

ODREĐIVANJE OBLIKA MEMBRANSKIH KONSTRUKCIJA PRIMJENOM TEMPERATURNOG OPTEREĆENJA

FORM FINDING OF MEMBRANE STRUCTURE WITH TEMPERATURE LOAD

Krunoslav Pavković, Boris Baljkas

Tehničko veleučilište u Zagrebu, Av. Većeslava Holjevca 15, Zagreb, Hrvatska

Sažetak

Razvojem programskih paketa za određivanje oblika membranskih konstrukcija, sve se češće arhitekti okreću ovom tipu konstrukcija za natkrivanje prostora. Membranske konstrukcije svojim razigranim formama pružaju projektantima bezbroj inovativnih rješenja stoga su danas jedne od najtraženijih, a ujedno i najzahtjevnijih konstrukcija za projektiranje. S obzirom na to da je oblik membranskih konstrukcija, odnosno membrane, ploha s minimalnom potencijalnom energijom, programski paketi koji omogućavaju pronalaženje oblika su specijalizirani te ujedno i vrlo skupi i neisplativi za projektante koji se ne bave svakodnevno projektiranjem membranskih konstrukcija. U radu je prikazan jednostavan inženjerski postupak određivanja oblika membranskih konstrukcija, sastavljenih od platna i užadi primjenom temperaturnog opterećenja. Postupak prikazan u radu proveden je s programskim paketom COSMOS/M 2008.

Ključne riječi: *membrana, pronalaženje oblika, lagane konstrukcije*

Abstract

Nowadays with advance development of software packages for the form-finding of membrane structures, architects more often decide for this type of structures. Its unusual form provides architects countless innovative solutions and today they are one of the most desirable structures. Nevertheless, they are also the most complicated structures for design and construction. The membrane structures have surfaces with the minimum potential energy, which demands special software for form-finding.

These programs are for the designers who do not deal with these structures on a regular basis very expensive. The paper presents a simple engineering procedure of membrane form-finding with a temperature load. For form-finding represented in the paper COSMOS / M 2008 software package was used.

Keywords: *membrane, form-finding, light structures*

1. Uvod

1. Introduction

Arhitekti se prilikom projektiranja sve češće odlučuju na korištenje membranskih konstrukcija za natkrivanje prostora. Glavni nosivi element ovih konstrukcija je prostorno napeto platno koje se u radu naziva membrana, a konstrukcije ovoga tipa membranske konstrukcije. Svojom prostornom formom platno osigurava stabilnost konstrukcije i prijenos sila u oslonce. Ove konstrukcije svojom malom težinom mogu natkriti vrlo velike površine uz iznimno dinamične i razigrane forme. Prve inženjerske konstrukcije koje bi se mogle svrstati u istu kategoriju s membranskim izvedene su od statičkog sustava užadi kao primarne konstrukcije na koju se polaže pokrov. Prva konstrukcija ovoga tipa izvedena je 1896. godine u Nizjny-Novigorodu, a projektirao ju je ruski inženjer V. G. Shookhov. Tijekom 30-ih godina prošlog stoljeća izveden je veći broj sličnih manjih konstrukcija u SAD-u i Europi. Veliki pomak u razvoju dogodio se 1950. godine kada je Matthew Nowicki dizajnirao Stata Fair arenu u Sjevernoj Karolini. Nowicki nije doživio završetak gradnje, umro je iste godine kada je projekt odobren.

Njegov su rad nastavili arhitekt William Henry Deitrick i inženjer Fred Severud [1, 2]. Suradnja studenta arhitekture Freija Otta i inženjera Freda Severuda posebno je doprinijela razvoju ovih konstrukcija. Frei Otto imao je viziju konstrukcije koja bi nosivim sustavom nadmašila sve dosadašnje u odnosu raspona i težine. Vidjevši projekt Stata Fair arene uvjerio se u realizacijske mogućnosti svoje vizije te je sustavno počeo istraživati prednapete membranske konstrukcije. Njegovo je istraživanje predstavljeno u doktorskoj disertaciji „The Suspended Roof” koja je ujedno i prvi pisani dokument o ovom tipu konstrukcija [3]. Vrhunac njegova rada je Olympia centar München.



Slika 1 Millennium Dome, Greenwich, UK

Figure 1 Millennium Dome, Greenwich, UK

Zalet u svojoj primjeni, ove su konstrukcije doživjele u posljednjih 35 godina, razvojem suvremenih računala i softvera. Membranske konstrukcije, kakve su nama danas poznate, prvi puta su izvedene u Sjevernoj Americi 70-ih godina prošlog stoljeća zaslugom arhitekta Johna Shavera. Nakon EXPO-a 70-ih u Osaki, počinje gradnja membranskih konstrukcija diljem svijeta, a značajnije su: Georgia Dome Atlanta, Akita Skydome Japan, Millennium Dome Greenwich UK i Oita World Cup Stadium Oita Japan [4, 5].

2. Određivanje oblika plohe s minimumom energije

2. Form-finding of minimum potential energy surface

Određivanje oblika membranskih konstrukcija stvaralo je veliku prepreku u realizaciji idejnih arhitektonskih rješenja.

Projektiranje prvih izvedenih inženjerskih konstrukcija ovoga tipa baziralo se na promatranju fizikalnih modela. Jedna od najznačajnijih ideja kako pronaći formu je ona Freija Otta. Ideja sapunice koju je iznio Frei Otto temeljila se na promatranju forme koju poprima sapunica između rubnih elemenata, odnosno uz određene rubne uvjete [6, 7]. Mana teorije sapunice je ta da kod većih fizikalnih modela utjecaj gravitacije raste pa postignute forme porastom veličine modela proporcionalno odstupaju od tražene plohe. Pojavom suvremenih materijala na bazi staklenih i ostalih umjetnih vlakana porasla je potreba za točnijim oblikom konstrukcije jer novi materijali svojom velikom krutosti ne omogućuju velike korekcijske pomake. Krojena membrana svojim krojem mora potpuno odgovarati traženom početnom položaju u eksploataciji, za razliku od materijala koji su se nekada koristili i pružali velike manevarske mogućnosti zbog svoje popustljivosti.

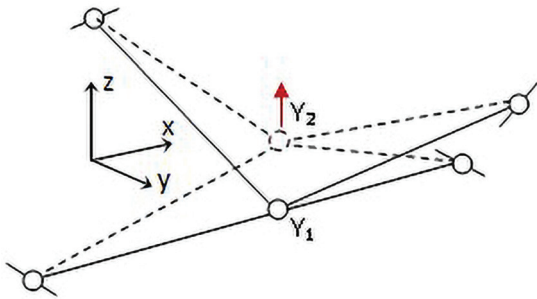
Razvojem suvremenih računala te metoda ako što su: metoda konačnih elemenata, metoda gustoće sila, dinamička relaksacija, pronalaženje oblika membranskih konstrukcije se ubrzalo i povećalo na zadovoljavajuću točnost. Komunikacija između inženjera i proizvođača svedena je na razmjenu digitalnih podataka o geometriji konstrukcije što je omogućilo točnu izradu projektirane forme. Prva konstrukcija za čije je projektiranje korišteno računalo je Paviljon SAD-a na Expu '70 projektanta Davida Geigera uz asistenciju dr. Michaela McCormicka. Informatička i programska podrška uvelike je uznapredovala te sada, nekada složene procese, specijaliziranim programima rješavamo, slikovito rečeno, jednim klikom.

2.1. Određivanje oblika s temperaturnim opterećenjem

2.1. Form-finding with temperature load

Temperatura kao opterećenje na konstrukcijama često uzrokuje naprezanja u elementima koja nisu poželjna i zadaje probleme prilikom rješavanja otpornosti i stabilnosti konstrukcije. Suprotno dosadašnjim iskustvima u projektiranju inženjerskih konstrukcija, u ovom je radu prikazan postupak korištenja temperaturnog opterećenja za određivanje oblika membranske

konstrukcije. Zahtjev koji programski paket mora ispuniti za uspješno provođenje ovog postupka je mogućnost nelinearne analize.



Slika 2 Pomak čvora pri opterećenju negativnom temperaturom

Figure 2 Node displacement under negative temperature load

Način na koji se temperaturno opterećenje može iskoristiti za pronalaženje oblika membranskih konstrukcija najlakše je objasniti na sustavu prostorno postavljenih štapova od kojih svaki leži u svojoj ravnini sa sjecištem u čvoru Y1, što je prikazano na slici 2. Prikazani pomak čvora u smjeru osi z je rezultat nastalih vlačnih uzdužnih sila, prilikom djelovanja temperature, koje nastoje čvor uravnotežiti. Uzdužne sile u štapovima nastale djelovanjem temperature mogu se izvesti pomoću općepoznatih formula za deformaciju štapova prilikom djelovanja temperature i uzdužne sile.

Deformacija štapova na kojima je zadana temperatura može se zapisati:

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

Deformacija štapa proizašla iz opterećenja nekom uzdužnom silom može se zapisati:

$$\Delta L = \varepsilon \cdot L = \frac{\sigma}{E} \cdot L = \frac{L}{E} \cdot \frac{N}{A} \quad (2)$$

Izjednačimo li izraz (1) i (2) dobiva se:

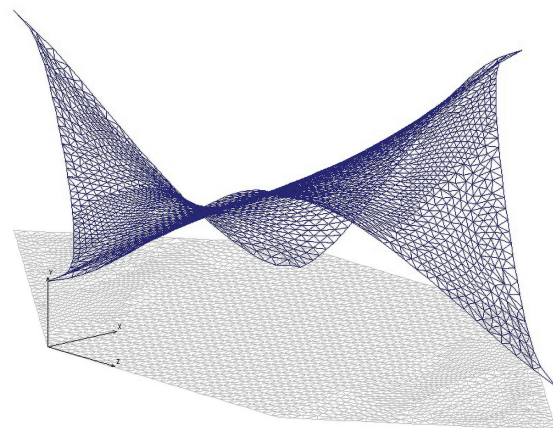
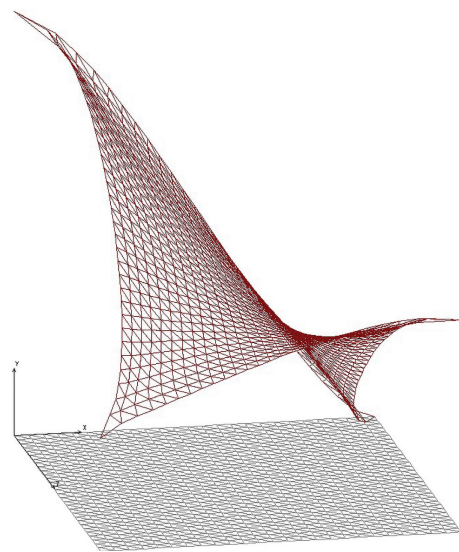
$$\frac{L}{E} \cdot \frac{N}{A} = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3)$$

Iz izraza (3) slijedi izraz za uzdužnu silu u kablovima uslijed temperaturnog opterećenja:

$$N = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \cdot A \quad (4)$$

Ukoliko se na štapove sustava, prikazanog na slici 2., zada negativno opterećenje temperaturom, dobiva se skraćivanje kablova uzrokovano uzdužnom silom N prema izrazu (4).

Promatra li se sada ravnoteža čvora trivijalno je da će čvor iz labilnog položaja Y1 translirati u stabilni položaj Y2. Primijenimo li teoriju čvora na plošne konačne elemente proizlazi da svaki čvor teži svom ravnotežnom položaju te da za svaki element vrijedi da su mu naprezanja u oba smjera jednaka. Iz prethodno navedenog, moglo bi se ustvrditi da će svaka membranska ploha nakon što je opterećena negativnom temperaturom zauzeti položaj s minimumom potencijalne energije (slika 3.).



Slika 3 Primjeri pronalaženja oblika s temperaturnim opterećenjem

Figure 3 Examples of form-finding with temperature load

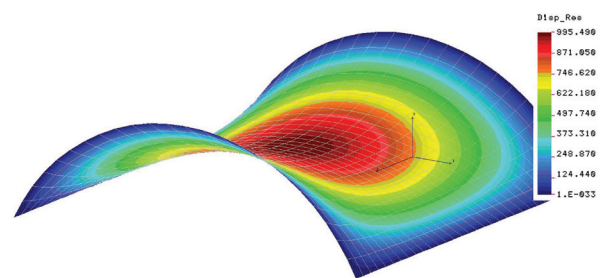
Mana je ove tvrdnje ta da ako bi čvor došao u ravnotežni položaj neki se štapovi moraju izdužiti dok se ostali moraju skupiti. S obzirom na to da negativno temperaturno opterećenje djeluje na način da uzrokuje skupljanje materijala, to u ovom slučaju znači da u svim štapovima neće nakon zadavanja temperaturnog opterećenja biti ista sila, a čvor neće zauzeti ravnotežni položaj koji se očekuje za plohu s minimumom potencijalne energije. Međutim, uzme li se deformirana forma promatrane plohe za novi model i iz nje uklone naprezanja uzrokovana temperaturnim opterećenjem te ponovi zadavanje temperaturnog opterećenja, novo dobivena ploha svojim će oblikom biti bliža idealnom membranskom stanju. Ponovi li se postupak uklanjanja zaostalih naprezanja i korekcija forme početnog modela dovoljan broj puta naprezanja u svim smjerovima će biti potpuno ujednačena, a dobivena će biti ploha s minimumom potencijalne energije. Na primjeru sedlaste plohe (slika 4. i 5.) je prikazan prvi korak pronalaženja plohe s minimumom potencijalne energije primjenom temperature na početnoj valjkastoj plohi. U proces pronalaženja plohe uključen je modul elastičnosti, jer kao što se vidi u izrazu (4), on djeluje kao koeficijent o kojem ovisi prirast sile u određenom smjeru te time i zakrivljenost plohe. Ovo je svojstvo povoljno jer omogućava pronalaženje zakrivljenosti u ovisnosti o modulu elastičnosti u pojedinom smjeru (slika 5.), što je vrlo bitno budući da se za membrane koriste materijali s ortotropnim mehaničkim svojstvima.

3. Primjer analize membranske konstrukcije

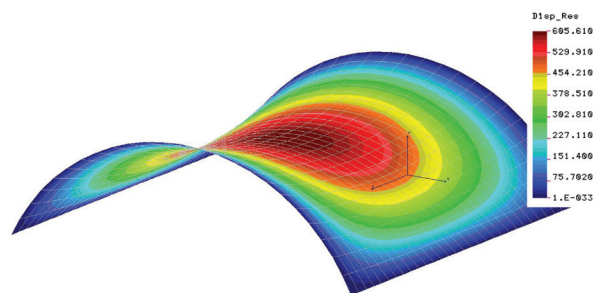
3. Example of membrane structure analysis

U nastavku rada prikazano je pronalaženje oblika membranske konstrukcije (slika 6.) koja ima jedan centralni stup visine 11 m cijevnog profila $\Phi 320$ mm. Iz vrha stupa izlaze četiri čelične užadi promjera 16 mm koje su usidrene u temelje.

Oslonci za spomenutu užad tlocrtno tvore vrhove kvadrata s duljinama stranica od 25 m. Donja zatezna užad membrane postavljena je na visini od 2,5 m te je ista promjera 12 mm. Membrana je od materijala 8552 FiberTite-SM-FB čija je debljina 0,79 mm.



Slika 4 Pronalaženje oblika - isti moduli elastičnosti N/mm^2
Figure 4 Form finding - same modulus of elasticity in both directions N/mm^2



Slika 5 Pronalaženje oblika - različiti moduli elastičnosti N/mm^2
Figure 5 Form finding - different modulus of elasticity in two directions N/mm^2



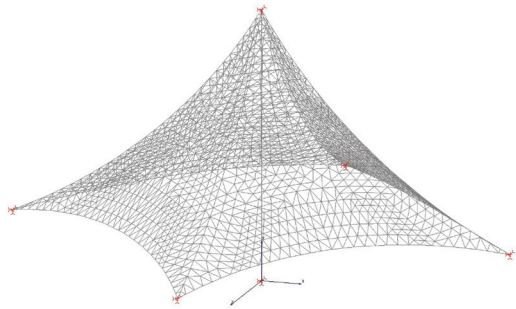
Slika 6 Aksonometrijski prikaz membranske konstrukcije
Figure 6 Axonometric view of membrane structure

3.1. Pronalaženje oblika membrane

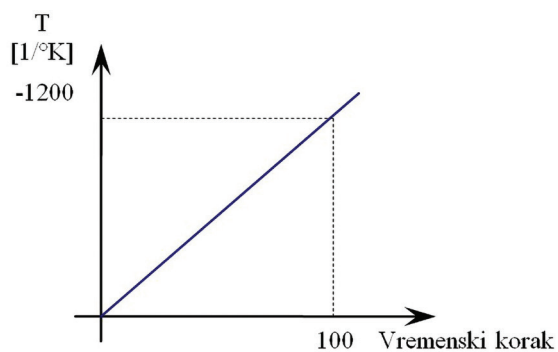
3.1. Membrane form-finding

Za modeliranje membranske konstrukcije korišten je programski paket COSMOS/M 2008. U prvom je koraku napravljen numerički model samo gornjeg dijela konstrukcije koji sadrži membranu, a isti je modeliran geometrijski kao piramida s rubnim uvjetima na vrhu i uglovima baze. Za numeričko modeliranje ove konstrukcije korištene su tri vrste konačnih elemenata shell3, trass3d i beam3d [8, 9] koji su redom korišteni za membranu, užad i stup. U programskom paketu COSMOS/M konačni element shell3 može se definirati kao regular ili membrane.

Za prvi numerički model korišteni su shell3 regular konačni elementi jer imaju mogućnost prijenosa momenta savijanja, što omogućava lakše konvergiranje analize. Nakon druge iteracije modela konačni elementi zamijenjeni su shell3 membrane tipom konačnih elemenata. Opterećenje temperaturom je u prvom modelu zadano u ovisnosti o vremenu prema krivulji koja je prikazana na slici 8.

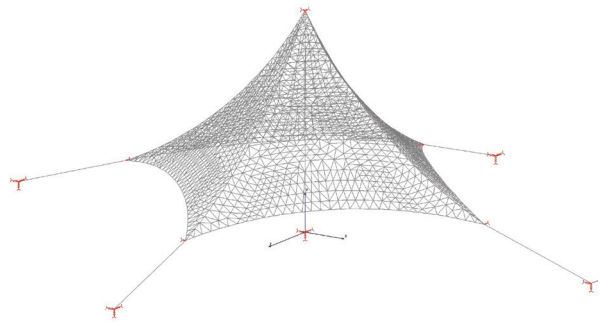


Slika 7 Prvi numerički model membrane nakon tri iteracije
Figure 7 First FEM of membrane after three iteration

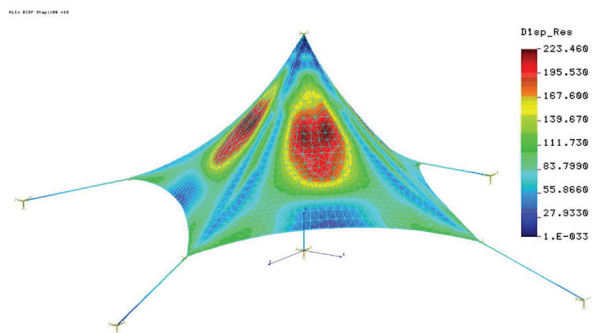


Slika 8 Dijagram temperatura-vrijeme prvog modela
Figure 8 Diagram temperature-time for first model

Za analizu modela korištena je nelinearna analiza s kontrolom sile po Newton-Raphsonovoj metodi s automatskom kontrolom vremenskog koraka u rasponu od minimalnog $1e-5t$ do maksimalnog $0.5t$. Prilikom analize korištena je geometrijska nelinearnost što je vrlo bitno kada se radi o konstrukcijama ovoga tipa. Mehaničke karakteristike materijala odnosno modul elastičnosti zadan je linearno zbog nedovoljnog poznavanja karakteristika materijala koji se koristi za membrane. Mehaničke karakteristike membrane zadane su različito uzdužno i poprečno na vlakna što je od velike važnosti za točnost rezultata. Prvom analizom nakon tri iteracije dobiven je model (slika 7.) čiji deformirani oblik približno odgovara traženoj plohi s minimumom potencijalne energije.



Slika 9 Numerički model cijele membranske konstrukcije
Figure 9 Complete membrane structure FEM



Slika 10 Pomaci nakon opterećenja cijele konstrukcije temperaturom N/mm^2
Figure 10 Structural displacement after applying temperature load on complete structure N/mm^2

Prikazani model na slici 7. iskorišten je za izvedbu novog modela na kojem je materijal membrane prethodno definiran kao linearno elastičan u vlaku i tlaku zamijenjen s „wrinkling membrane“ (konačni element koji nema krutosti prilikom tlačnih napreznja), a ležajevi koji su vidljivi na slici 7. zamijenjeni čeličnom užadi koje su postavljene kao tangente na dobiveni oblik. Geometrija novog numeričkog modela prikazana je na slici 9., ali je istu potrebno korigirati s obzirom na to da je narušena cjelokupna ravnoteža sustava. Postupak korekcije geometrije ovoga modela izveden je zadavanjem sile prednapinjanja od 3.0 kN u užadi ekvivalentnom temperaturom.

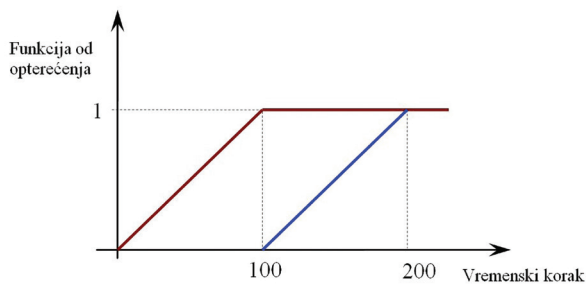
Deformirani oblik konstrukcije (slika 10.) koji je ujedno i zadržan za daljnju analizu, prema ranije spomenutom principu, implementiran je u geometriju modela. Ovim nizom koraka dobiven je model koji svojom geometrijom približno zadovoljava uvjete plohe s minimalnom energijom i gabarite konstrukcije zadane idejnim arhitektonskim rješenjem.

Za povećanje točnosti numeričkog modela potrebno je iteraciju kalibriranja modela ponavljati sve dok deformacije konstrukcije uslijed temperaturnog opterećenja ne bi potpuno nestale.

3.2. Analiza konstrukcije i rezultati za opterećenje snijegom

3.2. Structure analysis and results for \check{Z} snow load

Prilikom montaže, membranske konstrukcije se prednapinju kako bi u svakoj točki u bilo kojem trenutku eksploatacije imale pozitivno naprezanje. Prednapinjanje u membrani modelirano je temperaturnom razlikom na elementima užadi ekvivalentno sili prednapinjanja od 25.0 kN. Vremenska krivulja pridodana temperaturnom opterećenju vidljiva je na slici 11. te je ista istaknuta crvenom bojom. Linearni porast temperature odnosno prednapinjanja raste od vremenskog koraka 0 do 100 u kojem doseže punu vrijednost od 25 kN.

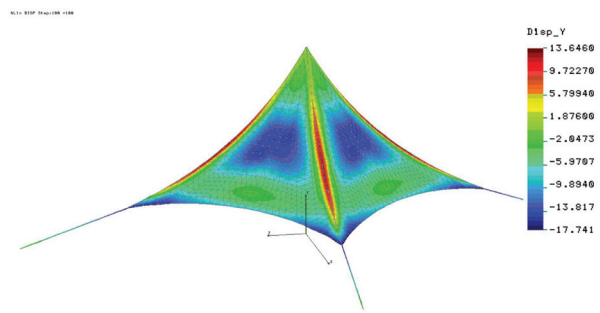


Slika 11 Dijagram opterećenje snijegom-vrijeme

Figure 11 Diagram snow load – time

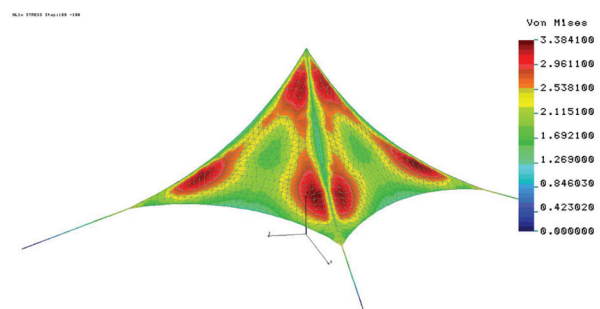
S obzirom na velik broj osnovnih opterećenja na koja se dimenzioniraju konstrukcije u ovom radu provedena je analiza konstrukcije samo na opterećenje snijegom.

Vremenska krivulja prirasta snijega prikazana je plavom linijom, a kao što je vidljivo, radi se o linearnom porastu opterećenja snijegom od vremenskog koraka 100 do pune vrijednosti od 0.5 kN/m² u vremenskom koraku 200. Pomaci i naprezanja u membrani dobiveni u koracima 100 i 200 prikazani su u nastavku.



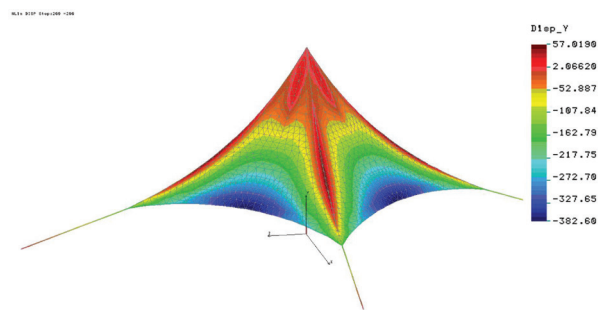
Slika 11 Pomaci u smjeru Y - prednapinjanje N/mm²

Figure 11 Displacement in Y direction – prestress load N/mm²



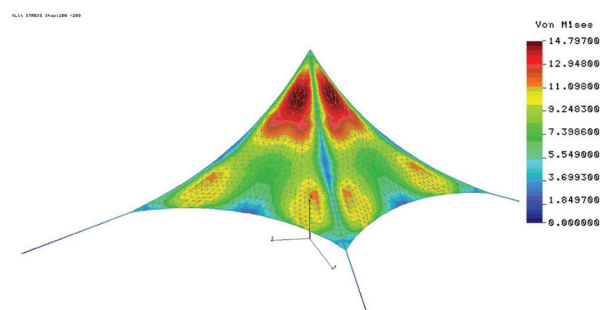
Slika 12 Max. naprezanje - prednapinjanje N/mm²

Figure 12 Von Mises stress – prestress load N/mm²



Slika 13 Pomaci u smjeru Y - opterećenje snijegom

Figure 13 Displacement in Y direction – snow load



Slika 14 Pomaci u smjeru Y - opterećenje snijegom

Figure 14 Displacement in Y direction – snow load

Opterećenje u vremenskom koraku 100, što odgovara potpunom prednapinjanju užadi uz vlastitu težinu, rezultiralo je pomacima od 13.0 mm do -17.0 mm (slika 11.), što je u usporedbi s rasponom konstrukcije zanemarivo. U ovom koraku dobiveni mali pomaci mogu poslužiti za potvrdu da je forma membranske konstrukcije dovoljno točna. Na slici 12. prikazana su Von Mises naprezanja za opterećenje prednapinjanja membrane, a rezultati pokazuju dosta dobru ujednačenost naprezanja na čitavoj konstrukciji i oni su u rasponu od 3,38 N/mm² do 2,11 N/mm². Opterećenje u vremenskom koraku 200, kako je prethodno opisano, sastoji se od sile prednapinjanja, vlastite težine i opterećenja snijegom. Pomaci konstrukcije u rasponu od 57 mm do -382 mm, dobiveni pod djelovanjem snijega, pikazani su na slici 13. Veličina ovih pomaka za membranske konstrukcije je prihvatljiva, te jedini kriterij za kontrolu pomaka je kontrola nastajanja vodenih bazena. Pomaci koji su dobiveni u ovom modelu pokazuju konstantan pad membrane što znači da nema bojazni da će doći do skupljanja vode u membrani prilikom eksploatacije. Na slici 14. prikazana su Von Mises naprezanja u vremenskom koraku 200. Maksimalno dobiveno naprezanje u vremenskom koraku 200 je 14.79 N/mm², što ne prelazi dozvoljena naprezanja pretpostavljenog materijala za membranu promatrane konstrukcije.

4. Zaključak

4. Conclusion

Ovim je radom prikazana mogućnost pronalaza oblika i analiza membranskih konstrukcija nespécializiranim programom. Postupak je moguće ponoviti s programima za numeričko modeliranje konačnim elementima koji zadovoljavaju sljedeće uvjete: mogućnost nelinearne analize i analize s uključenom geometrijskom nelinearnosti. Prednost metode je u činjenici da je cijelu konstrukciju moguće riješiti jednim programskim paketom. Druga je velika prednost u tome što je prilikom pronalaza oblika moguće uključiti modul elastičnosti u dva međusobno okomita smjera, što je vrlo bitno svojstvo s obzirom na mehaničke karakteristike materijala membrane koju koristimo za konstrukcije.

Nedostatak koji je nemoguće izbjeći je u velikom broju međukoraka koje treba učiniti da bi se došlo do traženog oblika konstrukcije. Korisnik ove metode mora dobro poznavati konstrukcije i predviđati njihovo ponašanje.

Prikazana metoda određivanja oblika plohe s minimalnom energijom pokazala se vrlo dobrom za plohe koje su obrubljene rubnim uvjetima, odnosno membranama koje su obrubljene elementima koji su u mogućnosti preuzeti momente savijanja.

5. REFERENCE

5. REFERENCES

- [1.] Gunnar Tibert, Numerical analyses of cable roof structures, 1999
- [2.] B.N.Bridgens, P.D.Gosling, M.J.S.Birchall, Tensile fabric structures: concepts, practice & developments, The Structural Engineer, Srpanj, 2004
- [3.] B.N.Bridgens, P.D.Gosling, M.J.S.Birchall, Membrane material behavior: concepts, practice & developments, The Structural Engineer, Srpanj, 2004
- [4.] Horst Berger, Structural form in architecture, Structure magazine, Studeni, 2007
- [5.] Horst Berger, Great achievements, Structure magazine, Studeni, 2007
- [6.] COSMOS/M (2008), Manual GeoStar V2.95
- [7.] COSMOS/M (2008), Manual NStar V2.95Autori
- [8.] L.Pakrastinsh, K.Rocens, Calculation principles of cable material consumption depending on the nodal displacements and geometrical parameters of hierarchic roof, Institute of Structural Engineering and Reconstruction, Riga Technical University, Azenes St 16, Riga LV-1048, Latvia
- [9.] L.Pakrastinsh, K.Rocens, Effect of the type of substructure on cable material consumption, Institute of Structural Engineering and Reconstruction, Riga Technical University, Azenes St 16, Riga LV-1048, Latvia

AUTORI · AUTHORS**Krunoslav Pavković**

Završio je 2007. godine Građevinski fakultet, a 2013. godine obranio doktorsku disertaciju. Primarni je interes njegova rada projektiranje konstrukcija iz čega se posebno izdvajaju čelične konstrukcije i razvoj novih tehnologija spajanja drvenih konstrukcija. Od ostalih znanja i vještina izvrsno poznaje programske pakete: Abaqus CAE, Staad Pro., Robot SA Professional, Solidworks COSMOS M, Advance Steel, Advance Concrete i AutoCAD. Ima iskustva u modeliranju složenih problema s materijalnom i geometrijskom nelinearnosti te s programiranjem podrutina. Od 2007. godine zaposlen je na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu na Graditeljskom odjelu. Tijekom svoga rada na Tehničkom veleučilištu objavio je jedan izvorni znanstveni rad u CC časopisu, šest SCI-E znanstvenih radova i desetak ostalih radova u časopisima i konferencijama s međunarodnom recenzijom.

Korespondencija

krunoslav.pavkovic@tvz.hr

Boris Baljkas

Rođen je 1949. godine u Zagrebu. Završio je Građevinski fakultet i od 1973. do 2003. godine zaposlen na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Od 2003. godine profesor je na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu. Područja njegovog stručnog djelovanja su nosive konstrukcija i teorije konstrukcija. Autor je preko 90-tak (90-ak) stručnih i znanstvenih radova, nekoliko patenata, knjiga i novih proizvoda. Projektant je velikog broja projekata konstrukcija u području visokogradnje od armiranog betona, drveta, čelika i plastika. Ovlašteni je revident za betonske, čelične i drvene konstrukcije.

Korespondencija

boris.baljkas@tvz.hr