pr 585-28: Ferrari Précontraint 702 S2
Sample: M11/088, UM: 300000333447



Grafikon 6-2: Graf napetosti v primerjavi z deformacijo

$$E_1 = \frac{n_{11}}{\Delta\varepsilon_{11}} = \frac{14\text{kN/m}}{0,022} = 636\text{kN/m}$$

$$E_2 = \frac{n_{22}}{\Delta\varepsilon_{22}} = \frac{14\text{kN/m}}{0,025} = 560\text{kN/m}$$

V zgornjem grafu sta ujeta dva efekta, razteg v smeri obremenjevanja ter skrčec zaradi obremenjevanja v drugi smeri [34]. Vpliv tega efekta lahko izračunamo, saj poznamo približno vrednost Poissonovega koeficienta, medtem ko si elastična modula v obeh smereh nista preveč različna. Enačba, ki zajame ta efekt, se v tem primeru glasi

$$E_{i,real} = \frac{E_{i,graf}(1 - \nu^2)}{1 + \nu},$$

pri čemer $E_{i,real}$ predstavlja dejansko vrednost elastičnega modula v smeri i , $E_{i,graf}$ pa vrednost, ki smo jo razbrali iz grafa. Realni vrednosti elastičnih modulov sta torej

$$E_{1,real} = \frac{E_{1,graf}(1 - \nu^2)}{1 + \nu} = \frac{636 \cdot (1 - 0,47^2)}{1 + 0,47} = 337\text{kN/m}$$

$$E_{2,real} = \frac{E_{2,graf}(1 - \nu^2)}{1 + \nu} = \frac{560 \cdot (1 - 0,47^2)}{1 + 0,47} = 297\text{kN/m}$$

Pri tem smo za vrednost Poissonovega koeficienta vzeli povprečje med vrednostma ν_{12} in ν_{21} , ki smo ju izračunali po prvem postopku.

Ker smo v drugem primeru dobili veliko nižje vrednosti elastičnega modula in torej primerljive s predlaganimi vrednostmi programa, smo iz previdnosti v analizi upoštevali te. Take razlike v izračunu modulov elastičnosti potrjujejo, da pretirana natančnost pri izračunu in izbiri le-teh

ni vedno smiselna. Če bi želeli analizo izpeljati z realnimi vrednostmi, bi morali izpeljati biaksialne teste za izbrano tkanino pri izbrani velikosti prednapetja s predvidenimi obremenitvami. Tudi v tem primeru, bi nas lahko omejele programske omejitve, kot na primer neupoštevanje različnega Poissonovega koeficienta v različnih straneh.

Za izbrano membrano smo v program vnesli zahtevane karakteristike.

$$E_x = 340\text{kN/m}$$

$$E_y = 300\text{kN/m}$$

$$\nu = 0,47$$

$$G = \frac{E}{10} = \frac{340\text{kN/m}}{10} = 34\text{kN/m}$$

$$f_{ux} = f_{uy} = 56\text{kN/m}$$

Strižni modul (G) smo izračunali po priporočilih [34], in sicer kot 10% vrednosti elastičnega modula. Mejno vrednost natezne napetosti (f_{ux} in f_{uy}) smo pridobili od proizvajalca tkanine.

KABLI

Prerez kablov na obodu membrane smo ocenili že med oceno napetosti v elementih konstrukcije. V program smo vnesli zahtevane karakteristike za galvanizirane kable proizvajalca Nobles [32].

$$E = 166 \cdot 10^6\text{kN/m}^2$$

$$\Phi = 10\text{mm, galvanizirane vrvi, oblikovane iz enega pramena 19 žic (oznaka 1x19)}$$

$$E \cdot A = 16600\text{kN/cm}^2 \cdot 0,603\text{cm}^2 = 10010\text{kN}$$

$$F_{u,min} = 88\text{kN}$$

6.3.3 PREDPISI

Prednapete membrane se na obremenitve odzovejo precej drugače kot klasične toge konstrukcije, kar se odraža tudi v principu načrtovanja ter zahtevah, ki jim morajo te zadostiti. V Evropi je v zdaj veljavnih evrokod standardih privzeti princip projektiranja metoda mejnih stanj. Ta predpisuje, da morajo biti konstrukcije in njihovi deli za različne kombinacije faktorirane obtežbe skladni s sprejemljivim odpornostnim kriterijem ter da za različne kombinacije delovnih obremenitev ne smejo biti presežene sprejemljive deformacije in ne sme biti onemogočeno njihovo delovanje [12]. Ta princip je v kontrastu s prej uporabljeno metodo dovoljenih napetosti, pri kateri napetosti v konstrukciji pri maksimalni delovni obtežbi niso smele preseči določenega deleža napetosti na meji tečenja materiala [12]. Za konstrukcije, ki se ali je od njih pričakovati, da se bodo obnašale linearno elastično, izbira principa projektiranja nima bistvenega vpliva na rezultate, medtem ko je za konstrukcije, ki izkazujejo mehčanje skozi nelinearnosti v materialu (npr. tečenje jekla), bolj primerna metoda mejnih stanj [12]. Za konstrukcije, ki izkazujejo velike geometrijske nelinearnosti, kot jih tudi prednapete membrane, pa je metoda mejnih stanj neprimerna, saj je geometrija strukture odvisna od velikosti in distribucije obtežbe [12]. Za slednje je bolj primerna metoda dovoljenih napetosti, ki tako dovoljuje variabilnost materiala ter različne delne faktorje varnosti glede na tip obtežbe [12]. Zaradi drugačne metode projektiranja in specifičnih lastnosti prednapetih

konstrukcij so zahtevani tudi drugačni varnostni faktorji. Ti so odvisni od odpornosti proti pretrgu, vrste materiala ter tipa in trajanja obtežbe in se gibljejo od 5 do 7 za tekstil, okrog 2,5 za kable in okrog 3 za trakove iz tkanin [12]. Natezna trdnost tkanine je odvisna od starosti, rokovanja, mečkanja, utrujanja, lezenja, temperature in drugih okoljskih faktorjev, pa tudi od kvalitete izdelave [12], zato so tudi njeni varnostni faktorji visoki. Poleg omenjenega je pri projektiranju potrebno upoštevati tudi napredovanje porušitve zaradi odpovedi ene od komponent, zavarovanje težkih konstrukcijskih elementov v primeru delne porušitve ali odstranitve katerega koli dela membrane in onemogočenje nabiranja vode ali snega na delu membrane [12].

Iz napisanega lahko sklepamo, da bi prednapete membrane zahtevale posebne standarde, ki bi pokrili vse faze in aspekte projektiranja, saj jih ne moremo enačiti ali primerjati z ostalimi vrstami konstrukcij iz klasičnih gradbenih materialov. Žal kompletnega standarda še ni na voljo, so pa Forster in sodelavci pripravili obsežen priročnik za natezne ploskovne strukture, ki velja za enega izmed potrebnih korakov k njemu [12].

V nadaljevanju smo se pri projektiranju v veliki meri opirali na omenjeni priročnik, poleg tega pa smo upoštevali tudi veljavne evrokod standarde ter standard SIST EN 13782:2006, ki pokriva področje varnosti začasnih šotorskih konstrukcij.

EVROKODI

S sprejetjem evrokodov je od leta 2008 v Sloveniji njihova uporaba praktično obvezna [31]. Obsegajo osnove projektiranja in vplive na konstrukcije, projektiranje betonskih, jeklenih, sovprežnih, lesenih, zidanih in aluminijastih konstrukcij ter projektiranje v geotehniko in projektiranje potresno odpornih konstrukcij. V primeru, da pri projektiranju uporabljamo ostale načine, je potrebno dokazati, da je stopnja varnosti konstrukcije enaka stopnji, ki je predpisana v evrokodih [31]. Torej moramo tudi v primeru prednapete membrane zadostiti pogojem, ki jih omenjeni standard zapoveduje.

Kot smo že omenili, standard ni primeren za projektiranje vseh elementov konstrukcij iz prednapetih membran, vendar je tudi kar zadeva tkanine in robne kable vseeno potrebno upoštevati njegova vodila. Tako smo na podlagi evrokodov 0 in 1 določili obtežbe konstrukcije ter kombinacijski faktor. Elementi podporne konstrukcije, ki so tudi sami konstrukcije, so bili projektirani klasično, po metodi mejnih stanj, in sicer po evrokod standardu 3, ki pokriva projektiranje jeklenih konstrukcij.

SIST EN 13782:2006

Standard v naslovu določa varnostne zahteve pri projektiranju, cenitvi, izdelavi, instalaciji, vzdrževanju, delovanju, pregledovanju in testiranju mobilnih, začasno postavljenih šotorov [35]. Ti so predvideni za ponavljajoče se postavljanje in razstavljanje za krajša in daljša obdobja na kateremkoli območju in za različne namene [35]. V nadaljevanju standarda so posebej omenjene tudi membrane v poglavju o preverjanju stabilnosti in ravnotežja.

Naša konstrukcija sicer ni namenjena ponavljajočemu postavljanju in razstavljanju, torej ni začasna, vendar njen gradbeni material premore lastnosti, ki jih izkazujejo omenjeni šotori. Standardu smo sledili pri določanju obtežbe na konstrukcijo, torej vpliva snega in vetra.

6.3.4 OBTEŽBA

Glavni obtežbi pri prednapetih membranah sta, kot že povedano, sneg in veter. Lastna teža je v primerjavi z velikostjo konstrukcije zanemarljiva in je med analizo nismo upoštevali. Zaradi majhne lastne teže so zanemarljivi tudi učinki potresne obtežbe.

SNEG

Obtežbo snega smo izračunali po dveh veljavnih standardih, in sicer po Evrokodu 1, ki splošno obravnava obtežbe na permanentne konstrukcije, ter po SIST EN 13782:2006, ki obravnava začasne konstrukcije, predvsem šotore.

Evrokod 1

V prvem primeru smo se opirali na standard SIST EN 1991-1-3:2004 Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije - 1-3. del: Splošni vplivi – Obtežba snega.

Ljubljana se nahaja na območju A2, kamor spada tudi večji del preostale države. Naša konstrukcija se nahaja na nadmorski višini približno 300 m, torej smo izračunali karakteristično vrednost obtežbe snega na tleh po enačbi

$$s_k(A2) = 1,293 \left[1 + \left(\frac{A}{728} \right)^2 \right],$$

pri čemer s_k predstavlja obtežbo snega na tleh v kN/m^2 , A pa nadmorsko višino, na kateri se objekt nahaja v m. Torej je v našem primeru

$$s_k(A2, 300\text{m}) = 1,293 \left[1 + \left(\frac{300}{728} \right)^2 \right] = 1,51\text{kN/m}^2$$

Ker je naklon naše konstrukcija po celotnem tlorisu večji ali enak vrednostim od 0° do 30° , smo karakteristično vrednost pomnožili s koeficientom $\mu_1 = 0,8$. Torej je vrednost obtežbe snega enaka

$$s_1 = 0,8 \cdot 1,51\text{kN/m}^2 = 1,21\text{kN/m}^2.$$

Standard sicer predpisuje tudi uporabo različnih oblikovnih koeficientov glede na obliko strehe, vendar iz obravnavanih primerov ni mogoče določiti razporeditve za tako konstrukcijo, kot jo obravnavamo. Ne glede na to smo upoštevali tako simetrično kot nesimetrično porazdelitev snežne odeje, kot smo to zasledili v [36]. Slednjo smo določili preko diagonal membrane.

SIST EN 13782:2006

V drugem primeru smo upoštevali standard SIST EN 13782:2006 Začasne konstrukcije – Šotori – Varnost.

V standardu lahko preberemo, da nam obtežbe snega ni potrebno upoštevati, če je šotorska konstrukcija:

- postavljena na območjih, kjer ni verjetnosti za pojav snega ali
- obratuje v letnem času, v katerem je verjetnost za zapad snega izvzeta ali
- oblikovana tako, da je zadrževanje snega na njej onemogočeno,
- ali so načrtovani vzdrževalni ukrepi, ki preprečujejo zadrževanje snega na konstrukciji. [35]

Čiščenje snega je v našem primeru predvideno z gumijasto cevjo za zalivanje (rešitev, ki jo predlaga [12]), poleg tega bo poskrbljeno, da se voda ne bo zbirala na membrani.

Iz omenjenih razlogov lahko po celotni konstrukciji nanesimo zgolj obtežbo 8 cm snega, kar znaša $0,2 \text{ kN/m}^2$.

VETER

Tudi pri obtežbi vetra smo upoštevali dva standarda in ločeno določili vplive po enem in drugem.

Evrokod 1

Upoštevali smo standard SIST EN 1991-1-4:2005 Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-4. del: Splošni vplivi – Vplivi vetra.

Vplive vetra na konstrukcijo smo izračunali po poenostavljeni metodi. Najprej smo določili osnovno hitrost vetra ($v_{b,0}$), za kar smo morali ugotoviti, v kateri coni, glede na temeljne vrednosti osnovne hitrosti vetra, se konstrukcija nahaja. Ljubljana leži na nadmorski višini 300 m, kar konstrukcijo uvršča v cono 1, kjer najdemo večino Slovenije. Osnovna hitrost vetra je tako $v_{b,0} = 20 \text{ m/s}$.

Nadalje smo pomnožili osnovno hitrost vetra s faktorji, ki upoštevajo letni čas (c_{season}) in smer vetra (c_{dir}). Priporočena vrednost teh faktorjev je $c_{dir} = c_{season} = 1,0$.

Ker je

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0},$$

sledi

$$v_b = v_{b,0} = 20 \text{ m/s}.$$

Osnovni tlak vetra (q_b) izračunamo po izrazu

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2,$$

kjer je gostota zraka (ρ) enaka $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$, torej je v našem primeru

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,25 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{20^2 \text{ m}^2}{\text{s}^2} = 250 \text{ N/m}^2.$$

Nato smo določili tlak pri največji hitrosti ob sunkih vetra ($q_p(z)$) na višini z , ki vključuje srednjo hitrost in kratkotrajno spreminjanje hitrosti. Odvisen je od faktorja izpostavljenosti ($c_e(z)$), pri določitvi katerega si pomagamo z grafikonom.

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b$$

Pri določitvi tega faktorja smo upoštevali, da se konstrukcija nahaja v kategoriji terena IV, kamor uvrščamo urbana področja, kjer je najmanj 15% površine pokrite s stavbami s povprečno višino več kot 15 m. Za višino, na kateri se konstrukcija nahaja, smo vzeli višino najvišjega stebra 6 m. Odčitali smo vrednost faktorja izpostavljenosti ($c_e(z = 6\text{m}; \text{kat. terena IV}) = 1,18$ ter izračunali tlak pri največji hitrosti ob sunkih vetra

$$q_p(6\text{m}) = 1,18 \cdot 250 \text{ N/m} = 295 \text{ N/m}.$$

Tlak vetra na ploskve konstrukcije izračunamo po enačbi

$$w_{i,e} = q_p(z_{i,e}) \cdot c_{pi,e},$$

pri čemer indeksa i in e predstavljata notranji in zunanji tlak. Vrednosti koeficienta notranjega ali zunanjega tlaka c_{pi} , so lahko pozitivne ali negativne [31]; pozitivne pomenijo tlak, negativne pa srk.

Upoštevali bomo obremenitev vetra kot srka s faktorjem -1.

$$v_s = c_s \cdot v = -1,0 \cdot 0,36 \text{ kN/m}^2 = -0,36 \text{ kN/m}^2$$

SIST EN 13782:2006

V drugem primeru smo upoštevali standard SIST EN 13782:2006 Začasne konstrukcije – Šotori – Varnost, ki navaja, da se na območjih, kjer referenčna hitrost vetra ne preseže 28 m/s, upošteva minimalno vrednost pritiska vetra glede na višino konstrukcije kot predvideva preglednica 6-1.

Preglednica 6-1: Obtežbe zaradi vplivov vetra [35]

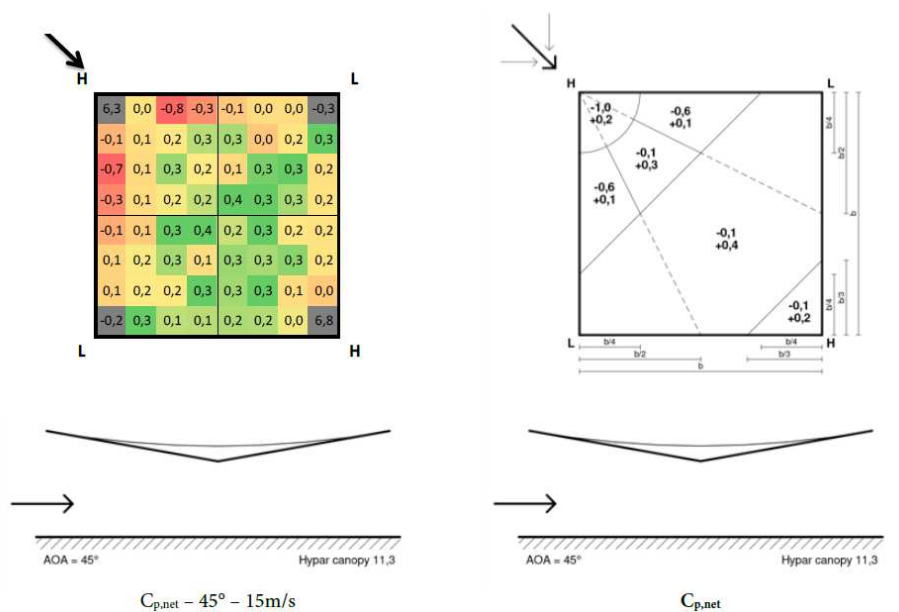
Višina h [m]	Pritisk q [N/m ²]
$h \leq 5$	500
$5 < h \leq 10$	600
$10 < h \leq 15$	660
$15 < h \leq 20$	710
$20 < h \leq 25$	760

Naša konstrukcija spada med višino od 5 do 10 m, zato je predviden pritisk zaradi vetra enak 0,6 kN/m².

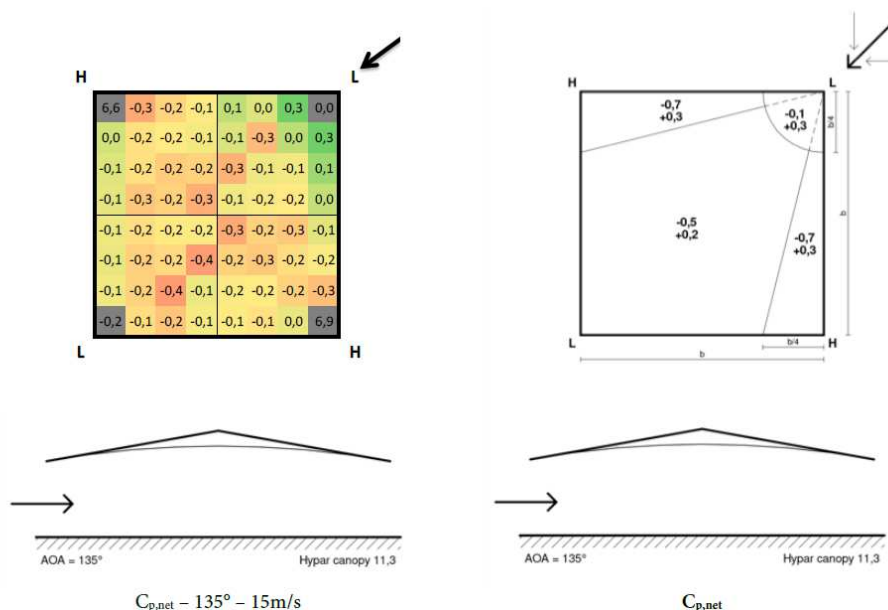
Koeficienti vetra, ki jih standard določa, so za srk enaki $c_s = -0,7$, za tlak pa $c_d = 0,3$. Mi bomo v analizi upoštevali le srk, saj nam upoštevanje tlaka ne bo dalo bistveno drugačnih rezultatov kot obtežba snega (le nivo notranjih napetosti bo manjši).

$$v_s = c_s \cdot v = -0,7 \cdot 0,60 \text{ kN/m}^2 = -0,42 \text{ kN/m}^2$$

Veljavni standardi ne obravnavajo zahtevnejših oblik pri točnejšem določevanju vpliva vetra na konstrukcije, zato smo si pri določevanju koeficientov srka pomagali z rezultati vetrnih testov v tunelu na togem modelu sedlastega nadstreška [37]. Kritične so obremenitve vetra preko visoke točke ter nizke točke na sedlu, zato smo tudi obravnavali le ta dva primera. Porazdeljenost faktorjev je lepo razvidna iz spodnjih slik (slika 6-14 in 6-15). Tudi v tem primeru smo upoštevali le koeficiente za srk.



Slika 6-14: Koeficienti vetra na sedlastem nadstrešku pri obremenitvi visokega kota [37]



Slika 6-15: Koeficienti vetra na sedlastem nadstrešku pri obremenitvi nizkega kota [37]

KOMENTAR

V obeh primerih, torej obtežbe zaradi snega ter obtežbe zaradi vpliva vetra, vrednosti niso prilagojene konstrukciji, ki jo v nalogi obravnavamo. Evrokod standard je omejen na permanentne konstrukcije, ki so izdelane iz bolj togih materialov, zato so vrednosti za obtežbo snega za prenapeto membrano zelo visoke, medtem ko so obremenitve zaradi vpliva vetra nizke. To je seveda razumljivo, saj toge konstrukcije, kot so na primer stanovanjski objekti, v večji meri ogroža velika količina zapadlega snega, ki ga ni mogoče počistiti s strehe, kot srk vetra, ki mu kljubuje že sama teža konstrukcije. Na drugi strani standard EN 13782:2006 zajema začasne, montažne šotorske konstrukcije, pri katerih se bolj osredotoča na kontrolo varnosti pri ponavljajočem se postavljanju ter splošno varnost ljudi pri obratovanju. Tako so lahko zahteve glede kontrole obtežbe snega premalo stroge, saj večina teh konstrukcij pozimi ne obratuje ali so v bližini vedno vzdrževalci objekta, medtem ko so obtežbe zaradi vetra izdatno povečane, saj te za konstrukcije iz platna predstavljajo večjo nevarnost. Tvori se namreč lahko jadro, ki ob dovolj močnem vetru konstrukcijo dvigne.

Obravnavani nadstrešek je nekje vmes. Medtem ko ne spada med začasne konstrukcije, kot so te definirane v standardu o šotorih, so zahteve po evrokodu 1 prehude, saj je material, iz katerega je membrana izdelana, veliko bolj gladek kot strehe iz npr. opeke. Sneg tako veliko prej spolzi s konstrukcije, k temu pa pripomorejo tudi veliki naklonski koti. Zahteve po evrokod standardu torej povzročijo previsoko raven prednapetja v membrani.

Pri vetru so zahteve tega standarda preohlapne, saj ta pri obravnavanih vrstah konstrukcije lahko izzove velike odzive membrane, ki jih podporna konstrukcija ne more prenesti. Tej temi je tudi v znanstvenih člankih ter drugih delih posvečene veliko pozornosti.

Glede na povedano smo pri snovanju nadstreška poskušali upoštevati oba standarda, vendar smo pri obremenitvi s snegom po evrokodu 1 dovolili rahlo gubanje tkanine v votkovni smeri.

6.3.5 OBTEŽNI PRIMERI

Forster in sodelavci predlagajo preverjanje naslednjih obtežnih primerov:

- a) lastna teža + prednapetje
- b) lastna teža + prednapetje + sneg
- c) lastna teža + prednapetje + veter
- d) lastna teža + prednapetje + veter (tlak) + sneg
- e) itd. [evropski priročnik]

V obravnavanem primeru lastne teže pri analizi nismo upoštevali, saj je naša konstrukcija manjših dimenzij in zato ta ne vpliva bistveno na velikost notranjih napetosti. Prav tako nismo upoštevali primera vetra v tlaku in snega, saj je bila že sama obtežba s snegom velika. Upoštevali smo primere po obeh prej omenjenih standardih, na koncu pa smo tudi kombinirali najbolj kritične vplive iz obeh standardov, pri kombiniranju več spremenljivih obtežb pa smo upoštevali kombinacijski faktor ψ_0 v skladu z evrokodom 0.

Ker smo predvideli, da bodo vsa sedla vpeta v stebre, ki so togo vpeti v temelje, smo oglišča membran modelirali kot členkasto vpeta v vrhove stebrov, ki niso bili del analize. Izračunane notranje napetosti so sicer tako malo večje kot bi bile pri upoštevanju upogibkov konzolno vpetih stebrov, vendar so ti rezultati bližje realnosti kot bi bili členkasto vpeti stebri, v vsakem primeru pa razlike niso velike. Tako membrane med analizo niso vplivale ena na drugo, torej smo jih lahko analizirali ločeno. Zaradi principov določevanja glavnih smeri v membrani računalniškega programa smo lahko tako tudi izbrali realno glavno smer v vseh jadrih (sicer je bila možnost določitev prave glavne smeri le za eno izmed njih). Ker sta desno in levo jadro povsem enaka, le simetrično postavljena, smo obravnavali le desnega.

Preglednica 6-2: Obravnavani obtežni primeri in kombinacijski faktorji

Obtežni primer	Prednapetije	Sneg	Sneg nesimetričen	Veter	Sneg	Veter	Veter čez visoko točko	Veter čez nizko točko
EC 1991	1	P	1					
	2	P + S	1	1				
	3	P + S, nesim.	1		1			
	4	P + V	1			1		
SIST EN 13782:2006	5	P + S	1			1		
	6	P + V	1				1	
	7	P + V, vis.	1					1
	8	P + V, niz.	1					
Komb.	9	P + S + V, vis.	1	1				0,6
	10	P + S + V, niz.	1	1				

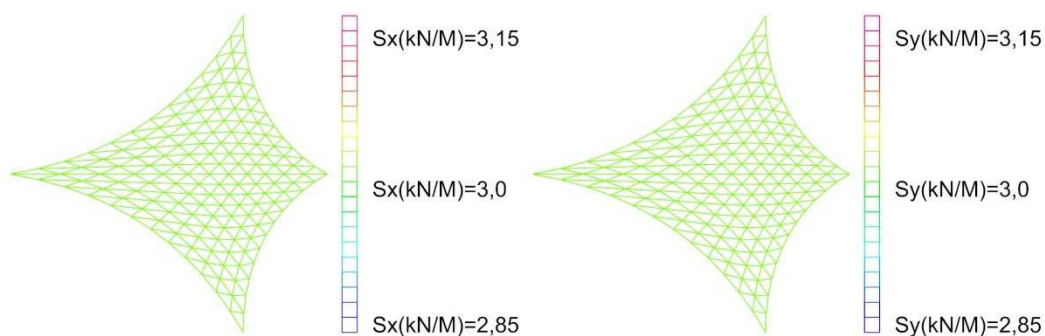
Kot smo že omenili, smo želeli zadostiti obema standardoma, zato so s tem skladni obtežni primeri (preglednica 6-2). Pri vseh obtežbah smo upoštevali karakteristične vrednosti vplivov, le pri kombinaciji snega s vetrom smo slednjega pomnožili z faktorjem ψ_0 po standardu SIST EN 1990. Faktor je enak 0,6 [31].

1. PREDNAPETJE

Velikost prednapetja je tesno povezana z najbolj neugodno obtežbo konstrukcije, saj mora v vsaki fazi konstrukcija ostati napeta v obeh smereh [37]. V nasprotnem primeru pride do gubanja tkanine, izgube prednapetja ter eventualnega pretrga. Torej moramo natezne napetosti ohranjati v membrani tudi ob kritični obtežbi. Najnižji nivo prednapetja za PET/PVC membrane naj bi bil 1,3% povprečne natezne trdnosti, kar za tkanino tipa I pomeni 0,70 kN/m [12]. Glede povprečnih in najvišjih vrednosti prednapetja so si viri nasprotujoči. Medtem ko Forster in sodelavci [12] ne navajajo tipičnih in najvišjih vrednosti za PET/PVC tkanine,

omenjajo razpon od 2,0 kN/m do 5,0 kN/m, pri zelo ravnih površinah tudi do 10 kN/m za FG/PTFE tkanine. Kovačević [13] v svojem diplomskem delu po posvetovanju pri inženirju navaja, da se velikost prednapetja pri običajnih konstrukcijah giblje od 1 do 2 kN/m, pri večjih do 3 kN/m, v primeru zelo velikih streh pa tudi do 5 kN/m. Omenja tudi, da so takšna prednapetja v konstrukcijo sposobna vnesti le redka, zelo izkušena podjetja [13]. Po drugi strani Fang zapisuje, da tipični nivoji prednapetja zavzemajo velikosti od 2 do 10 kN/m [38]. Prav tako nam sam program, v katerem smo konstrukcijo analizirali, priporoča vrednost prednapetja 2 kN/m. Ob dodatnem študiju literature, ki obravnava primere iz prakse, smo našli primere, pri katerih so PET/PVC tkanine napete z 2 kN/m (nadstrešek Sainsburyskega Supermarketa v Plymouthu, v Veliki Britaniji) [39] ali imajo notranje napetosti ob prenapetju 16 in 11 kN/m (benzinska črpalka v Wanlinu, v Belgiji) [39], kar pomeni, da je morala biti tkanina prednapeta z več kot 5 kN/m.

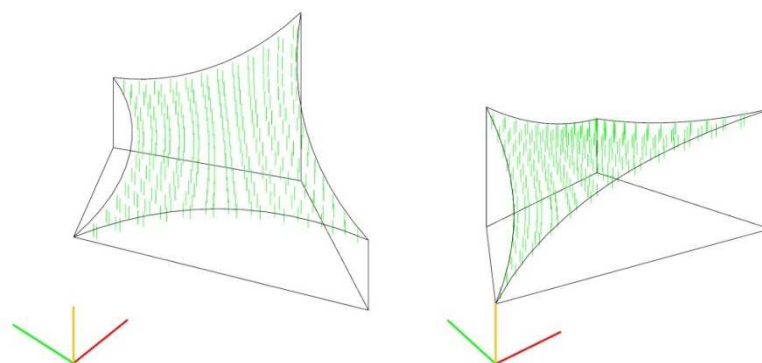
Sami smo imeli velike probleme pri prevzemu obremenitev zaradi obtežbe snega po evrokod standardu, ki je od nas zahteval prednapetje v velikosti več kot 4,0 kN/m. Glede na preučene primere, literaturo ter priporočene vrednosti smo se odločili, da bomo membrane prednapeli z napetostjo 3 kN/m (slika 6-16), pri čemer bomo dovoljevali rahlo gubanje membran v votkovni smeri v primeru obtežbe s snegom po evrokod standardu 1. Ta zahteva je zelo stroga, manjše gubanje pa ne bo povzročilo večjih težav na objektu.



Slika 6-16: Vnos prednapetja na centralno sedlo

2. SNEG PO EC 1991

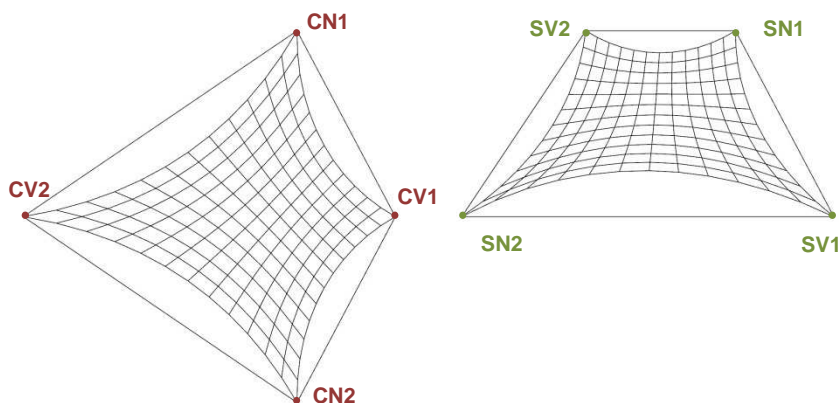
Po celotni površini membran smo enakomerno porazdelili obtežbo snega po standardu EC 1991, in sicer $s = 1,21 \text{ kN/m}^2$ (slika 6-17).



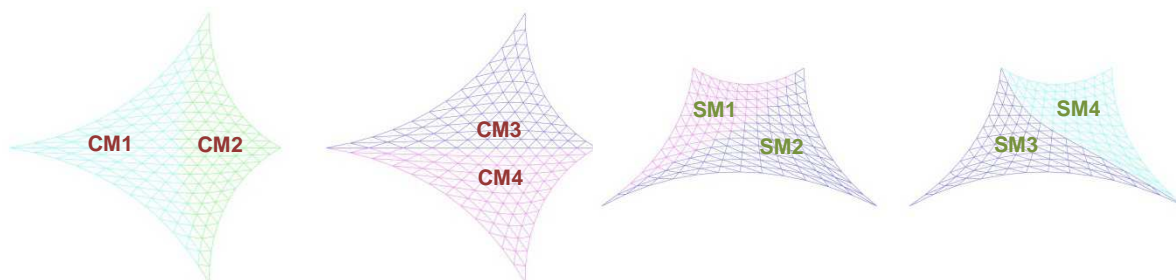
Slika 6-17: Nanešena obtežba snega po standardu EC 1991 na centralno sedlo (levo) in stransko (desno) sedlo (desno)

3. SNEG PO EC 1991 NANEŠEN NESIMETRIČNO

Po membranah smo nesimetrično porazdelili obtežbo snega po standardu EC 1991 ($s = 1,21 \text{ kN/m}^2$). Upoštevali smo diagonale, ki povezujejo visoke in nizke točke obeh membran, ki sta predmet analize. V ta namen smo najprej določili oznake oglišč (slika 6-18). Območja nesimetričnih porazdelitev obtežbe so razvidna iz spodnje slike (slika 6-19), kombinacije pa so predstavljene v preglednici pod njo (preglednica 6-3).



Slika 6-18: Oznake oglišč membran centralnega sedla (levo) in stranskega (desno)



Slika 6-19: Nesimetrična porazdelitev obtežbe snega na centralnem sedlu glede na diagonalo preko nizkih (skrajno levo) in visokih točk (sredina levo) ter na stranskem sedlu glede na diagonalo preko nizkih (sredina desno) in visokih točk (skrajno desno)

Preglednica 6-3: Obtežni primeri za nesimetrično porazdelitev snega po EC 1991

Centralno sedlo	Obtežni primer	CM1	CM2	CM3	CM4
	3a	1	0		
	3b	0	1		
	3c			1	0
Stransko sedlo	Obtežni primer	SM1	SM2	SM3	SM4
	3a	1	0		
	3b	0	1		
	3c			1	0
	3d			0	1

4. VETER PO EC 1991

Po celotni površini membran smo enakomerno porazdelili obtežbo zaradi vpliva srka vetra po standardu EC 1991, in sicer $v_s = -0,36 \text{ kN/m}^2$.

5. SNEG PO SIST EN 13782: 2006

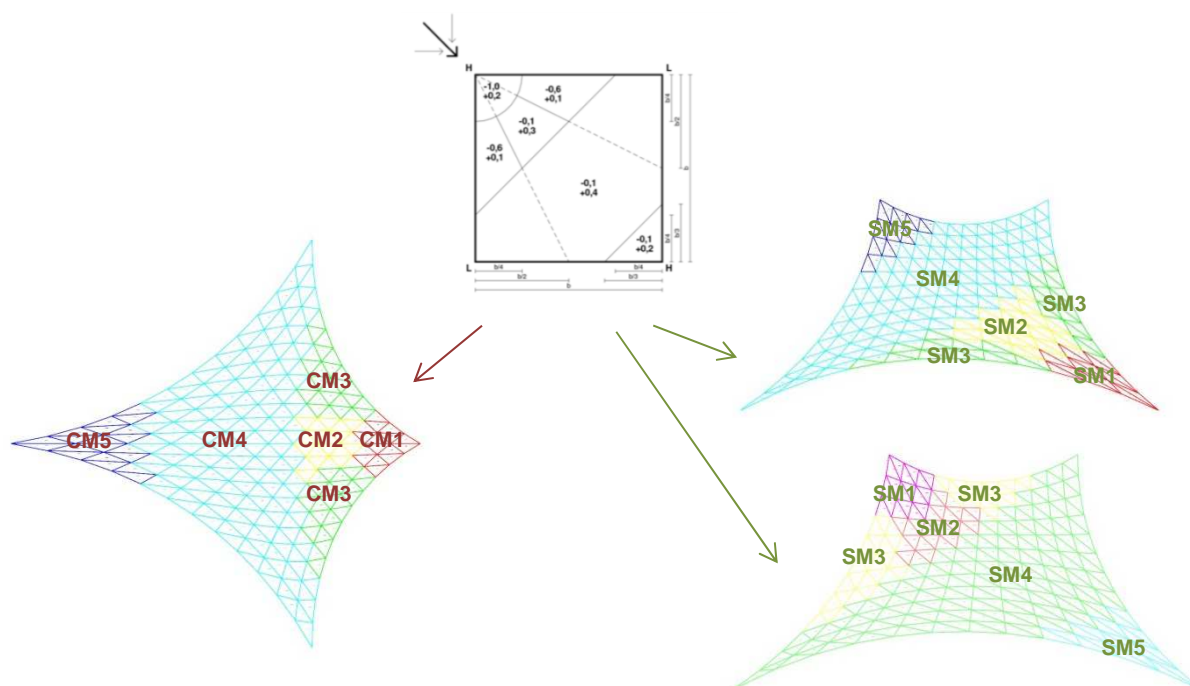
Po celotni površini membran smo enakomerno porazdelili obtežbo snega po standardu SIST EN 13782:2006, in sicer $s = 0,2 \text{ kN/m}^2$.

6. VETER PO SIST EN 13782: 2006

Po celotni površini membran smo enakomerno porazdelili obtežbo zaradi vpliva srka vetra po standardu SIST EN 13782:2006, in sicer $v_s = -0,42 \text{ kN/m}^2$.

7. VETER ČEZ VISOKO TOČKO PO SIST EN 13782: 2006

Skladno s prej omenjenimi rezultati testov v vetrnem tunelu smo tako na centralno kot na stransko sedlo nanесли obtežbo zaradi vpliva vetra po standardu SIST EN 13782:2006 (slika 6-20). Stransko sedlo ima dve visoki točki, ki sta eventualni tarči vetra, medtem ko ima centralno sedlo drugo visoko točko vpeto v objekt in zato preko nje veter ne more pihati.



Slika 6-20: Koeficienti vetra glede na rezultate testa v vetrnem tunelu [37] (sredina zgoraj) ter aplikacija na obravnavani primer, centralno sedlo (levo), stransko sedlo pri vplivu vetra čez visoko točko SV1 (desno zgoraj) ter SV2 (desno spodaj)

Velikosti obtežbe smo izračunali na podlagi podanih koeficientov pri obtežbi zaradi vpliva vetra. Smer vetra, ki je bila pri posameznem primeru obravnavana je jasno prikazana v spodnji preglednici (preglednica 6-4).

$$v_1 = c_{p1} \cdot v = -1,0 \cdot 0,6 \text{ kN/m}^2 = -0,60 \text{ kN/m}^2$$

$$v_2 = c_{p2} \cdot v = -0,1 \cdot 0,60 \text{ kN/m}^2 = -0,06 \text{ kN/m}^2$$

$$v_3 = c_{p3} \cdot v = -0,6 \cdot 0,60 \text{ kN/m}^2 = -0,36 \text{ kN/m}^2$$

$$v_4 = c_{p4} \cdot v = -0,1 \cdot 0,60 \text{ kN/m}^2 = -0,06 \text{ kN/m}^2$$

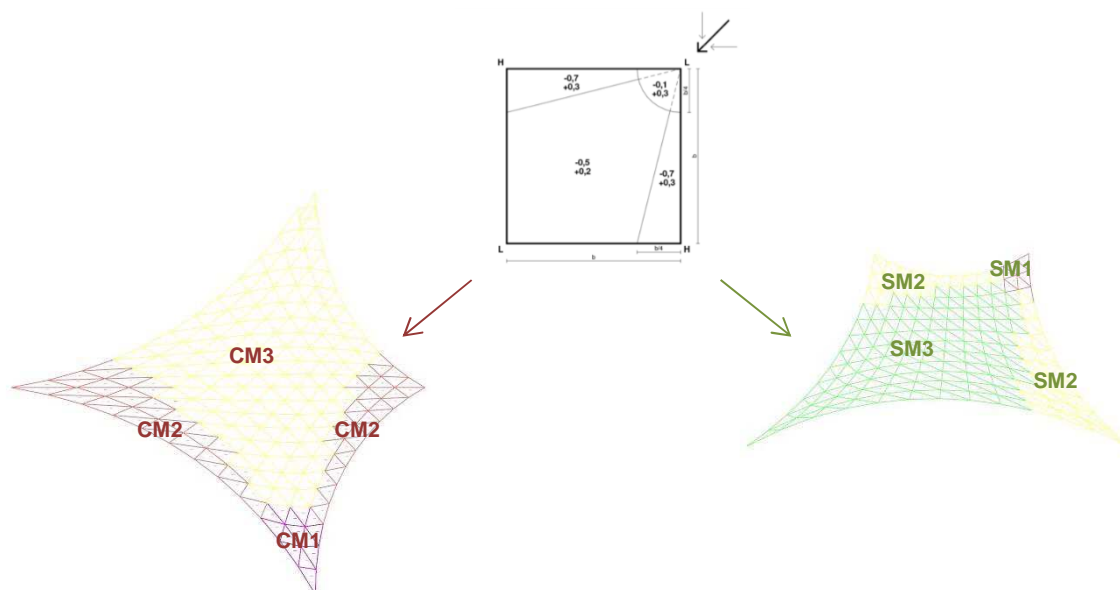
$$v_5 = c_{p5} \cdot v = -0,1 \cdot 0,60 \text{ kN/m}^2 = -0,06 \text{ kN/m}^2$$

Preglednica 6-4: Obtežni primeri z obravnavano smerjo vetra

Centralno sedlo	Obtežni primer	Smer vetra
	7a	Čez visoko točko CV1
Stransko sedlo	Obtežni primer	Smer vetra
	7a	Čez visoko točko SV1
	7b	Čez visoko točko SV2

8. VETER ČEZ NIZKO TOČKO PO SIST EN 13782: 2006

Skladno s prej omenjenimi rezultati testov v vetrnem tunelu smo na centralno in stransko sedlo nanegli obtežbo zaradi vpliva vetra po standardu SIST EN 13782:2006 (slika 6-21). V tem primeru je ena izmed nizkih točk stranskega sedla vpeta v objekt in zato ni možnosti obremenitve s te strani. Čeprav ima centralno sedlo obe nizki točki na udaru, je simetrično, zato smo obravnavali le eno izmed možnosti.



Slika 6-21: Koeficienti vetra glede na rezultate testa v vetrnem tunelu [37] (sredina zgoraj) ter aplikacija na obravnavani primer, centralno sedlo pri vplivu vetra čez nizko točko CN2 (levo) ter stransko sedlo pri vplivu vetra čez nizko točko SN1 (desno)

Velikosti obtežbe smo izračunali na podlagi podanih koeficientov pri obtežbi zaradi vpliva vetra.

$$v_1 = c_{p1} \cdot v = -0,1 \cdot 0,60 \text{ kN/m}^2 = -0,06 \text{ kN/m}^2$$

$$v_2 = c_{p2} \cdot v = -0,7 \cdot 0,60 \text{ kN/m}^2 = -0,42 \text{ kN/m}^2$$

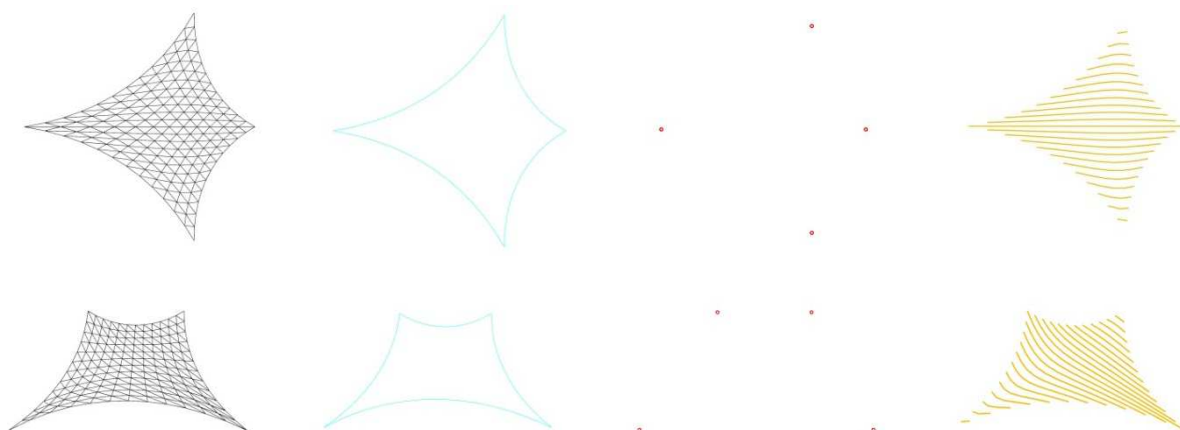
$$v_3 = c_{p3} \cdot v = -0,5 \cdot 0,60 \text{ kN/m}^2 = -0,30 \text{ kN/m}^2$$

6.3.6 REZULTATI ANALIZE

Kot že omenjeno gre pri statični presoji membran za geometrijsko nelinearno analizo z upoštevanjem velikih pomikov. To pomeni, da je pomemben odziv konstrukcije na nanešeno obtežbo. Ob nanosu se struktura premakne, nato se na premaknjeni konstrukciji postopek ponovi, dokler niso premiki zadovoljivo majhni. Največja razlika z linearno analizo je v tem, da superpozicija, torej preprosto seštevanje vplivov obtežb, ni možna. Potrebno je nanesti želena kombinacija obtežbe na konstrukcijo že v začetku.

Ker smo predvideli, da bodo vsa sedla vpeta v togo vpete stebre, ta med analizo ne vplivajo ena na drugo, zato smo vsako od sedel oziroma osrednje in desno jadro (levo je simetrično desnemu) obravnavali ločeno. V oglišča so bila sedla vpeta členkasto.

V programu je potrebno pred izdelavo modela za statično analizo podati smer osnovnih vlaken ter robne pogoje (slika 6-22). Zaradi omejenih možnosti določanja glavnih smeri smo te natančneje določili pri ločenem obravnavanju membran. Ob vnosu modela računalniško orodje, program MPanel FEA, sam proizvede model iz končnih elementov, ki ga nato uporablja pri analizi.



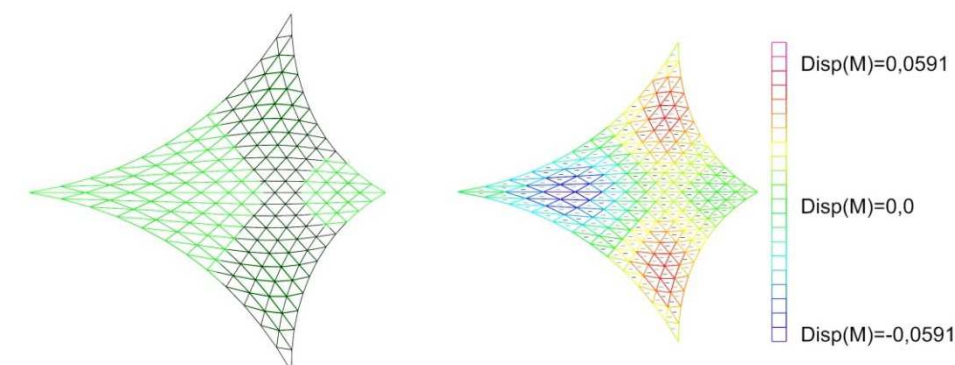
Slika 6-22: Končni elementi za analizo centralnega in stranskega jadra (skrajno levo), modelirani robni kabli (sredina levo), členkasto vpetje robov (sredina desno) ter osnovna smer vlaken (skrajno desno)

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati analize, in sicer najprej za centralno sedlo, nato pa še za stransko. Na koncu so v preglednici zbrani vsi podatki, ki so relevantni za nadaljnjo obdelavo in dimenzioniranje.

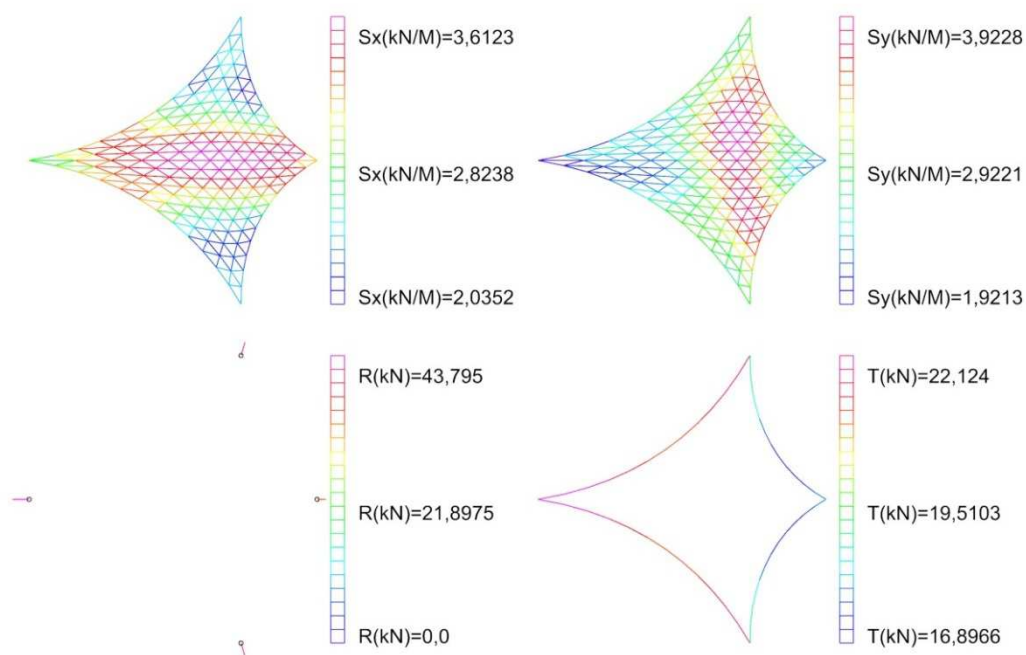
6.3.6.1 CENTRALNO SEDLO

1. Prednapetje

Ko v konstrukcijo vnesemo predvideno prednapetje, se ta glede na obliko, ki smo jo dobili z relaksacijo mreže, na visokih točkah rahlo spusti, za približno 0,05 m, v okolici nizkih pa rahlo dvigne, za okoli 0,04 m. Pomiki glede na vrsto in velikost konstrukcije niso veliki.



Slika 6-23: Primerjava začetne (zeleno) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo) ter pomiki zaradi vnosa prednapetja v konstrukcijo (desno)

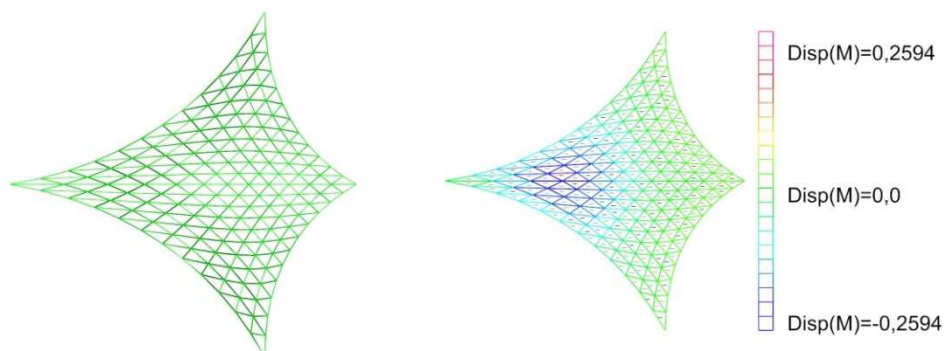


Slika 6-24: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kabljih (spodaj desno) pri prvem obtežnem primeru

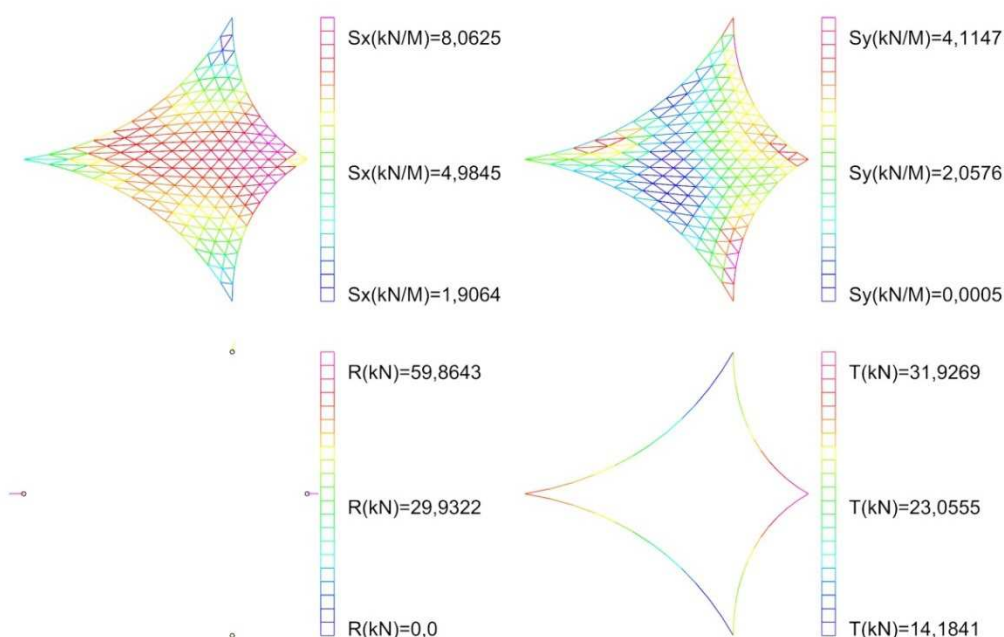
Skladno s spremembo oblike membrane so tudi notranje napetosti. V smeri pravokotni na diagonalo čez nizke točke, torej v osnovni smeri (napetosti na sliki označene z S_x), so napetosti nekoliko manjše ($n_{xx} = 3,61\text{kN/m}$) od napetosti pravokotno na to smer ($n_{yy} = 3,92\text{kN/m}$), torej v vtokovni smeri (napetosti na sliki označene z S_y). Zato se tudi membrana v smeri pravokotno na vtokovno rahlo spusti in obratno. Največje vrednosti reakcij dobimo v kotu, ki je vpet v objekt ($R = 43,80\text{kN}$). Na istem mestu so največje sile prisotne tudi v kabljih ($T = 19,51\text{kN}$).

2. Prednapetje + sneg po EC 1991

Največje pomike v centralnem sedlu smo dobili ravno pri obtežnem primeru s snegom po EC 1991. Celotna membrana se pomakne navzdol, največji pomik je iz sredine pomaknjen rahlo v levo ($w = 26\text{cm}$). Naj poudarimo, da so na spodnji sliki številčno prikazani le premiki v smeri osi z.



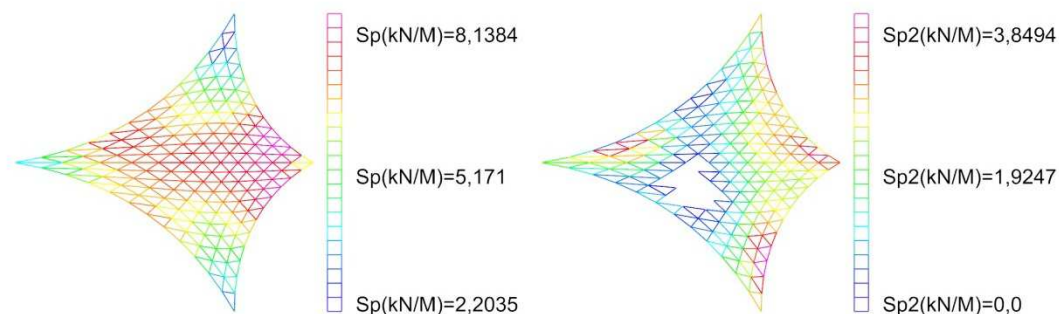
Slika 6-25: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo) ter pomiki (desno) zaradi obtežbe snega po EC 1991 za centralno membrano



Slika 6-26: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno) pri drugem obtežnem primeru

Skladne s premiki konstrukcije in vrsto obtežbe so tudi notranje napetosti. Ker je obtežba usmerjena v smeri gravitacije, se bodo povečale napetosti v tisti smeri tkanine, ki je upognjena navzdol. In obratno, zmanjšale se bodo napetosti v tisti smeri, ki je zavihana navzgor. V osnovni smeri so tako največje napetosti enake $n_{xx} = 8,06\text{kN/m}$, v vtokovni pa $n_{yy} = 4,11\text{kN/m}$. V vtokovni smeri se v območju, ki je bliže oglišču, ki je vpeto v objekt,

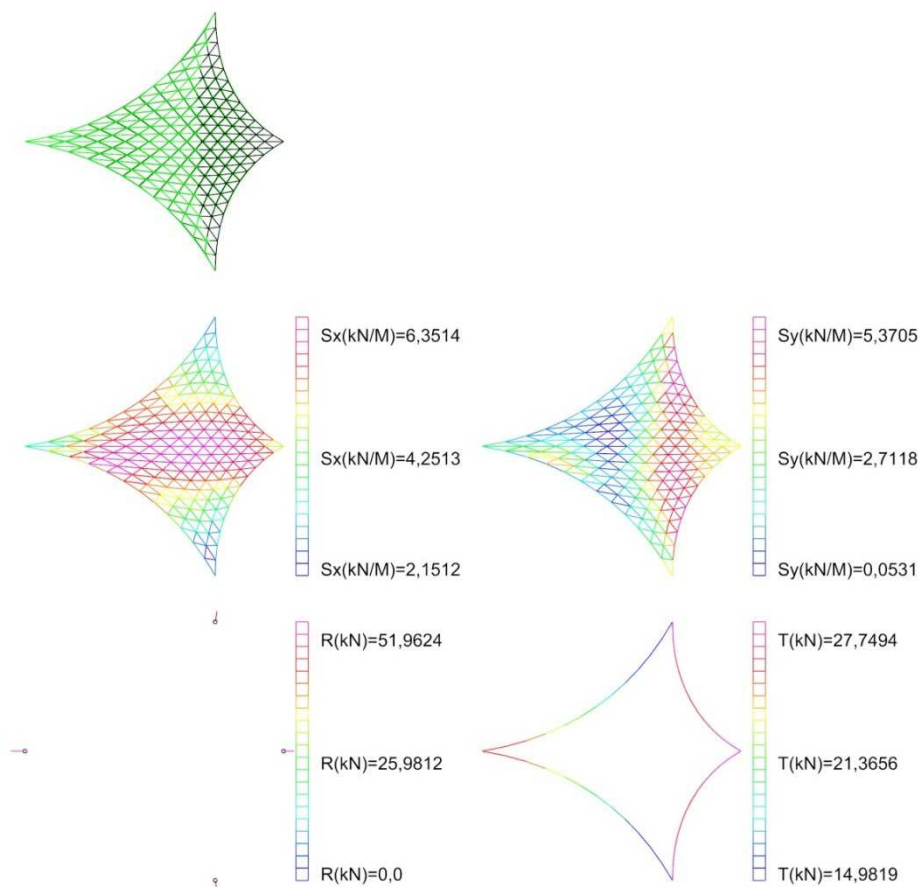
napetosti približajo oz. so enake 0. V takem primeru lahko pride do gubanja tkanine, zato smo preverili tudi napetosti v dveh glavnih smereh (slika 6-27). Vidimo lahko, da bi na tem območju (obarvano z belo) prišlo do gubanja. V našem primeru smo se odločili, kot je bilo že povedano, da manjše gubanje dopuščamo, saj so obremenitve zaradi vpliva snega zelo velike, morda pretirane za tako vrsto konstrukcije. Največje sile v kablh dobimo v okolici centralnega stebra ($T = 31,93\text{kN}$), prav tako so tam največje reakcije ($R = 59,86\text{kN}$).



Slika 6-27: Napetosti v membrani v glavni smeri (levo) in drugi glavni smeri (desno) pri drugem obtežnem primeru

3. Prednapetje + sneg (EC 1991, nesimetrično porazdeljen)

Primer 3a

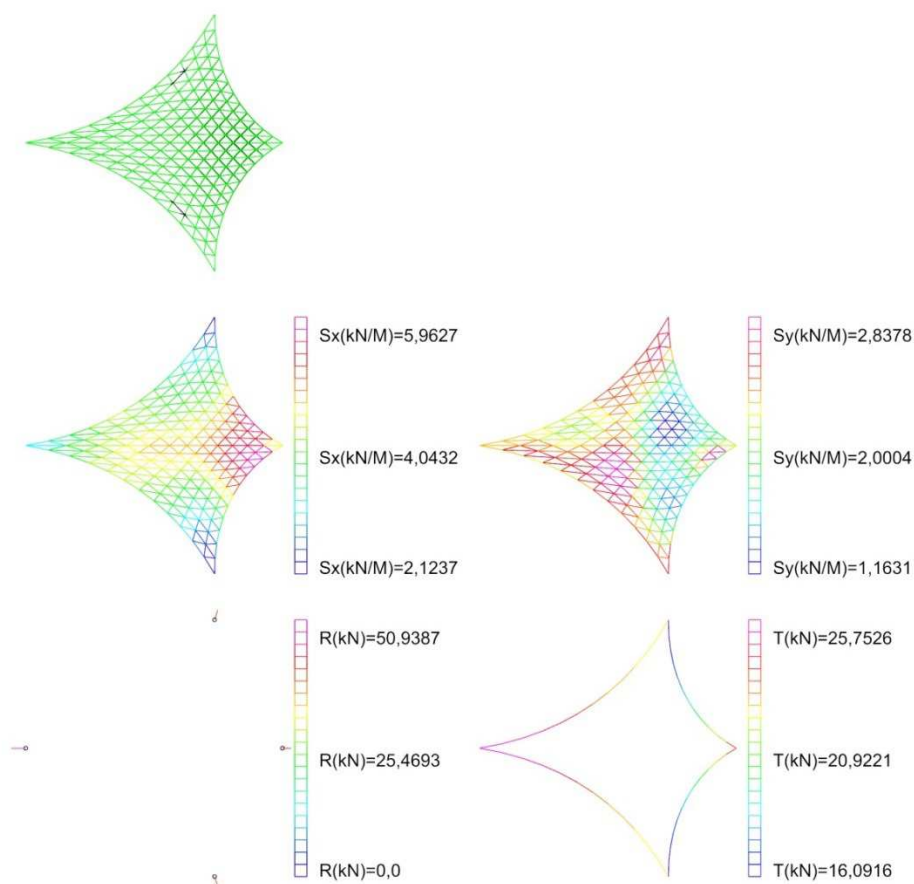


Slika 6-28: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablh (spodaj desno)

Zanimivo je opazovati pomike membrane, ki sovpadajo z obteženim območjem. Kjer membrana ni bila obtežena, se je ta dvignila. Napetosti v osnovni smeri niso večje kot v prejšnjem obteženem primeru, največje so enake $n_{xx} = 6,35\text{kN/m}$, v votkovni pa se te povečajo, največje so $n_{yy} = 5,37\text{kN/m}$. Največje reakcijske sile in sile v kabljih so zopet v bližini centralnega stebra.

Primer 3b

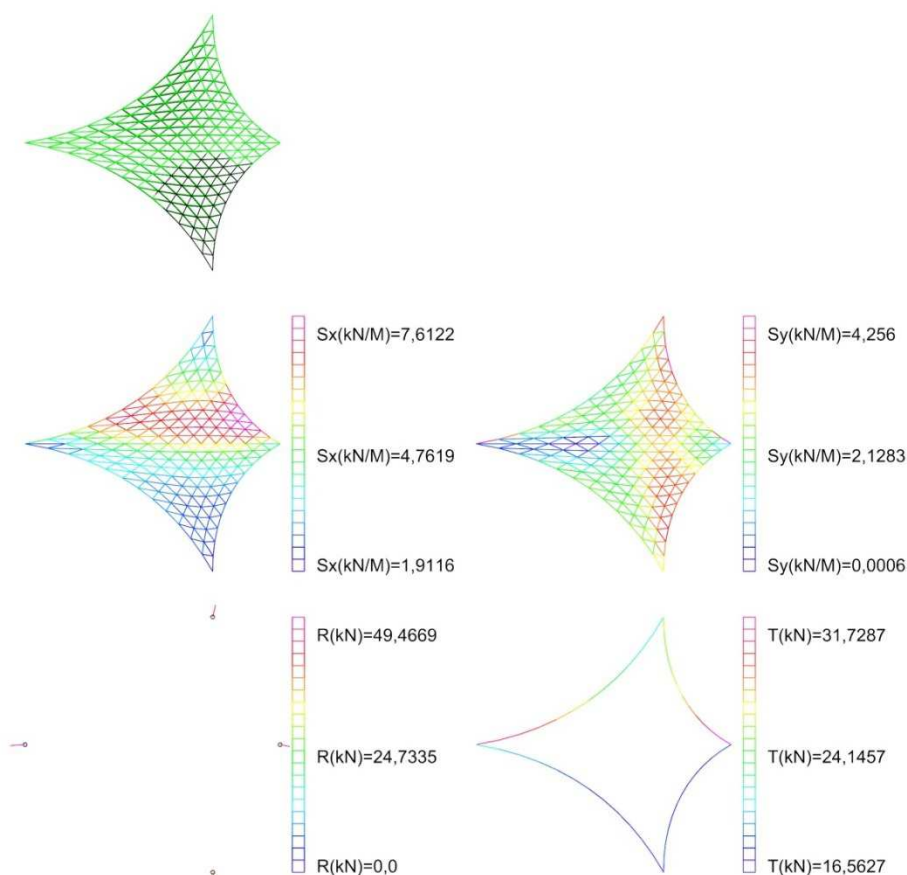
Iz primerjave pomikov v tem primeru ni jasno vidno, kako je bila konstrukcija obtežena, po celotni membrani so pomiki negativni. Napetosti v membrani so nekoliko manjše kot v prejšnjem primeru, in sicer $n_{xx} = 5,96\text{kN/m}$ ter $n_{yy} = 2,84\text{kN/m}$. V tem primeru so največje reakcijske sile ter sile v kabljih v okolici objekta, saj je obtežba nanešena na nasprotno stran.



Slika 6-29: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kabljih (spodaj desno) pri nesimetrični obtežbi s snegom po EC 1991

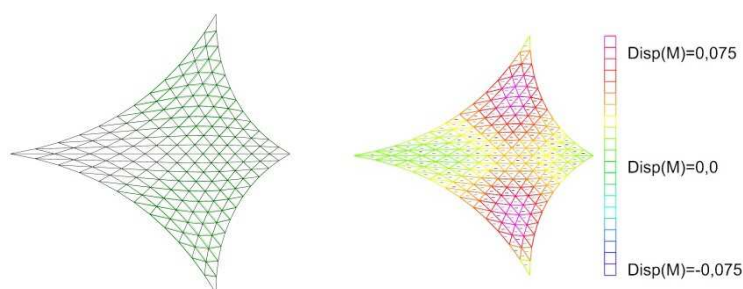
Primer 3c

Tudi v tem primeru so pomiki največji na območju, ki je obteženo. Napetosti v osnovni smeri so največje izmed obravnavanih asimetričnih primerov $n_{xx} = 7,61\text{kN/m}$. V votkovni smeri so največje napetosti enake $n_{yy} = 4,26\text{kN/m}$. Zanimivo je, da se v tem primeru reakcije in sile v kabljih izdatno zmanjšajo v okolici oglišča, ki je nasprotno obteženemu območju.



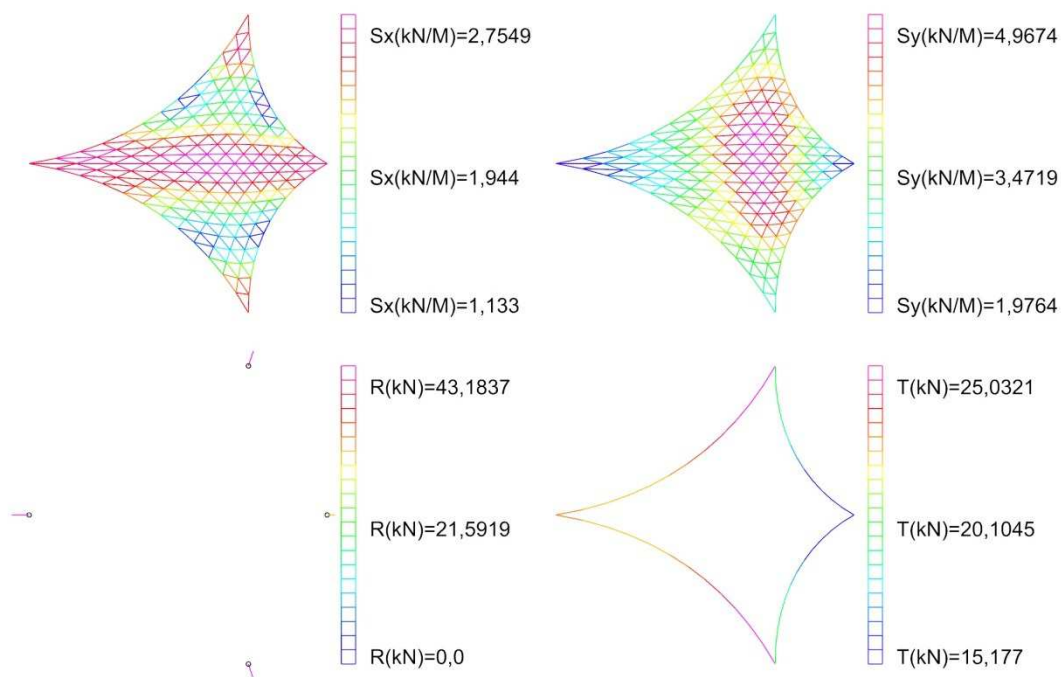
Slika 6-30: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno) pri nesimetrični obtežbi s snegom po EC 1991

4. Prednapetje + veter (srk, po EC 1991)



Slika 6-31: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo) ter pomiki (desno) zaradi obtežbe snega po EC 1991 za centralno membrano

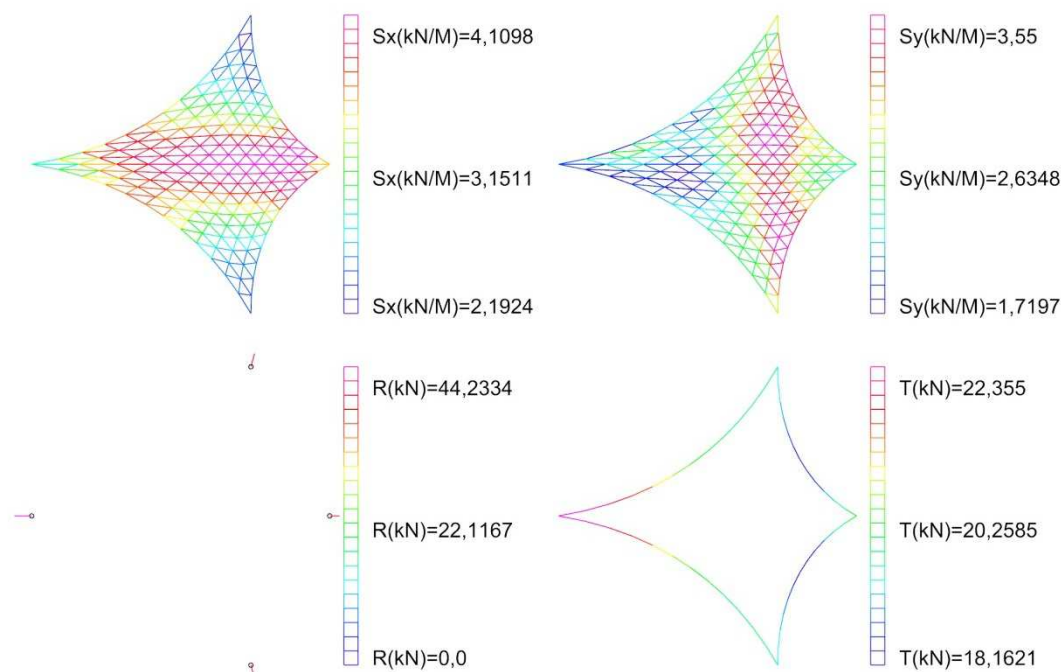
Obtežba zaradi vpliva vetra po standardu EC 1991 je v primerjavi z obtežbo zaradi snega veliko manjša, zato tudi spremembe notranjih sil niso tako drastične. V primerjavi z obtežbo zaradi snega, so tu pomiki pozitivni, torej v nasproti smeri gravitacijske sile ($w = 7,5\text{cm}$). Skladno z obtežbo se tu napetosti v osnovni smeri glede na stanje prednapetja zmanjšajo ($n_{xx} = 2,75\text{kN/m}$), napetosti v vtokovni smeri pa povečajo ($n_{yy} = 5,00\text{kN/m}$). Tako tudi največje reakcijske sile ter sile v kablji najdemo v bližini nizkih točk, torej desno in levo od centralnega stebra.



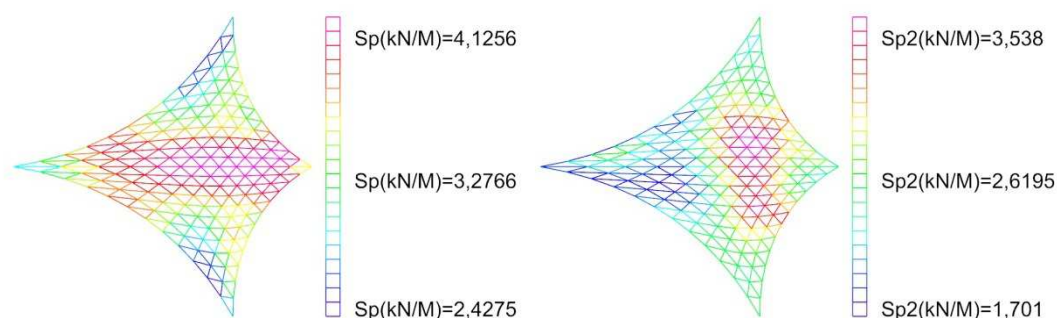
Slika 6-32: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)

5. Prednapetje + sneg (SIST EN 13782:2006)

Odziv je v tem primeru enak kot pri primeru s snegom po EC 1991, le notranje napetosti in sile so manjše, saj je obtežba veliko manjša. Napetosti v glavni smeri so torej $n_{xx} = 4,11\text{kN/m}$, v vtokovni pa $n_{yy} = 3,55\text{kN/m}$. Največje reakcijske sile in sile v kablji so za razliko od prej omenjenega primera v bližini objekta.



Slika 6-33: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)

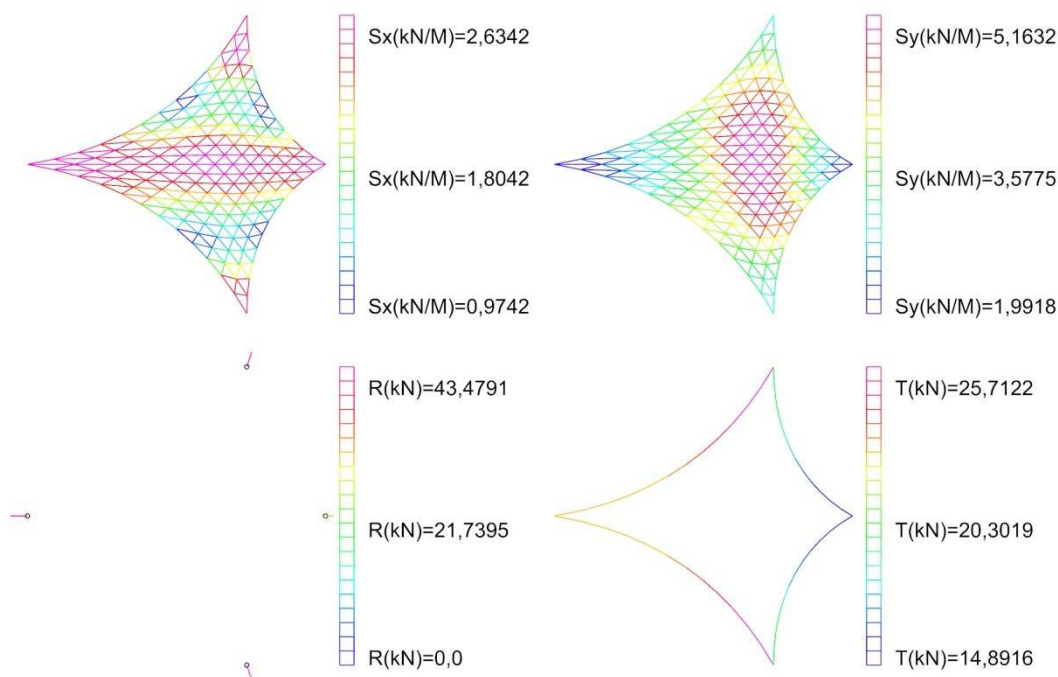


Slika 6-34: Napetosti v membrani v glavni smeri (levo) in drugi glavni smeri (desno) pri četrtem obtežnem primeru

Jasno je tudi videti, da v tem primeru nikakor ne bi prišlo do gubanja membrane (slika 6-34).

6. Prednapetje + veter (srk, SIST EN 13782:2006)

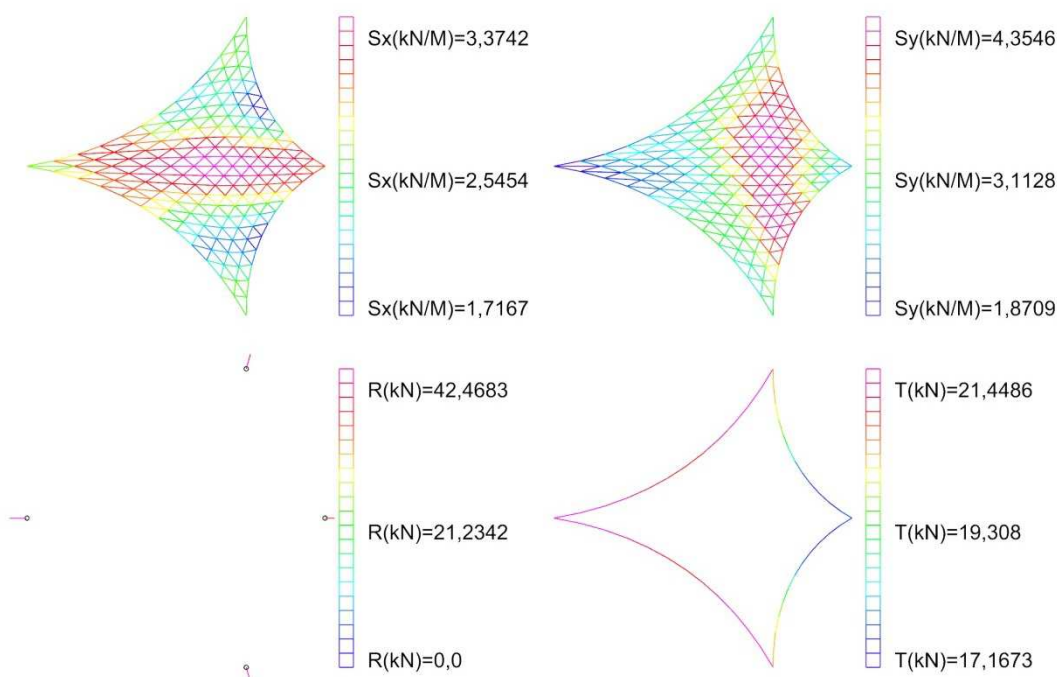
Tudi v tem primeru odziv konstrukcije ni bistveno drugačen kot pri prejšnjem primeru obtežbe zaradi vplivov vetra po EC 1991. Notranje napetosti se od omenjenega primera le malo spremenijo, največje vrednosti so $n_{xx} = 2,63\text{kN/m}$ ter $n_{yy} = 5,16\text{kN/m}$. Največje reakcije in sile v kabljih najdemo v bližini nizkih točk, kot je pričakovati, $R = 43,48\text{kN}$ ter $T = 25,71\text{kN}$.



Slika 6-35: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kabljih (spodaj desno)

7. Prednapetje + veter (srk, SIST EN 13782:2006, čez visoko točko)

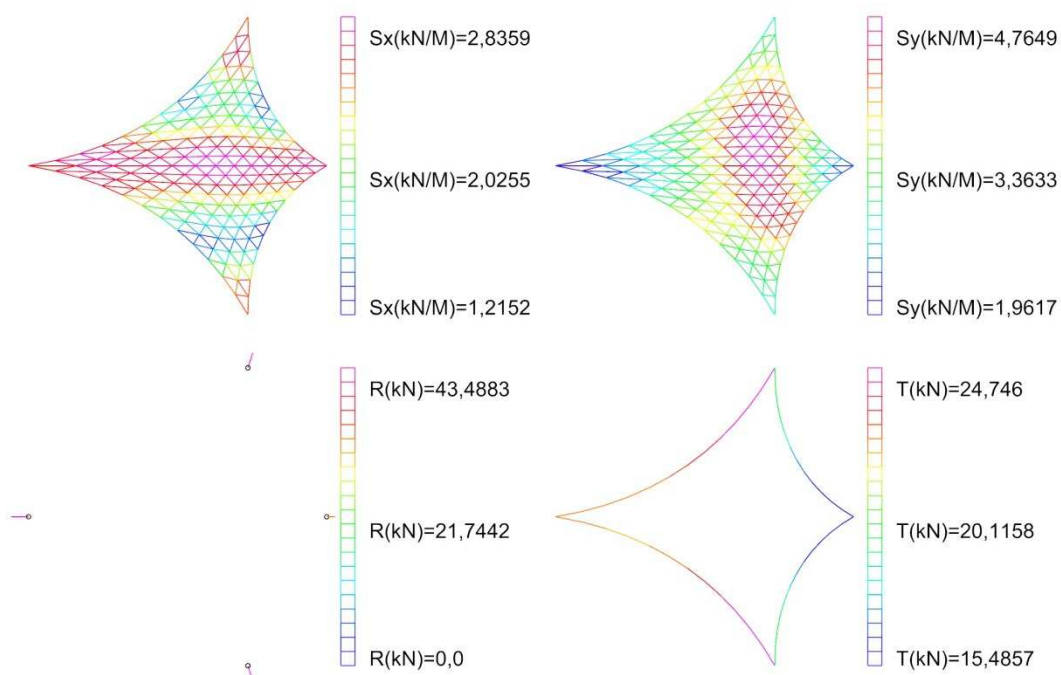
Pri obtežbi zaradi vpliva vetra, ki piha preko visoke točke se napetosti v obeh smereh nekoliko približajo ena drugi. Tako je največja napetost v osnovni smeri $n_{xx} = 3,37\text{kN/m}$ ter največja v votkovni $n_{yy} = 4,35\text{kN/m}$. Največje reakcijske sile in sile v kabljih so v tem primeru v bližini objekta $R = 42,47\text{kN}$ ter $T = 21,45\text{kN}$.



Slika 6-36: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)

8. Prednapetje + veter (srk, SIST EN 13782:2006, čez nizko točko)

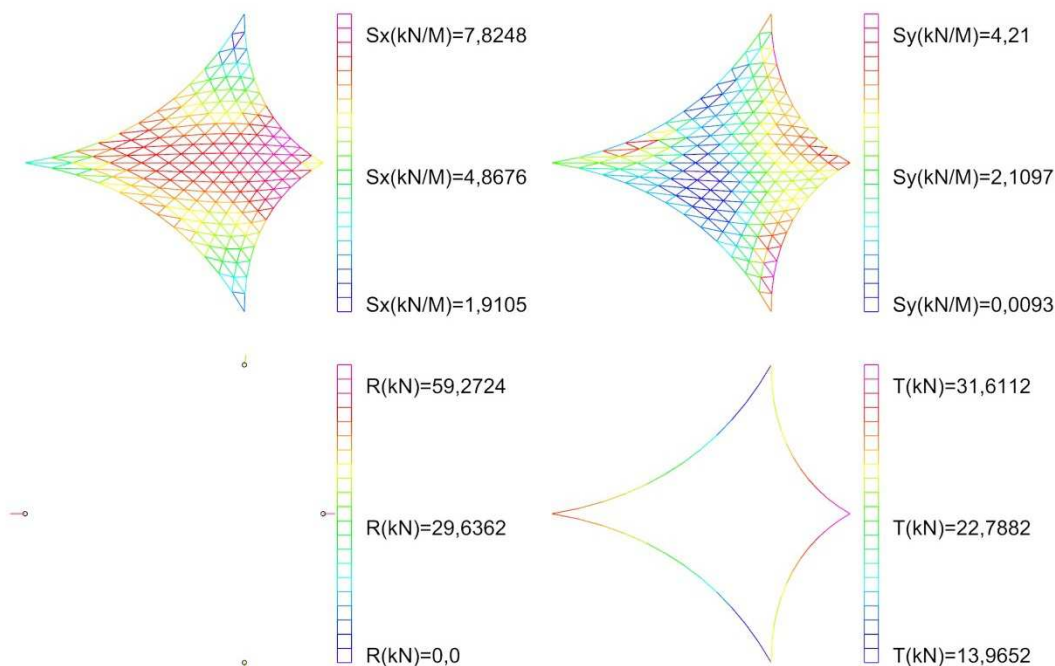
Rezultati analize so podobni kot v prejšnjih dveh primerih pri obteži z vetrom. Največje napetosti v osnovni in vtokovni smeri znašajo $n_{xx} = 2,84\text{kN/m}$ ter $n_{yy} = 4,76\text{kN/m}$. Največje reakcije so na mestu vpetja v objekt $R = 43,49\text{kN}$ in največje sile v kablji v bližini nizkih točk $T = 24,75\text{kN}$.



Slika 6-37: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)

9. Prednapetje + sneg (EC1) + ψ_0 veter (srk, EN 13782, visoka točka)

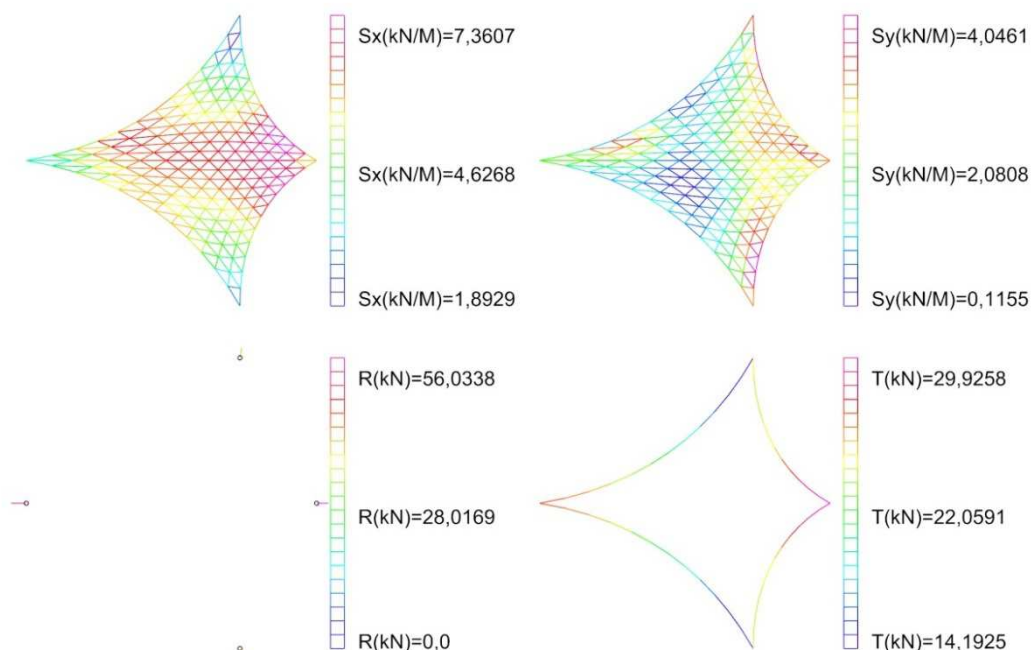
Pri kombinaciji obtežb zaradi vpliva snega in vetra prevladuje vpliv snega, kot smo to tudi predvideli. To lahko razberemo iz rezultatov notranjih napetosti, saj so se v primerjavi s stanjem prednapetja najbolj povečale napetosti v osnovni smeri ($n_{xx} = 7,82\text{kN/m}$), pri napetostih v votkovni smeri pa ni bilo tako velikega povečanja ($n_{yy} = 4,21\text{kN/m}$). Tako največje reakcijske sile ($R = 59,27\text{kN}$) kot največje sile v kablh ($T = 31,16\text{kN}$) najdemo v bližini centralnega stebra.



Slika 6-38: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablh (spodaj desno)

10. Prednapetje + sneg (EC 1991) + ψ_0 veter (srk, SIST EN 13782:2006, čez nizko točko)

V tem primeru dobimo podoben odziv kot v predhodnem, največje napetosti v osnovni smeri so $n_{xx} = 7,36\text{kN/m}$, v votkovni smeri $n_{yy} = 4,05\text{kN/m}$, največje reakcijske sile $R = 56,04\text{kN}$, največje sile v kablh pa $T = 31,16\text{kN}$.

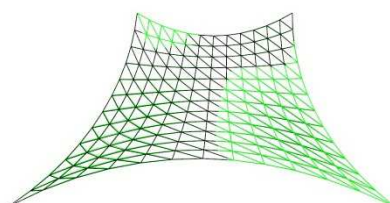


Slika 6-39: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablih (spodaj desno)

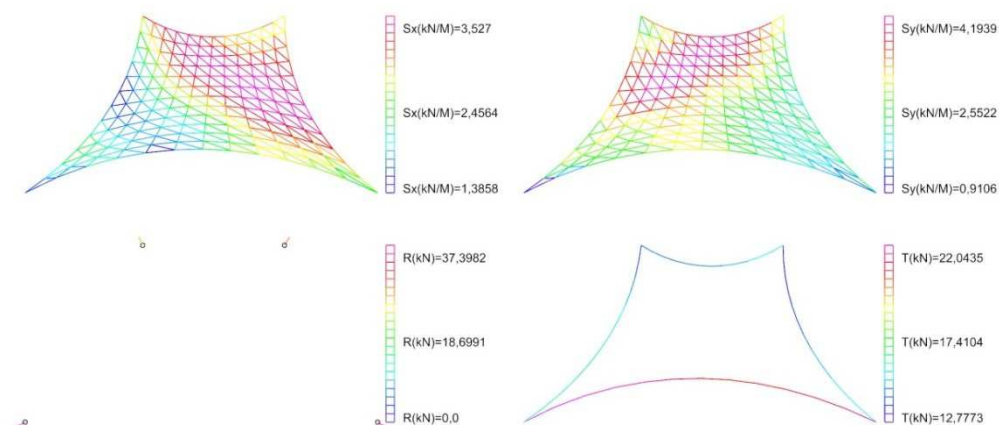
6.3.6.2 STRANSKI SEDLI

1. Prednapetje

Iz primerjave oblike sedla je razvidno, da so v prednapetem stanju rahlo večje napetosti v vtokovni smeri, saj se membrana v osnovni smeri rahlo dvigne. Napetosti v osnovni smeri narastejo na $n_{xx} = 3,53\text{kN/m}$, v vtokovni smeri pa na $n_{yy} = 4,19\text{kN/m}$. Največje reakcijske sile ($R = 37,40\text{kN}$) se pojavijo na objektu, medtem ko so največje sile v kablh v najdaljšem izmed njih ($T = 22,04\text{kN}$).



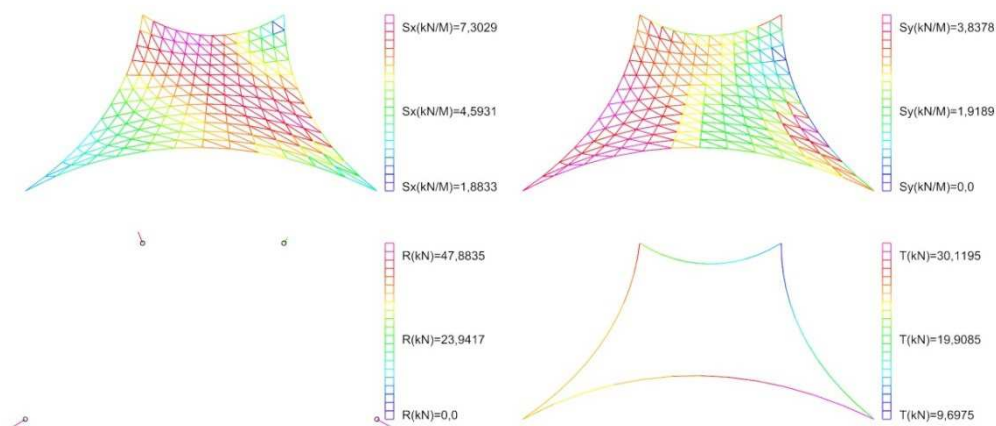
Slika 6-40: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike stranskega sedla ob vnosu prednapetja



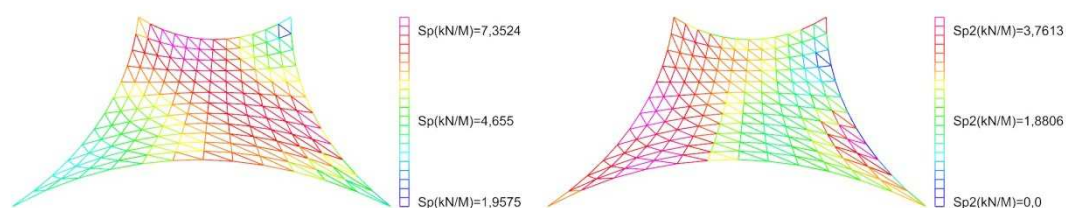
Slika 6-41: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kabljih (spodaj desno) pri prvem obtežnem primeru

2. Prednapetje + sneg (EC 1991)

Podobno kot v primeru centralne membrane se izdatno povečajo napetosti v osnovni smeri ($n_{xx} = 7,30\text{kN/m}$), v vtokovni pa se znižajo na $n_{yy} = 3,84\text{kN/m}$. Največje reakcijske sile $R = 47,88\text{kN}$ se pojavijo ob centralnem stebru, prav tako največje sile v kabljih pa $T = 30,12\text{kN}$. Pri pregledu napetosti v smeri glavnih smeri smo opazili, da bi lahko do gubanja prišlo v kotu, ki je blizu desnemu nižjemu stebru. Površina, ki je kritična, je zelo majhna, tako da temu ne pripisujemo posebne pozornosti, saj je ta lahko tudi rezultat napake v izračunu.



Slika 6-42: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kabljih (spodaj desno) pri drugem obtežnem primeru

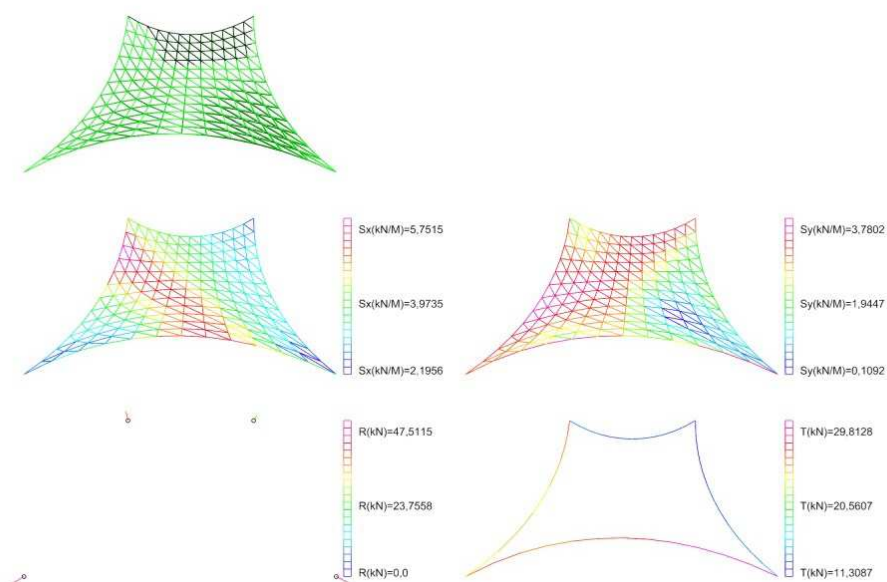


Slika 6-43: Napetosti v membrani v glavni smeri (levo) in drugi glavni smeri (desno) pri drugem obtežnem primeru

3. Prednapetje + sneg (EC 1991, nesimetrično porazdeljen)

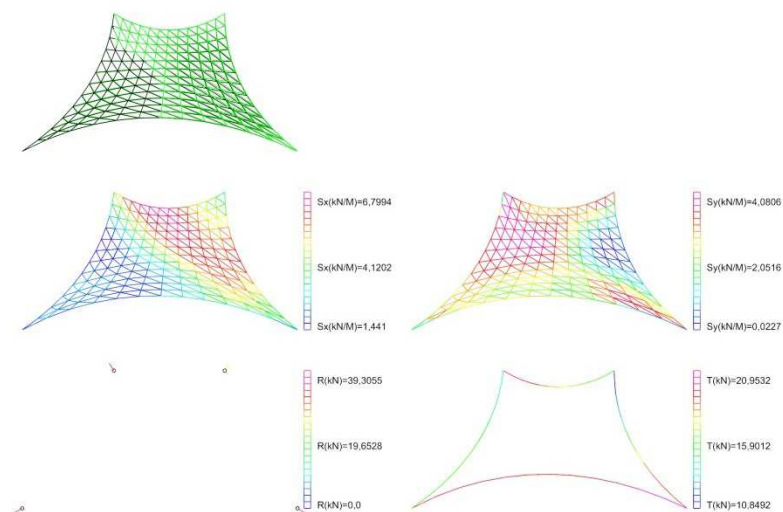
V naslednjih obravnavanih primerih večjih presenečenj v odzivu konstrukcije ni. Kot smo že v prejšnjih primerih ugotovili, se večinoma konstrukcija na mestu vnosa obtežbe premakne navzdol, drugod se večinoma malce dvigne. Nobene izmed napetosti v osnovni smeri niso presegle največjih v primeru nesimetrične porazdelitve (2. obtežni primer). Vrednosti se gibljejo od približno 5 kN/m do 7 kN/m. Napetosti v vtokovni smeri so nekoliko večje, največja v naslednjih 4 primerih doseže vrednost 4,94 kN/m. V zadnjem primeru se pojavi tudi območje, v katerem bi lahko prišlo do gubanja tkanine, vendar smo pri preverjanju napetosti v glavnih smereh ugotovili, da območje ni večje kot v primeru simetrično porazdeljenega snega. Največje reakcije se gibljejo okoli vrednosti 40 kN. Največje sile v kabljih se v vsakem primeru pojavijo v najdaljšem kablju. Vrednosti se gibljejo od 20 do 30 kN.

Primer 3a



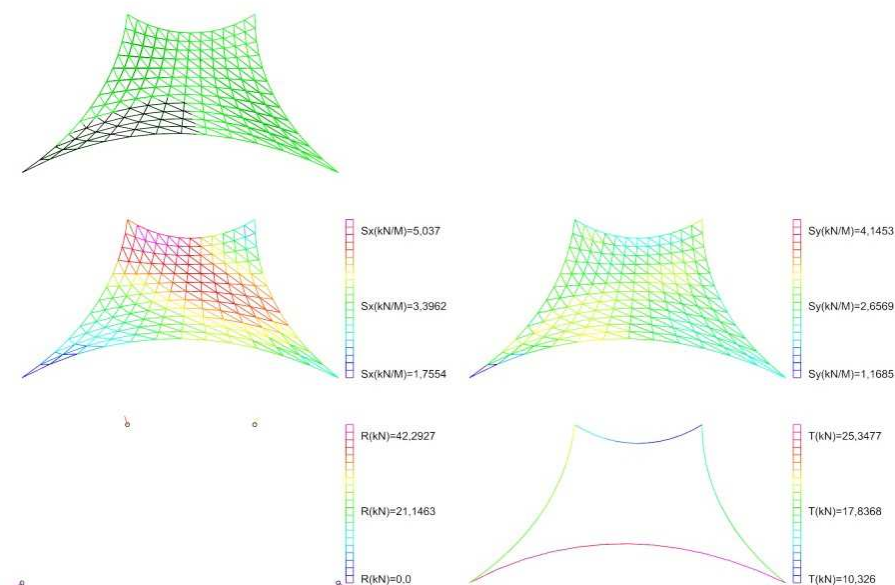
Slika 6-44: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kabljih (spodaj desno) pri nesimetrični obtežbi s snegom po EC 1991, primer 3a

Primer 3b



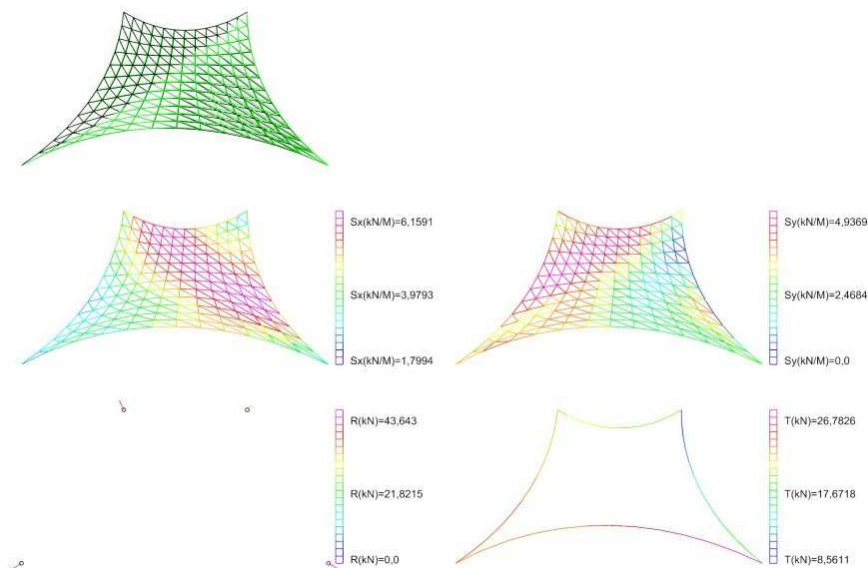
Slika 6-45: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablju (spodaj desno) pri nesimetrični obtežbi s snegom po EC 1991, primer 3b

Primer 3c



Slika 6-46: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v votkovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablju (spodaj desno) pri nesimetrični obtežbi s snegom po EC 1991, primer 3c

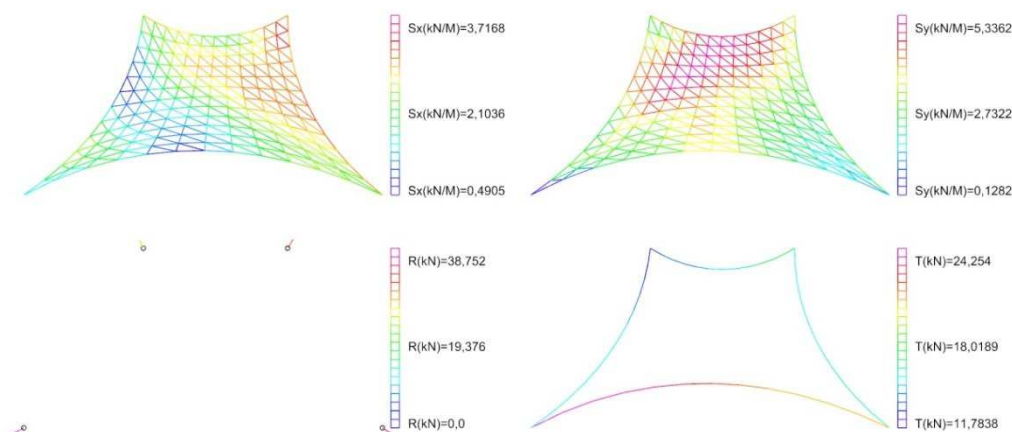
Primer 3d



Slika 6-47: Primerjava začetne (zelena) in deformirane (črna) oblike centralnega sedla (levo skrajno zgoraj) ter napetosti v membrani v osnovni smeri (sredina levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (sredina desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno) pri nesimetrični obtežbi s snegom po EC 1991, primer 3d

4. Prednapetje + veter (srk, EC 1991)

Pri obtežbi z vetrom po EC 1991 so napetosti v osnovni smeri enake $n_{xx} = 3,72\text{kN/m}$, v vtokovni pa na $n_{yy} = 5,34\text{kN/m}$. Največje reakcijske sile so $R = 38,75\text{kN}$ in se pojavijo ob objektu, prav tako največje sile v kablji ($T = 24,25\text{kN}$).

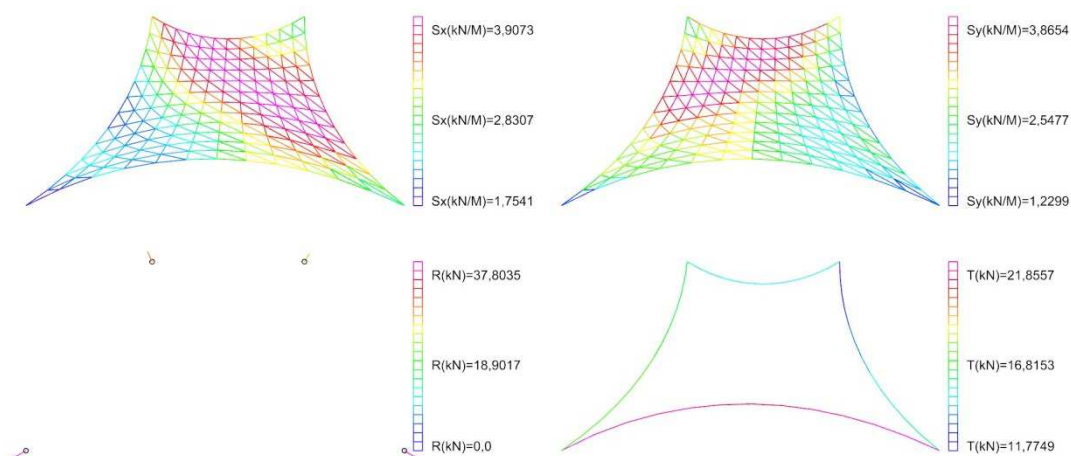


Slika 6-48: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)

5. Prednapetje + sneg (SIST EN 13782:2006)

Odziv konstrukcije na obtežbo snega po standardu SIST EN 13782:2006 je pričakovan, vendar so prirastki napetosti v osnovni smeri zelo majhni ($n_{xx} = 3,91\text{kN/m}$). V vtokovni smeri so upadi nekoliko večji, največja napetost je tako $n_{yy} = 3,87\text{kN/m}$. Največje reakcijske sile

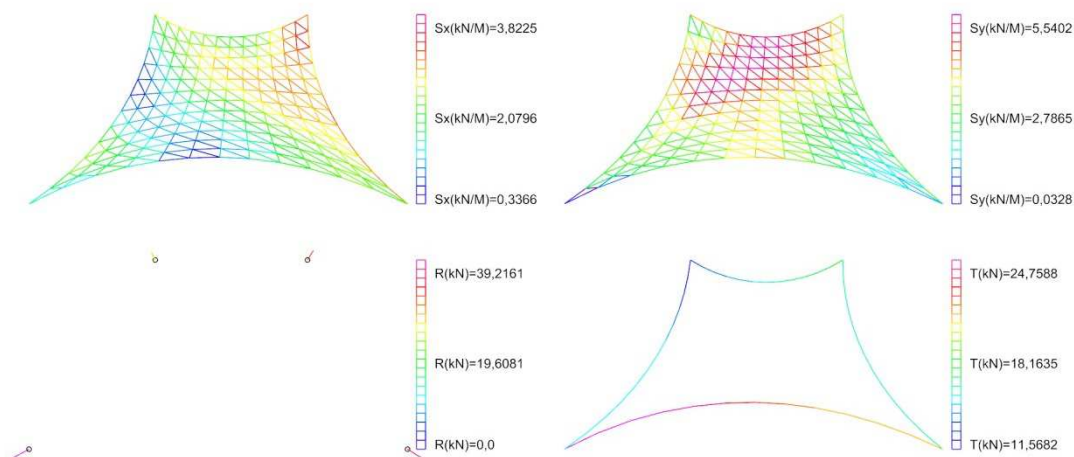
$R = 37,80\text{kN}$ se pojavijo ob objektu, največje sile v kablh pa zopet na najdaljšem kablh ($T = 21,86\text{kN}$).



Slika 6-49: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablh (spodaj desno)

6. Prednapetje + veter (srk, SIST EN 13782:2006)

Odziv konstrukcije na obtežbo snega po standardu SIST EN 13782:2006 je pričakovan. Nekoliko se zmanjšajo napetosti v smeri visečega loka ($n_{xx} = 3,82\text{kN/m}$), v smeri stoječega pa se povečajo na $n_{yy} = 5,54\text{kN/m}$. Največje reakcijske sile $R = 29,22\text{kN}$ se pojavijo ob objektu, največje sile v kablh pa zopet na najdaljšem kablh ($T = 24,76\text{kN}$).

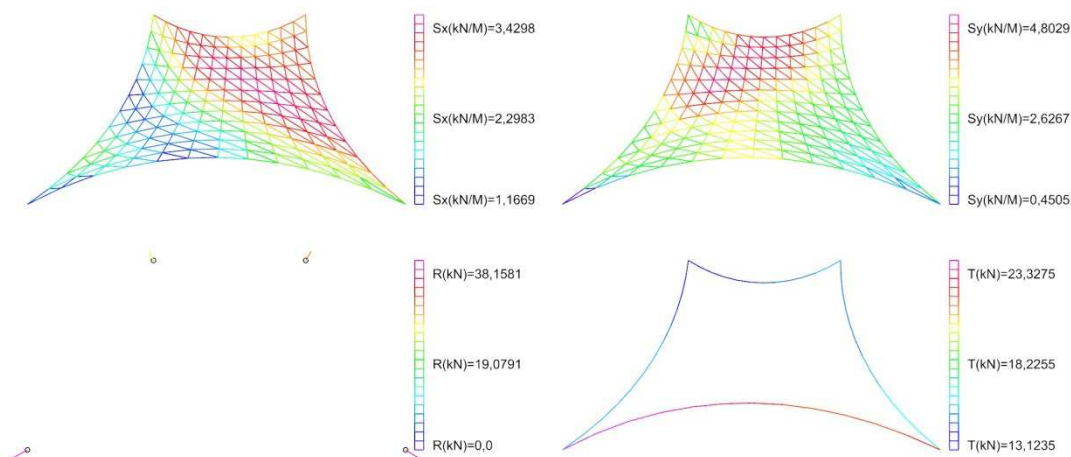


Slika 6-50: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablh (spodaj desno)

7. Prednapetje + veter (srk, SIST EN 13782:2006, čez visoko točko)

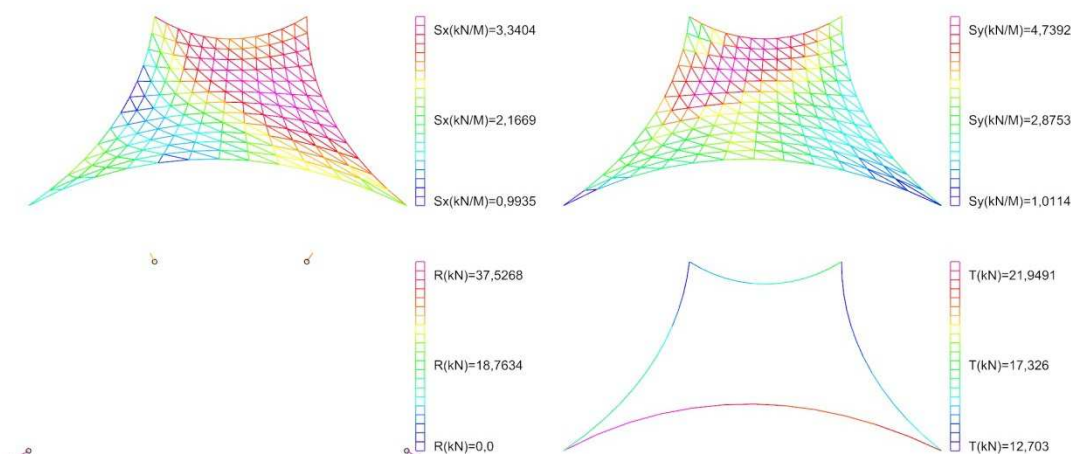
V naslednjih dveh primerih smo dobili podobne rezultate. Notranje napetosti v osnovni smeri so se v obeh primerih gibale okoli $3,4\text{ kN/m}$, v vtokovni smeri pa okoli $4,8\text{ kN/m}$. Prav tako smo podobne rezultate dobili pri reakcijskih silah ter silah v kablh.

Primer 7a



Slika 6-51: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)

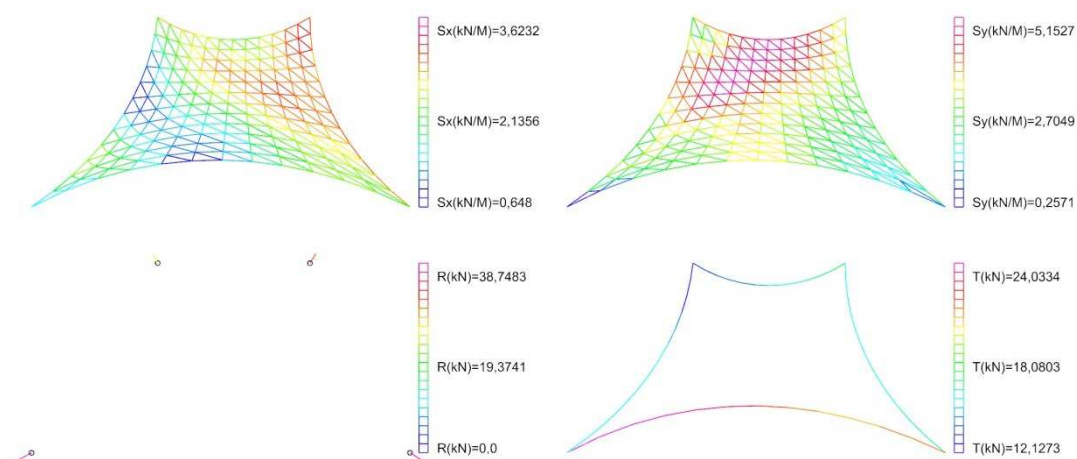
Primer 7b



Slika 6-52: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)

8. Prednapetje + veter (srk, SIST EN 13782:2006, čez nizko točko)

Pri pihanju čez nizko točko so se napetosti v smeri stoječega loka povečale na $n_{yy} = 5,15\text{kN/m}$, v smeri visečega pa na $n_{xx} = 3,62\text{kN/m}$. Največje reakcijske sile so $R = 38,75\text{kN}$ ob objektu, največje sile v kablji pa na najdaljšem kablju ($T = 24,03\text{kN}$).

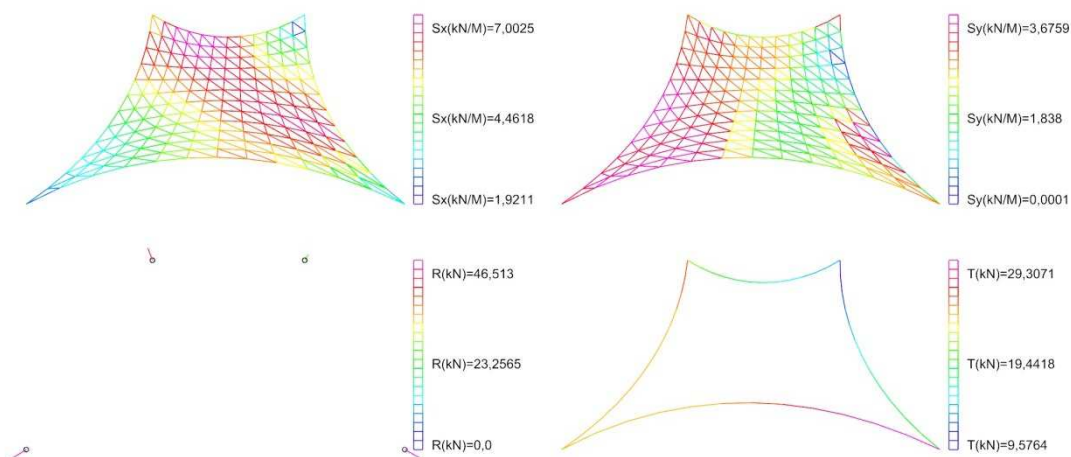


Slika 6-53: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)

9. Prednapetje + sneg (EC 1991) + ψ_0 veter (srk, SIST EN 13782:2006, čez visoko točko)

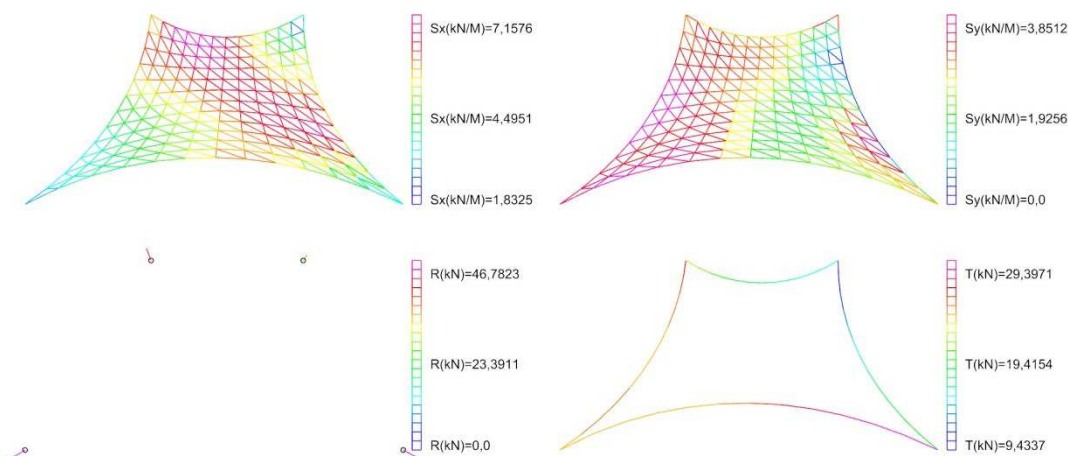
Tudi naslednja dva primera se ne bistveno razlikujeta med sabo. Notranje napetosti v osnovni smeri so se v obeh primerih gibale okoli 7,0 kN/m, v vtokovni smeri pa okoli 3,7 kN/m. Prav tako smo podobne rezultate dobili pri reakcijskih silah ter silah v kablji.

Primer 9a



Slika 6-54: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)

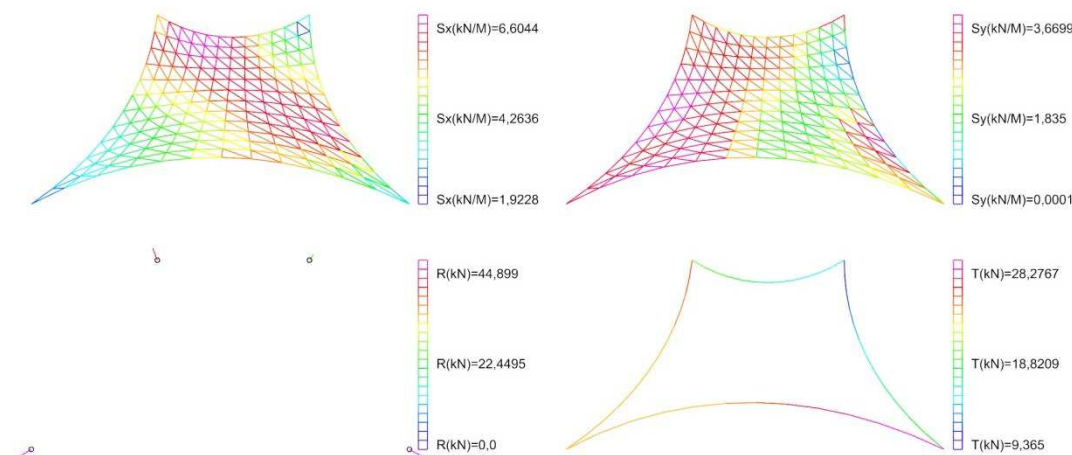
Primer 9b



Slika 6-55: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)

10. Prednapetje + sneg (EC 1991) + ψ_0 veter (srk, EN 13782:2006, čez nizko točko)

V zadnjem primeru lahko opazimo nekolikošnje znižanje napetosti v vtokovni smeri v primerjavi z rezultati analize obtežbe snega, ki ni bila kombinirana z obtežbo zaradi vplivov vetra. Vrednosti notranjih napetosti v osnovni smer so $n_{xx} = 6,60\text{kN/m}$, v vtokovni smeri pa na $n_{yy} = 3,67\text{kN/m}$. Največje reakcijske sile so $R = 44,90\text{kN}$, največje sile v kablji pa na najdaljšem kablju ($T = 28,28\text{kN}$).



Slika 6-56: Napetosti v membrani v osnovni smeri (zgoraj levo), napetosti v membrani v vtokovni smeri (zgoraj desno), reakcijske sile (spodaj levo) in sile v kablji (spodaj desno)

6.3.6.3 SKUPAJ

V spodnjih preglednicah so zbrani podatki o kritičnih vrednostih napetosti ter notranjih silah v membrani ter kablji kot tudi reakcije na mestu vpetja. Iz rezultatov lahko razberemo, da so najbolj kritični primeri tisti, ki predstavljajo največje obtežbe v smeri gravitacijske sile (2. obtežni primer) ter v nasprotni smeri (6. obtežni primer). Pri centralnem sedlu so se v votkovni smeri pojavile največje napetosti pri obtežnem primeru z nesimetrično porazdelitvijo snega, vendar te niso veliko večje od tistih, ki smo jih dobili v obtežnem primeru s srkom vetra (6. obtežni primer). Zaključimo lahko, da bi bila naša analiza ravno tako zadovoljiva, če bi upoštevali le 3 obtežne primere, in sicer 1. s prednapetjem, 2. z obtežbo snega po EC 1991, razporejeno po celotni konstrukciji ter 6. z obtežbo zaradi vpliva vetra po SIST EN 13782, razporejeno enakomerno po celotni konstrukciji. Največje vrednosti so v preglednici označene.

Preglednica 6-5: Največje napetosti in notranje sile v membrani ter kablji glede na obravnavane obtežne primere

Obtežni primer	Centralno sedlo			Stransko sedlo		
	Membrana		Kabli	Membrana		Kabli
	Osnovna smer n_{xx} [kN/m]	Votkovna smer n_{yy} [kN/m]	T [kN]	Osnovna smer n_{xx} [kN/m]	Votkovna smer n_{yy} [kN/m]	T [kN]
1	3,61	3,92	22,12	3,53	4,19	22,04
2	8,06	4,11	31,93	7,30	3,84	30,12
3a	6,35	5,37	27,75	5,04	4,15	25,35
3b	5,96	2,84	25,75	6,16	4,94	26,78
3c	7,61	4,26	31,73	5,75	3,78	29,81
3d	/	/	/	6,80	4,08	20,95
4	2,75	4,97	25,03	3,72	5,34	24,25
5	4,11	3,55	22,36	3,91	3,87	21,86
6	2,63	5,16	25,71	3,82	5,54	24,76
7a	3,37	4,35	21,45	3,43	4,80	23,33
7b	/	/	/	3,34	4,74	21,95
8	2,84	4,76	24,75	3,62	5,15	24,03
9a	7,82	4,21	31,61	7,00	3,68	29,31
9b	/	/	/	7,16	3,85	29,40
10	7,36	4,05	29,93	6,60	3,67	28,28

Preglednica 6-6: Reakcije na mestu vpetja membran glede na obravnavane obtežne primere

Reakcije R [kN]	Centralno sedlo					Stransko sedlo				
	Centralni steber	Desni steber	Levi steber	Zadnji levi/desni steber	Objekt	Centralni steber	Desni steber	Levi steber	Zadnji levi/desni steber	Objekt
1	33,07	39,02	39,02	/	43,80	35,59	25,40	/	24,60	37,40
2	59,86	37,12	37,12	/	54,05	47,88	20,99	/	41,05	45,52
3a	51,96	41,41	41,41	/	49,97	42,29	22,96		30,50	40,90
3b	43,41	37,14	37,14	/	50,94	43,09	24,55		36,40	43,64
3c	47,04	43,41	33,72	/	49,47	43,83	22,25		35,29	47,51
3d	/	/	/	/	/	39,31	24,12		30,86	35,21
4	28,68	42,71	42,71	/	43,18	35,19	28,57	/	22,08	38,75
5	36,87	37,69	37,69	/	44,23	36,64	23,95	/	26,78	37,80
6	28,08	43,48	43,48	/	43,27	35,35	29,24	/	21,81	39,22
7a	32,73	40,42	40,42	/	42,47	36,31	26,63	/	23,60	38,16
7b	/	/	/	/	/	34,61	26,51	/	24,14	37,53
8	29,41	42,58	42,45	/	43,49	35,37	28,26	/	22,43	38,75
9a	59,27	37,50	37,50	/	52,83	46,51	20,50	/	39,55	44,39
9b	/	/	/	/	/	46,78	21,21	/	40,37	44,96
10	56,04	36,69	36,62	/	50,68	44,90	20,74	/	38,24	43,60

6.4 DIMENZIONIRANJE

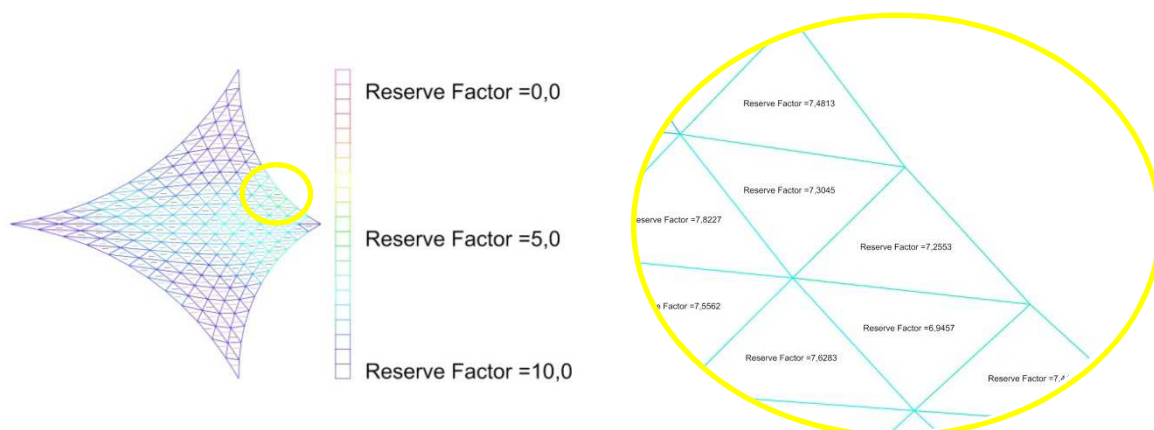
Kot smo že omenili, je za dimenzioniranje membrane bolj primerna metoda dovoljenih napetosti, čeprav evrokod standard, ki je veljaven v Sloveniji, predpisuje metodo mejnih stanj. Ne glede na to je dovoljeno projektiranje po drugih metodah, če se z njimi lahko doseže enako ali večjo varnost konstrukcije, kot jo standard predpisuje.

Za projektiranje membran po metodi dovoljenih napetosti se je v Evropski uniji in drugje po svetu oblikovalo kar nekaj študij ter predpisov [12]. Najtežja naloga je predpisovanje ustreznih faktorjev varnosti, saj so tkanine občutljive na veliko dejavnikov, s faktorji pa je potrebno zavzeti prav vse možnosti oslabitve ali porušitve membrane. Ne glede na različne pristope pa [12] zaključuje, da se najmanjši varnostni faktorji za membrane gibljejo okoli 5, za povezave in napetostne konice pa 7. Čeprav v obravnavanih študijah ni bilo obravnavano širjenje raztrganin ter pretrg šivov zaradi lezenja pri visokih temperaturah [12], smo po nadaljnjem študiju literature in na podlagi rezultatov vaje, ki so jo izvedle priznane fakultete s celega sveta [40] zaključili, da je povprečen faktor za obtežbe s snegom, ki ga uporabljajo različni inženirji, enak 5,0. Zato bomo za dimenzioniranje membrane v osnovni smeri uporabili ta faktor. Za dimenzioniranje v votkovni smeri, na kateri bodo prečno potekali zvari, bomo po priporočilih [12] uporabili varnostni faktor 7,0, s tem da bomo natezno trdnost membrane zmanjšali za 30%. Razlog za to je, da nimamo nikakršnih testov zvarov, zato ne poznamo njihove dejanske odpornosti, vendar Forster in sodelavci predpisujejo, da morajo zvari med kroji tkanine izkazovati vsaj 70% odpornosti nedotaknjene tkanine [12]. Za kable bomo prav tako po priporočilih [12] upoštevali varnostni faktor 2,5. Ostale dele konstrukcije, predvsem elemente podporne strukture, bomo dimenzionirali v skladu z evrokodom po metodi mejnih stanj.

6.4.1 MEMBRANA

Kontrola odpornosti

V centralni membrani nastopi največja vrednost notranjih napetosti v osnovni smeri pri 2. obtežnem primeru, in sicer $n_{xx} = 8,06\text{kN/m}$. S programom MPanel FEA preverimo stopnjo varnosti, ki jo v tem obtežnem primeru membrana zagotavlja.

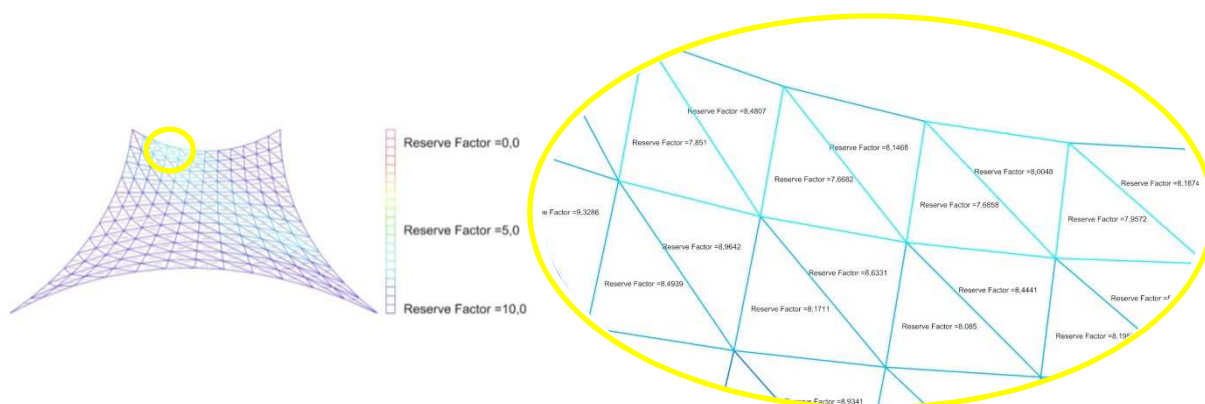


Slika 6-57: Varnostni faktor v centralni membrani pri obtežnem primeru št. 2 in povečava območja z najnižjimi faktorji

Iz zgornje slike je razvidno, da faktor varnosti nikjer na membrani ne pade pod 5,0. Najnižji faktorji se gibljejo okoli 7,0. Rezultate iz programa podkrepimo še z računom.

$$n_{xx} = 8,06\text{kN/m} < n_{xx,Rd} = \frac{f_{ux}}{5} = \frac{56\text{kN/m}}{5} = 11,2\text{kN/m}$$

Tudi v stranskem jadrju je kritičen drugi obtežni primer ($n_{xx} = 7,30\text{kN/m}$), ki ga prav tako preverimo s programom in podkrepimo z računom. Zaključimo lahko, da nikjer na membrani ne bo varnostni faktor padel pod 5,0.



Slika 6-58: Varnostni faktor v stranski membrani pri obtežnem primeru št. 2 in povečava območja z najnižjimi faktorji

$$n_{xx} = 7,30\text{kN/m} \leq n_{xx,Rd} = \frac{f_{ux}}{5} = \frac{56\text{kN/m}}{5} = 11,2\text{kN/m}$$

V votkovni smeri bomo tako v centralni kot v stranskih membranah prečno postavili povezave med kroji tkanine. Kot smo že omenili, bomo zato zmanjšali odpornost membrane v tej smeri ter upoštevali večji varnostni faktor 7,0.

Največje napetosti v votkovni smeri so v centralni membrani $n_{yy} = 5,37\text{kN/m}$, v stranski pa $n_{yy} = 5,54\text{kN/m}$. Odpornost membrane v votkovni smeri tako zmanjšamo za 30%, torej

$$f_{us} = 0,7f_{uy} = 0,7 \cdot 56\text{kN/m} = 39,2\text{kN/m}$$

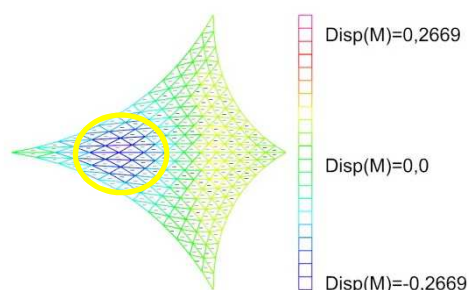
Izvedemo kontrolo z varnostnim faktorjem 7,0.

$$n_{yy} = 5,54\text{kN/m} \leq n_{yy,Rd} = \frac{f_{us}}{7} = \frac{39,2\text{kN/m}}{7} = 5,6\text{kN/m}$$

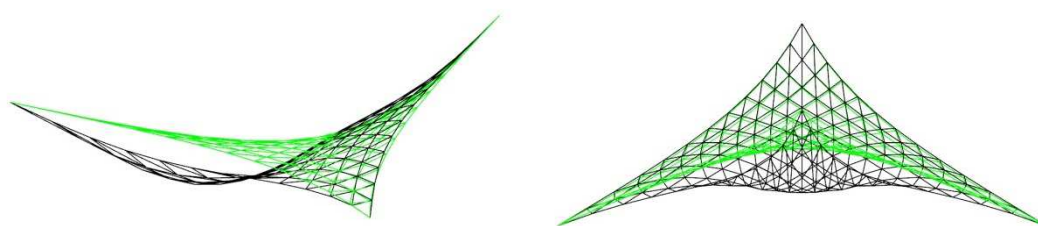
Kontrola se izide.

Zbiranje vode ali snega na membrani

Preveriti moramo tudi, da pri obsežnih padavinah ne pride do zbiranja vode na membrani, saj bi to lahko povzročilo oslabitev tkanine ali celo porušitev. Največji pomiki membrane v primeru centralne membrane nastanejo ob nanosu obtežbe snega po EC 1991 nesimetrično (obtežni primer 13a). Poblizje smo si ogledali mesto na membrani, kjer so pomiki največji.

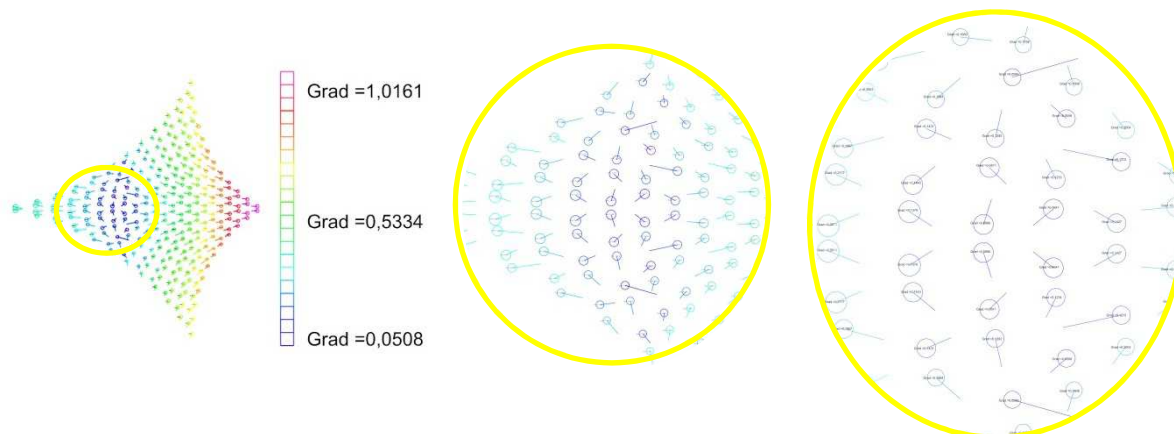


Slika 6-59: Pomiki centralne membrane pri obtežnem primeru 3a z označenim območjem največjih pomikov



Slika 6-60: Primerjava predvidene oblike membrane ter oblike po nanosu obtežbe po obtežnem primeru 3a s trikratno povečavo pomikov

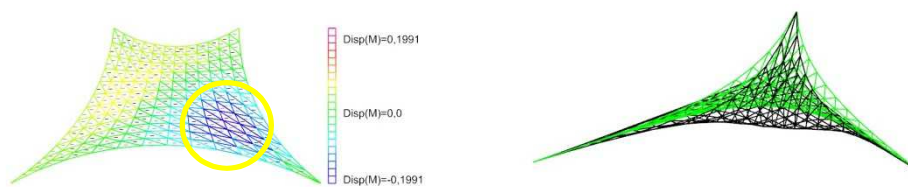
Ob trikratnem povečanju pomikov in primerjavi oblike z izhodiščno je jasno, da bi na tem območju lahko prišlo do pojava zadrževanja vode. Končno razsodbo prepustimo gradientom.



Slika 6-61: Gradienti membrane in povečave kritičnih območij

Gradienti so po celotni membrani pozitivni, njihove smeri pa se v nobenem območju ne stekajo v isto točko. Torej do pojava zadrževanja vode ne bo prišlo [34].

Isti postopek smo opravili tudi na stranski membrani. Tukaj je bil kritičen obtežni primer 3b.



Slika 6-62: Pomiki stranske membrane pri obtežnem primeru 3b z označenimi največjimi pomiki (levo) ter primerjava med osnovno in obliko po nastopu obtežbe s trikrat povečanimi pomiki (desno)

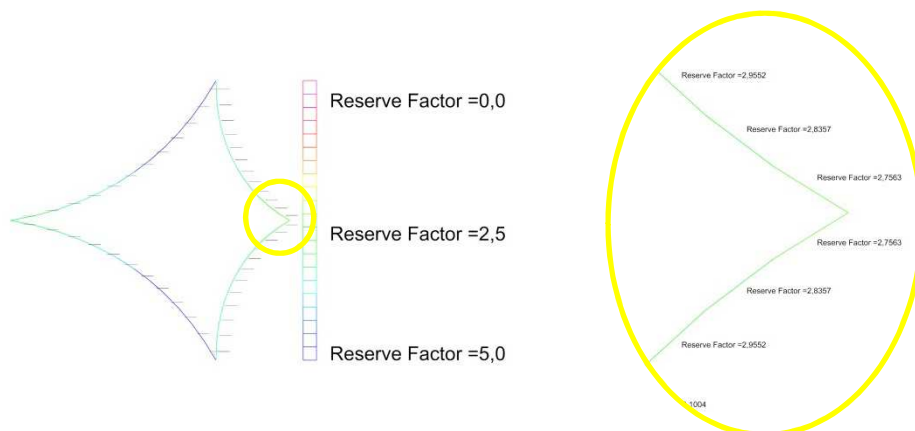


Slika 6-63: Gradienti na membrani ter povečava kritičnega območja

Ob pregledu gradientov v kritičnem območju lahko potrdimo, da do zadrževanja vode na tem območju ne pride.

6.4.2 ROBNİ KABLI

Kot smo poprej izvedli dimenzioniranje membrane, napravimo tudi za kable.



Slika 6-64: Varnostni faktor v robnih kablji centralne membrane pri obtežnem primeru št. 2 in povečava območja z najnižjimi faktorji

$$F_{Ed} = 31,93\text{kN} \cdot 2,5 = 79,83\text{kN} \leq F_{Rd} = 88\text{kN}$$

Kontrola robnih kablov centralne membrane se izide.



Slika 6-65: Varnostni faktor v robnih kablji stranske membrane pri obtežnem primeru št. 2 in povečava območja z najnižjimi faktorji

$$F_{Ed} = 30,12\text{kN} \cdot 2,5 = 75,3\text{kN} \leq F_{Rd} = 88\text{kN}$$

Tudi kontrola robnih kablov stranske membrane se izide. Glede na to, da so vrednosti obremenitve na robu odpornosti kablov, bi bilo smiselno razmisliti o povečavi prereza kablov. Ob izbiri drugačnih kablov moramo ponovno statično analizirati konstrukcijo.

6.4.3 STEBRI

Stebre smo dimenzionirali v skladu z evrokod standardom, in sicer EC 1993, ki obravnava konstrukcije iz jekla. Najprej smo morali dobiti vrednosti največjih sil in momentov, ki se lahko v stebrih in na objektu pojavijo. Ker smo do zdaj obravnavali vse membrane ločeno, smo morali v tej fazi skombinirati rezultate. Podporna konstrukcija mora biti stabilna ne glede na to, ali so nanjo vpete membrane ali ne, zato smo preverili vse možne kombinacije obtežbe,

tiste, ki so verjetne v času delovanja vseh treh membran, in tiste, ki so možne le v primeru pretrga ene ali dveh izmed membran.

Reakcije smo morali najprej razstaviti na posamezne komponente računsko in grafično, nato izračunati notranje sile ob vznožju stebrov ter jih nato spet sešteti in določiti končno obremenitev. Zaradi velikega števila podatkov so tukaj predstavljeni le rezultati pri kombinacijah z vsemi tremi membranami in le za centralni steber.

Velika višina konstrukcije je zahtevala zelo velike dimenzije stebrov, zato smo jo nekoliko zmanjšali, in sicer sedaj glavni steber meri 5,7 m. Dimenzije stebrov bi lahko zmanjšali tudi s postopnim zmanjševanjem premera stebra ter izvedbo členkasto vpetega jambora stabiliziranega z dvema kabloma.

Preglednica 6-7: Notranje sile in momenti na dnu centralnega stebra glede na obtežne kombinacije, ki upoštevajo delovanje vseh treh membran; sile in momenti so predstavljeni v globalnem koordinatnem sistemu, F_{xy} predstavlja rezultanto sil v ravnini XY, M_R pa rezultanto momentov

Obtežne kombinacije	F_x [kN]	F_y [kN]	F_z [kN]	F_{xy} [kN]	M_y [kNm]	M_x [kNm]	M_R [kNm]
1+1+1	-80,51	0,00	-45,92	80,51	-322,28	0,00	322,28
2+2+2	-119,21	0,00	-76,62	119,21	-489,74	0,00	489,74
3a+3a+3a	-109,55	0,00	-65,17	109,55	-447,89	0,00	447,89
4+4+4	-76,83	0,00	-41,28	76,83	-304,51	0,00	304,51
5+5+5	-84,97	0,00	-49,83	84,97	-342,47	0,00	342,47
6+6+6	-76,67	0,00	-40,75	76,67	-303,30	0,00	303,30
7+7a+7a	-81,77	0,00	-44,68	81,77	-327,08	0,00	327,08
8+8+8	-77,69	0,00	-41,85	77,69	-308,46	0,00	308,46
9+9a+9a	-117,03	0,00	-74,29	117,03	-481,99	0,00	481,99
10+10+10	-112,05	0,00	-70,96	112,05	-460,48	0,00	460,48
2+3a+3a	-114,01	0,00	-71,81	114,01	-471,55	0,00	471,55
3b+3a+3a	-102,53	0,00	-60,00	102,53	-410,71	0,00	410,71
3c+3a+3a	-105,22	6,27	-61,91	105,40	-424,92	-33,22	426,22
7+8+8	-80,10	0,00	-44,14	80,10	-321,24	0,00	321,24
8+7b+7b	-76,60	0,00	-42,24	76,60	-304,64	0,00	304,64
9+10+10	-114,33	0,00	-73,25	114,33	-472,56	0,00	472,56
10+9b+9b	-115,04	0,00	-72,78	115,04	-470,95	0,00	470,95

V nadaljevanju je predstavljeno dimenzioniranje vseh stebrov podporne konstrukcije, izbrane kritične vrednosti so podane ob izračunu.

V vseh primerih so izbrani cevni profili iz jekla razreda S355.

Centralni steber

- Projektne sile

$$F_{x,Ed} = -119,21 \cdot 1,5 = 178,8 \text{ kN}$$

$$F_{y,Ed} = 0,0 \cdot 1,5 = 0,0 \text{ kN}$$

$$F_{z,Ed} = -76,62 \cdot 1,5 = 114,93 \text{ kN}$$

$$M_{y,Ed} = -489,74 \cdot 1,5 = 734,61 \text{ kNm}$$

Projektiramo na enoosni upogib s tlačno in strižno silo.

- Izbira začetnega prereza

$$W_{pl} = \frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M0}}{f_y} = \frac{734,61 \cdot 100 \cdot 1,0}{35,5} = 2069 \text{cm}^3$$

Izberem cev premera 368 mm in debeline stene 25 mm (CEV 368/25).

$$W_{pl,dej} = 2165 \text{cm}^3, A = 269,4 \text{cm}^2$$

- Začetna kontrola

$$\frac{N_{Ed}}{A \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{y,pl} \cdot f_y / \gamma_{M0}} \leq 1,0$$
$$\frac{114,93}{269,4 \cdot 35,5 / 1,0} + \frac{734,61 \cdot 100}{2165 \cdot 35,5 / 1,0} = 0,97 \leq 1,0 \text{ (kontrola se izide, velika izkoriščenost prereza)}$$

- Kontrola kompaktnosti

Tlak in upogib

$$\frac{d}{t} \leq 90 \cdot \varepsilon^2$$

$$\frac{368}{25} = 14,72 \leq 90 \cdot 0,66 = 59,40 \text{ Profil zadostuje pogojem 3. razreda kompaktnosti}$$

$$14,72 \leq 50 \cdot 0,66 = 33,0 \text{ kot tudi 1. razreda kompaktnosti}$$

Strig

$$A_v \cong 0,64A = 0,64 \cdot 269,4 = 172,4 \text{cm}^2$$

$$V_{Ed} = 178,8 \text{kN} \leq V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = \frac{172,4 \cdot 35,5}{1,0 \cdot \sqrt{3}} = 3534 \text{kN} \text{ Kontrola se izide}$$

- Kontrola interakcije strižne sile in momenta

$$V_{Ed} = 178,8 \text{kN} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd} = 0,5 \cdot 3534 = 1767 \text{kN} \text{ Kontrola se izide, interakcije ni potrebno upoštevati}$$

- Kontrola nosilnosti prereza

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{114,93}{9563,7} = 0,0120 \leq 0,15 \text{ Sledi } M_{N,Rd} = M_{pl,Rd}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{267,4 \cdot 35,5}{1,0} = 9563,7 \text{kN}$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2165 \cdot 35,5}{1,0} = 76858 \text{kNcm} = 768,6 \text{kNm}$$

$$\alpha = 2$$

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{Ny,Ed}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{Nz,Ed}} \right]^\beta \leq 1,0$$

$$\left[\frac{734,61}{768,58} \right]^2 = 0,91 \leq 1,0$$

- Kontrola uklona

Kontrola uklona je bila izvedena s programom SAP2000.

Preglednica 6-8: Uklonske oblike in njihovih uklonskih faktorjih

Uklonska oblika	Uklonski faktor [l]
1	85,55
2	85,55
3	681,0
4	681,0
5	3059,3
6	3059,3



Slika 6-66: Prva uklonska oblika

Najmanjši uklonski faktor 85,55 nastopi pri prvi uklonski obliki. Ker je ta zelo velik, bi lahko naša konstrukcija prenesla veliko večjo obtežbo brez nevarnosti uklona.

Desni (levi) steber

- Projektne sile

$$F_{xy,Ed} = 61,85 \cdot 1,5 = 92,78 \text{ kN}$$

$$F_{z,Ed} = 37,01 \cdot 1,5 = 55,52 \text{ kN}$$

$$M_{R,Ed} = 99,83 \cdot 1,5 = 149,7 \text{ kNm}$$

Projektiramo na enoosni upogib z natezno in strižno silo, saj moment deluje pod kotom - 22,50° od x osi.

- Izbira začetnega prereza

$$W_{pl} = \frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M0}}{f_y} = \frac{149,7 \cdot 100 \cdot 1,0}{35,50} = 421,7 \text{ cm}^3$$

Izberem cev premera 193,7 mm in debeline stene 22,2 mm (CEV 193,7/22,2).

$$W_{pl,dej} = 461,7 \text{ cm}^3, A = 119,6 \text{ cm}^2$$

– Začetna kontrola

$$\frac{N_{Ed}}{A \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{y,pl} \cdot f_y / \gamma_{M0}} \leq 1,0$$
$$\frac{-55,52}{119,6 \cdot 35,5 / 1,0} + \frac{149,7 \cdot 100}{461,7 \cdot 35,5 / 1,0} = 0,90 \leq 1,0 \text{ (kontrola se izide, velika izkoriščenost prereza)}$$

– Kontrola kompaktnosti

Tlak in upogib

$$\frac{d}{t} \leq 90 \cdot \varepsilon^2$$

$$\frac{139,7}{22,5} = 6,21 \leq 90 \cdot 0,66 = 59,40 \text{ Profil zadostuje pogojem 3. razreda kompaktnosti}$$

$$6,21 \leq 50 \cdot 0,66 = 33,0 \text{ kot tudi 1. razreda kompaktnosti}$$

Strig

$$A_v \cong 0,64A = 0,64 \cdot 119,6 = 76,54 \text{ cm}^2$$

$$V_{Ed} = 92,78 \text{ kN} \leq V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = \frac{76,54 \cdot 35,5}{1,0 \cdot \sqrt{3}} = 1568,8 \text{ kN Kontrola se izide}$$

– Kontrola interakcije strižne sile in momenta

$V_{Ed} = 92,78 \text{ kN} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd} = 0,5 \cdot 1568,8 = 784,4 \text{ kN}$ Kontrola se izide, interakcije ni potrebno upoštevati

– Kontrola nosilnosti prereza

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{55,52}{4246} = 0,0131 \leq 0,15 \text{ Sledi } M_{N,Rd} = M_{pl,Rd}$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{119,6 \cdot 35,5}{1,0} = 4246 \text{ kN}$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{461,7 \cdot 35,5}{1,0} = 16390 \text{ kNcm} = 163,9 \text{ kNm}$$

$$\alpha = 2$$

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{Ny,Ed}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{Nz,Ed}} \right]^\beta \leq 1,0$$

$$\left[\frac{149,7}{163,9} \right]^2 = 0,83 \leq 1,0$$

– Kontrola stabilnosti

Kontrola stabilnosti ni potrebna, saj element ni tlačno obremenjen.

Zadnji desni (levi) steber

- Projektne sile

$$F_{xy,Ed} = 32,95 \cdot 1,5 = 49,43 \text{ kN}$$

$$F_{z,Ed} = -24,48 \cdot 1,5 = -36,72 \text{ kN}$$

$$M_{R,Ed} = 115,34 \cdot 1,5 = 173,01 \text{ kNm}$$

Projektiramo na enoosni upogib s tlačno in strižno silo.

- Izbira začetnega prereza

$$W_{pl} = \frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M0}}{f_y} = \frac{173,01 \cdot 100 \cdot 1,0}{35,50} = 487,4 \text{ cm}^3$$

Izberem cev premera 216 mm in debeline stene 20 mm (CEV 216/20).

$$W_{pl,dej} = 553,3 \text{ cm}^3, A = 123,2 \text{ cm}^2$$

- Začetna kontrola

$$\frac{N_{Ed}}{A \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{y,pl} \cdot f_y / \gamma_{M0}} \leq 1,0$$
$$\frac{36,72}{123,2 \cdot 35,5 / 1,0} + \frac{173,01 \cdot 100}{553,3 \cdot 35,5 / 1,0} = 0,89 \leq 1,0 \text{ Kontrola se izide, velika izkoriščenost prereza}$$

- Kontrola kompaktnosti

Tlak in upogib

$$\frac{d}{t} \leq 90 \cdot \varepsilon^2$$

$$\frac{216}{20} = 10,8 \leq 90 \cdot 0,66 = 59,40 \text{ Profil zadostuje pogojem 3. razreda kompaktnosti}$$

$$10,8 \leq 50 \cdot 0,66 = 33,0 \text{ kot tudi 1. razreda kompaktnosti}$$

Strig

$$A_v \cong 0,64A = 0,64 \cdot 123,2 = 78,85 \text{ cm}^2$$

$$V_{Ed} = 49,43 \text{ kN} \leq V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = \frac{78,85 \cdot 35,5}{1,0 \cdot \sqrt{3}} = 1616 \text{ kN Kontrola se izide}$$

- Kontrola interakcije strižne sile in momenta

$$V_{Ed} = 49,43 \text{ kN} \leq 0,5 \cdot V_{pl,Rd} = 0,5 \cdot 1616 = 808 \text{ kN Kontrola se izide, interakcije ni potrebno upoštevati}$$

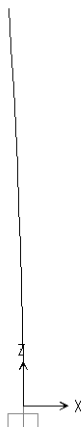
- Kontrola nosilnosti prereza

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{36,72}{4373,6} = 0,0084 \leq 0,15 \text{ Sledi } M_{N,Rd} = M_{pl,Rd}$$
$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{123,2 \cdot 35,5}{1,0} = 4373,6 \text{ kN}$$
$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{553,3 \cdot 35,5}{1,0} = 19642 \text{ kNcm} = 196,42 \text{ kNm}$$
$$\alpha = 2$$
$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{Ny,Ed}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{Nz,Ed}} \right]^\beta \leq 1,0$$
$$\left[\frac{173,01}{196,42} \right]^2 = 0,78 \leq 1,0$$

Kontrola uklona je bila izvedena s programom SAP2000.

Preglednica 6-9: Uklonske oblike in njihovih uklonski faktorji

Uklonska oblika	Uklonski faktor [l]
1	69,06
2	69,06
3	898,8
4	898,8



Slika 6-67: Prva uklonska oblika

Najmanjši uklonski faktor 69,06 nastopi pri prvi uklonski obliki. Ker je ta zelo velik, bi lahko naša konstrukcija prenesla veliko večjo obtežbo brez nevarnosti uklona.

6.5 KROJENJE MEMBRANE

Program MPanel ponuja različne možnosti krojenja, in sicer avtomatskega, pri katerem krojimo celotno mrežo, ročnega s pomočjo presečnih premic in avtomatskega krojenja med krivuljama. Pri avtomatskem lahko definiramo število trakov, vendar je to odvisno od gostote mreže, lahko pa tudi združujemo kroje. Pri tem lahko pride do velikih strižnih deformacij, kar onemogoča postavitve konstrukcije. Izberemo lahko tudi avtomatsko krojenje mreže pravokotno na smer največjih napetosti, diagonalno ali diagonalno v nasprotni smeri. Za avtomatsko krojenje med krivuljami moramo najprej te ustvariti. To lahko naredimo tako, da mrežo spremenimo v več krivulj ali pa poiščemo presečnice med premicami, ki jih izrišemo sami in potekajo poljubno, ter membrano. Preseke lahko izvedemo samo s preslikanjem premice ali s pomočjo geodetk, lahko izberemo možnost, da so preseki na enakih razdaljah. Program nam lahko tudi avtomatično izriše dodatne krivulje med premicami, ki smo jih sami zarisali, kar omogoča oblikovanje krojev, ki bolje ustrezajo našemu modelu. Poskušali smo krojiti v smeri največjih napetosti in krojenje nadzirati sami s pomočjo presečnih premic in geodetk.

Membrano bomo krojili v smeri največjih napetosti, kar bo dalo naši konstrukciji veliko estetsko in uporabno vrednost. Največje napetosti se pojavijo v smeri največjih ukrivljenosti, to je v osnovni smeri glede na zgornje rezultate analize. Pri krojenju in predvsem določitvi širine krojev moramo biti pozorni na maksimalne dovoljene strižne deformacije, ki so 5%, vendar se inženirji držijo vrednosti 3% [24], saj niso vse tkanine sposobne prevesti tako velikih strižnih deformacije. Poleg tega tudi veliko popačenje pri prenosu površine na ravnino povzroči gubanje in neestetski izgled.

Za krojenje smo se odločili v smeri največjih napetosti, za približno širino kroja pa smo izbrali 1 m. Tkanina, iz katere so membrane izdelane, je dobavljiva v trakovih širine 2,5 m. Šive smo na membrane izrisali s pomočjo geodetk, t.j. najkrajših črt med dvema točkama na membrani. Prekrivanje varov smo načrtovali tako, da se iztekajoča voda in umazanija ne ujame v zavarjen rob [15], torej približno tako kot pri opečnati strehi – kroji, ki so bliže vrhu membrane, prekrivajo kroje, ki ležijo nižje.

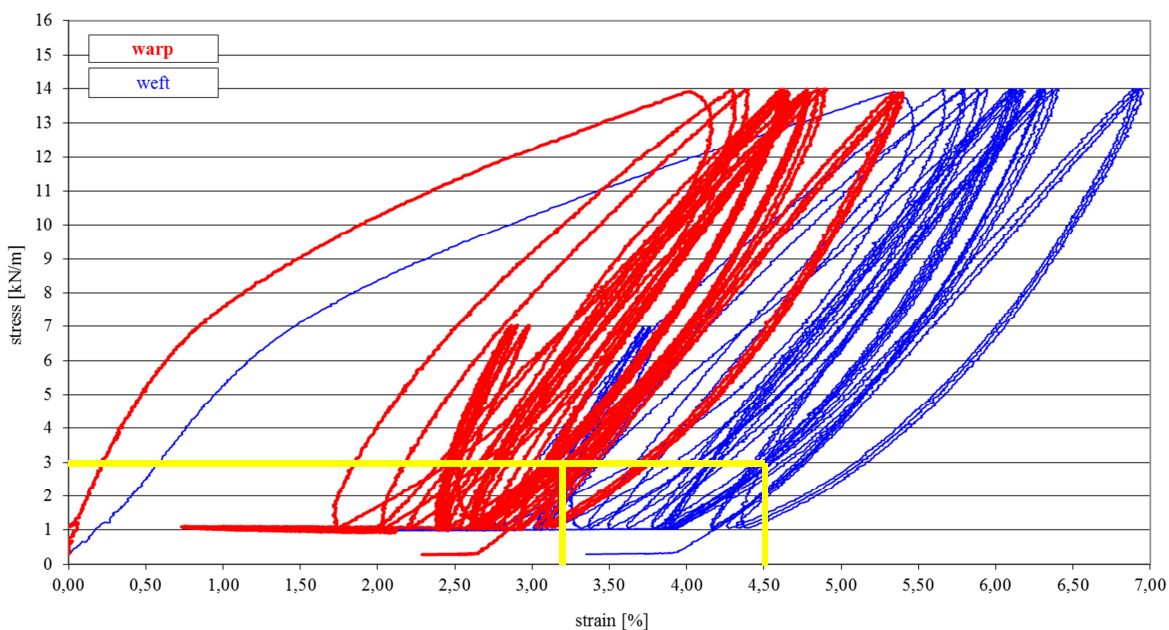
Pred krojenjem membrane je potrebno izbrati tudi detajle. Odločili smo se za preprost robni detajl za robne kable, ki se ga velikokrat uporablja pri PET/PVC membranah, in sicer za navznoter zavihan rob. Predvideli smo zareze za doseg lepše krivulje ob varjenju tega zavihka. Na vseh robovih smo izrisali tudi vodilne črte, ki pomagajo pri varjenju oz. sestavljanju membrane.

Za ogliščni detajl smo si zamislili membrano pripeti med kovinske ploščice. Dimenzije detajla smo izbrali na podlagi predlaganih v programu MPanel.

Kompenzacija

Kompenzacijo smo določili na podlagi rezultatov dvoosnih testov in sicer iz grafa napetosti v odvisnosti od deformacij. Za osnovno stran je ta znašala 3,2%, za votkovno pa 4,5%.

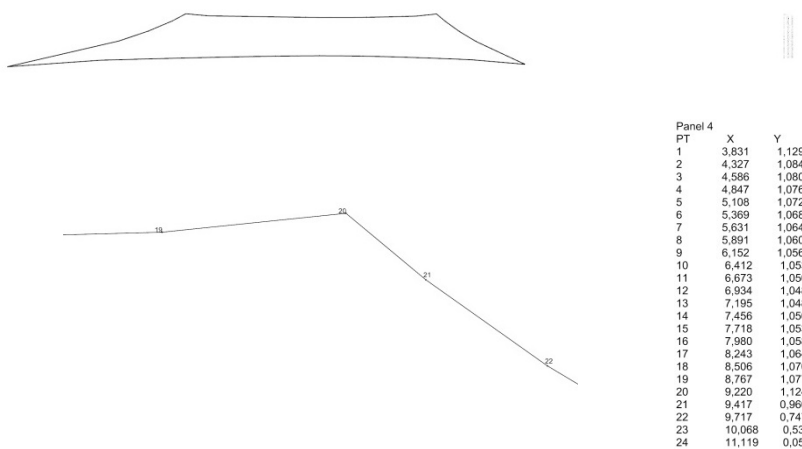
Plot 4 - stress vs strain for "all cycles"
 Pr 585-28: Ferrari Précontraint 702 S2
 Sample: M11/088, UM: 300000333447



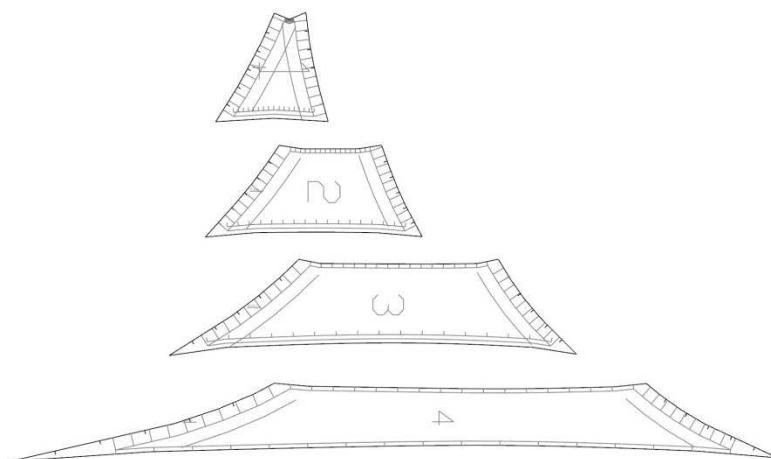
Grafikon 6-3: Napetost v odvisnosti od deformacij pri dvoosnem testu ter določitev velikosti kompenzacije

Izris za razrez

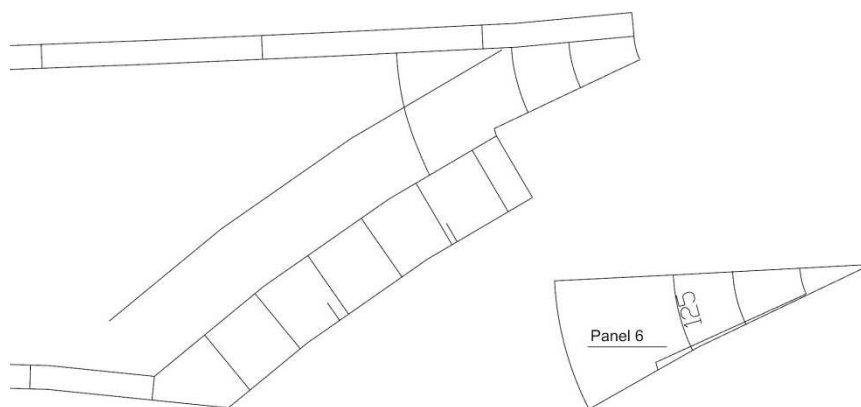
Pri ročnem izrisu in razrezu tkanine najbolj prav pride izpis v koordinatah, ki smo ga tudi izvedli. Poleg tega je priporočljiv tudi izpis za kontrolo, ki vsebuje le dolžine in ukrivljenosti posameznih črt. Za zdaj najbolj pogost strojni razrez se v izpisu oblikujejo posebne plasti, ki jih nato elektronski rezalnik upošteva in zato do določenih vnosov pristopa drugače, npr. le zariše črto.



Slika 6-68: Izpis enega izmed krojev centralne membrane v obliki x in y koordinat, celotni izpis (zgoraj) ter detajl (spodaj levo) in povečava izpisa koordinat (spodaj desno)



Slika 6-69: Izrisani kroji za polovico centralne membrane brez zavihki in vari brez ogliščnih detajlov



Slika 6-70: Ogliščni detajl in kraj za ojačitveno zaplato

7 ZAKLJUČEK

V nalogi smo obravnavali prednapete membrane, natančneje smo načrtovali nadstrešek prostora za druženje na travniku za stavbo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Ker prednapete membrane niso klasične konstrukcije, o katerih bi se dodobra poučili tekom študija gradbeništva, je delo zahtevalo obsežen pregled literature in spoznavanja z drugačnimi principi načrtovanja.

Najprej smo oblikovali idejne načrte za omenjeni nastrešek. Ti so morali ustrezati zahtevam glede

- estetskosti in inovativnosti konstrukcije,
- lahke odstranljivosti,
- cenovne ugodnosti in
- funkcionalnosti (ne predstavlja ovire zaposlenim).

Predstavili smo 5 idejnih rešitev in ocenili stroške njihove izdelave ter jih med sabo primerjali. Šlo je za »Konusno konstrukcijo obešeno na lok«, za »Dežnik«, »Tri jadra«, »Dva deltoida« in »Osmerokotnik«. Pri snovanju oblik smo si pomagali z različnimi pripomočki, kot so obsežne knjižnice primerov prednapetih membran in svetovni splet, posvetovali pa smo se tudi z arhitektom ter sami izdelali nekaj modelov konstrukcij iz najlonskih nogavic. Načrte smo izrisali s pomočjo računalniškega programa FormFinder.

V nadaljevanju smo spoznavali obnašanje konstrukcij in modeliranje le-teh z uporabo programskih orodij MPanel in MPanel FEA. Predstavljeni sta dve statični analizi, in sicer primera »Dežnik«, ki je edini konusne oblike, ter »Tri jadra«, ki je bil izbran tudi za bolj natančno analizo ter dimenzioniranje. Obravnavali smo obtežbo zaradi snega in zaradi vpliva vetra, saj ostale obtežbe za prenapeto membrano niso relevante. Zdimenzionirali in skrojili smo obravnavane membrane.

Za končno obravnavo je bila izbrana konstrukcija »Tri jadra«, ki smo jo vzeli pod drobnogled. Pred začetkom projektiranja smo vnesli nekaj velikih sprememb, tako da se je delovanje konstrukcije glede na predhodno spremenilo. Opisali smo postopek iskanja oblike ter relaksacije membrane, nato pa smo ocenili začetne dimenzije in lastnosti materialov skozi preproste račune po kotelni formuli. V nadaljevanju smo zbrali karakteristike gradbenih materialov membrane ter predpise in obtežbe. Pri določanju obtežnih primerov smo predvideli najbolj neugodno stanje za konstrukcijo. Na koncu smo konstrukcijo tudi zdimenzionirali.

VIRI

- [1] Otto, F., Klenk, F. (ur.), Reiner, R., Haug, E. 1998. IL 24: Form Force Mass 4 – The Lightweight Principle. Stuttgart, University of Stuttgart, Institute for Lightweight Structure (IL): 294 str.
- [2] Zakon o graditvi objektov (ZGO-1). Uradni list RS št. 110/2002: 13084.
- [3] Berger, H. 1996. Light Structures – Structures of Light: The Art and Engineering of Tensile Architecture. Basel, Boston, Berlin, Birkhäuser.
- [4] Olimpijski park München
<http://www.muenchen.de/int/en/sights/parks/olympic-park.html>
(Pridobljeno 19.9.2014)
- [5] Roithmayr, R. 2006. FormFinder Version 3.5 Beta: Knjižnica programa. Dunaj, Formfinder Software GmbH.
- [6] Soltec – novi produkti
http://soltec.si/aktualno/13/novi_produkti_membranske_konstrukcije_in_membranske_dekorativne_fasade/ (Pridobljeno 19.9.2014)
- [7] Loging – primeri stavb
<http://www.loging.si/en/functional-constructions/facility-examples/#>
(Pridobljeno 19.9.2014)
- [8] Dubai
<http://prettysweety.blogspot.com/p/believe-when-all-things-i-touch-should.html>
(Pridobljeno 19.9.2014)
- [9] Nogometno prvenstvo v Južni Afriki
<http://www.vavel.com/es/internacional/190011-clasificacion-para-la-can-2013-todo-ona.html> (Pridobljeno 19.9.2014)
- [10] Seidel, M. 2009. Tensile Surface Structures: A practical Guide to Cable and Membrane Construction. Berlin, Ernst & Sohn.
- [11] Bechthold, M. 2008. Innovative Surface Structures. Technology and Applications. Abingdon, Taylor & Francis.
- [12] Forster, B. (ur.), Mollaert, M. (ur.). 2004. European Design Guide for Tensile Surface Structures. Bruselj, Vrije universiteit Brussel.
- [13] Kovacevic, D. 2012. Prednapete membranske konstrukcije. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [14] MPanel Tutorials – Getting Started
http://www.meliar.com/Introductory_Tuts.htm (Pridobljeno 7.5.2014)

- [15] Huntington, C. G. 2004. The Tensioned Fabric Roof. Reston, The American Society of Civil Engineers: 203 str.
- [16] FormFinder – About
<http://www.formfinder.at/> (Pridobljeno 23.2.2015)
- [17] McNeel
<http://www.en.na.mcneel.com/contact.htm> (Pridobljeno 22.9.2014)
- [18] Rhinoceros 3D – Wikipedia
http://en.wikipedia.org/wiki/Rhinoceros_3D (Pridobljeno 22.9.2014)
- [19] Robert McNeel & Associates. 2014. Rhinoceros 5 - User's Guide For Windows. Navodila za uporabo. Seattle, Robert McNeel & Associates.
- [20] MPanel
<http://www.meliar.com/MPanel.htm> (Pridobljeno 22.9.2014)
- [21] MPanel FEA
http://www.meliar.com/MPanel_FEA.htm (Pridobljeno 22.9.2014)
- [22] Tension structure connection details – Fabric Architecture
http://fabricarchitecturemag.com/articles/0110_ce_connection.html
(Pridobljeno 22.9.2014)
- [23] Galerija fotografij – Sollertia
<http://www.sollertia.ca/photo-gallery-5> (Pridobljeno 20.10.2014)
- [24] MPanel Help. Meliar Design, Builth, Wales, Meliar Design.
- [25] MPanel FEA. Meliar Design, Builth, Wales, Meliar Design.
- [30] Nagai, Y., Okada, A., Miyasato, N., Saitoh, M. 2011. Wind Tunnel Tests on The Horn-shaped Membrane Roof. V: Colman Lerner, J. (ur.), Boldes, U. (ur.). Wind Tunnels and Experimental FluidDynamics Research. Reka, Intech.
<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/16678.pdf> (Pridobljeno 20.7.2014.)
- [31] Beg, D. (Ur.), Pogacnik A. (Ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije.
- [32] Wire Rope and Strand – A. Noble & Son LTD
<http://www.nobles.com.au/3dissue/section02/files/35.html> (Pridobljeno 19.9.2014)
- [33] Beg, D. 2011. Projektiranje jeklenih konstrukcij v skladu z evrokodom 3. Kratek povzetek. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [34] MPanel FEA Help. Meliar Design, Builth, Wales, Meliar Design.

- [36] Masubuchi, M. 2013. Conceptual and Structural Design of Adaptive Membrane Structures with Spoked Wheel Principle – Folding to the Perimeter. Doktorska disertacija. Berlin, Planen Bauen Umwelt der Technischen Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen.
- [37] Colliers, J. S. G. 2014. Wind Loading on Tensile Surface Structures – An Experimental Approach. Magistrska naloga. Bruselj, Brussels Faculty of Engineering.
- [38] Fang, R. 2009. The Design and Construction of Fabric Structures. Magistrska naloga. Massachusetts, The Massachusetts Institute of Technology.
- [39] Schock, H.-J. 1997. Soft Shells: Design and Technology of Tensile Architecture. Berlin, Birkhäuser.
- [40] Gosling, P.D., Bridgens, B.N., Albrecht, A., Alpermann, H., Angeleri, A., Barnes, M., Bartle, N., Canobbio, R., Dieringer, F., Gellin, S., Lewis, W.J., Mageau, N., Mahadevan, R., Marion, J.-M., Marsden, P., Milligan, E., Phang, Y.P., Sahlin, K., Stimpfle, B., Suire, O., Uhlemann, J. 2012. Analysis and Design of Membrane Structures: Results of a Round Robin Exercise. Engineering Structures 48, marec 2013: 313-328.
doi:10.1016/j.engstruct.2012.10.008
- [41] Mrak, G. 2013. Prostor za druženje. Osebna komunikacija. (5.7.2013)

STANDARDI

- [26] SIST EN 1991-1-3:2004/A101:2008 – Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-3. del: Splošni vplivi – Obtežba snega – Nacionalni dodatek.
- [27] SIST EN 1991-1-3:2004 – Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-3. del: Splošni vplivi – Obtežba snega.
- [28] SIST EN 1991-1-4:2005 – Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-4. del: Splošni vplivi – Vplivi vetra.
- [29] SIST EN 1991-1-4:2005/oA101:2007 – Evrokod 1: Vplivi na konstrukcije – 1-4. del: Splošni vplivi – Obtežbe vetra – Nacionalni dodatek.
- [35] SIST EN 13782:2006. Začasne konstrukcije – Šotori – Varnost.