

# ZAVISNOST SILA ZATEZANJA MEMBRANSKIH KONSTRUKCIJA OD RAZLIČITIH PARAMETARA POD DEJSTVOM KONCENTRISANE SILE

## TENSILE MEMBRANE STRUCTURE FORCES DEPENDENCE ON DIFFERENT PARAMETERS UNDER POINT LOAD ACTION

Vuk MILOŠEVIĆ  
Dragan KOSTIĆ  
Jelena MILOŠEVIĆ

ORIGINALNI NAUČNI RAD  
ORIGINAL SCIENTIFIC PAPER  
UDK: 624.042.4  
doi: 10.5937/GRMK2001029M

### 1 UVOD

Zategnute membranske konstrukcije trenutno su tema mnogih istraživanja. Iako njihovo projektovanje još uvek nije standardizovano na nivou Evrope, publikovane su *Smernice za projektovanje* [5] i *Nacrt evropskog pravilnika* [17]. Postoji mnogo povoljnih karakteristika membranskih konstrukcija, pre svega, njihova mala sopstvena težina, njihove atraktivne forme i veliki rasponi. Uz to, poznata su i njihova nepovoljna svojstva. Zbog svojih termičkih karakteristika, one se češće koriste za natkrivanje nego za zatvaranje prostora. Upravo ova tema trenutno je aktuelna u istraživanjima [4,8,10]. Ipak, postoji i puno aspekata membranskih konstrukcija koji još uvek nisu dovoljno istraženi. Efekti dejstva koncentrisanih sila za sada nisu potpuno razjašnjeni. Ovaj rad prikazuje istraživanje koje se bavi ispitivanjem uticaja koncentrisanih sila na sile zatezanja u membrani. Koncentrisane sile u proračunu najčešće predstavljaju dejstvo ljudi koji stoje na membrani, što se obično dešava pri održavanju membrane. Sile zatezanja su ključne u proračunu membranskih konstrukcija. Na osnovu maksimalnih sila zatezanja, određuje se odgovarajući membranski materijal za svaku konstrukciju. Zbog

### 1 INTRODUCTION

Tensile membrane structures are subject of many ongoing researches. On the European level, they are still not codified; however, the *Design Guide* [5] and *Prospect for European Guidance for the Structural Design* [17] are published. There are many advantageous properties of tensile membrane structures, most notably their low self-weight, attractive forms, and large spans. Additionally, some of their negative aspects are also known. Thermal properties of tensile membrane structures are the main reason why they are preferably used to cover open spaces instead of enclosing them. This is one of the most interesting research areas in the field of tensile membrane structures [4,8,10]. However, there are also some aspects of tensile membranes which are still insufficiently explored. The effects of point load actions on tensile membrane structures are currently incompletely clarified. This paper presents research that deals with the impact of point load actions on changes of membrane forces. Point load actions are mostly induced by persons standing on the membrane. This usually happens during the maintenance of the structure. On the

---

Docent dr Vuk Milošević, master inž.arh., Univerzitet u Nišu  
Građevinsko-arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva  
14, 18000 Niš, [vukamer@yahoo.com](mailto:vukamer@yahoo.com)  
V.prof. dr Dragan Kostić, dipl.inž.građ., Univerzitet u Nišu  
Građevinsko-arhitektonski fakultet, Aleksandra Medvedeva  
14, 18000 Niš, [dragan.kostic@gaf.ni.ac.rs](mailto:dragan.kostic@gaf.ni.ac.rs)  
Docent dr Jelena Milošević dipl.inž.arh., Univerzitet u  
Beogradu Arhitektonski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra  
73/II, 11000 Beograd, [jelena@arh.bg.ac.rs](mailto:jelena@arh.bg.ac.rs)

---

Vuk Milosevic, PhD, Assistant Professor, Faculty of Civil  
Engineering and Architecture, University of Nis, Aleksandra  
Medvedeva 14, 18000 Nis, [vukamer@yahoo.com](mailto:vukamer@yahoo.com)  
Dragan Kostic, PhD, Associate Professor, Faculty of Civil  
Engineering and Architecture, University of Nis, Aleksandra  
Medvedeva 14, 18000 Nis, [dragan.kostic@gaf.ni.ac.rs](mailto:dragan.kostic@gaf.ni.ac.rs)  
Jelena Milosevic, PhD, Assistant Professor, Faculty of  
Architecture, University of Belgrade, Bulevar kralja  
Aleksandra 73/II, 11000 Belgrade, [jelena@arh.bg.ac.rs](mailto:jelena@arh.bg.ac.rs)

strukture membranskog materijala, sile zatezanja definišu se u dva pravca – glavnom i pomoćnom, tako da prate pravce vlakana tkanog membranskog materijala.

Ne postoji veliki broj istraživanja koja se bave dejstvom koncentrisanih sila na membranske konstrukcije, niti njihovim silama zatezanja. Ipak, Huntington tvrdi da dejstvo koncentrisanih sila treba uzeti u obzir pri proračunu membranskih konstrukcija [9]. Poznato je da koncentrisane sile izazivaju velike ugibe i promene sile zatezanja kod membrana [12]. Jedno istraživanje bavi se ugibima gumene membrane pod dejstvom koncentrisane sile [15]. Valdez, Migel i Onate predlažu metodologiju analize i testiraju je na ravnoj membrani opterećenju koncentrisanom silom [20]. Ugibi membrane pod dejstvom koncentrisane sile, u zavisnosti od nekoliko parametara, takođe su istraživani [13,14]. Bridžens, Gosling i Birčal ispitivali su karakteristike membranskog materijala i prikazivali naprezanja membrane u glavnom i pomoćnom pravcu, pri biaksijalnom testiranju [2,3]. Gosling i Bridžens predložili su novi pristup prikazivanju ponašanja materijala [6]. Bridžens i Birčal prikazali su rezultujuće sile zatezanja membrane pod dejstvom opterećenja od snega i vetra [1]. Gosling i koautori dali su podatke za sile zatezanja pod istim opterećenjem u sklopu svog istraživanja [7].

Ovaj rad prikazuje istraživanje zavisnosti sile zatezanja od različitih parametara. Nadograđuje već objavljeni rad [11] dodavanjem još jednog parametra. Promenljivi parametri jesu visina modela, intenzitet sile prednaprezanja i orijentacija membranskog materijala. Cilj istraživanja jeste da načini korak ka boljem razumevanju efekata dejstva koncentrisanih sila na membranske konstrukcije i ka otkrivanju njihovih tipova koji su osjetljiviji na ovo dejstvo. Uz to, istraživanje teži davanju odgovora na pitanje koliko je značajno dejstvo koncentrisanih sila na membranske konstrukcije. Istraživanje će biti sprovedeno tako što će biti upoređivane maksimalne sile zatezanja pod dejstvom koncentrisane sile i još jednog uobičajenog opterećenja, pri različitim vrednostima analiziranih parametara. Vetar i sneg često deluju na membranske konstrukcije. Seizmička dejstva kod njih nisu značajna zbog male težine konstrukcije, međutim, ukoliko konstrukcija sadrži i neke teške delove, treba sprovesti seizmičku analizu [5,21]. Stoga, zbog dinamičke prirode dejstva vetra, opterećenje od snega – kao najmanje kompleksno – izabrano je za poređenje s dejstvom koncentrisane sile.

## 2 METODOLOGIJA

Istraživanje predstavljeno u ovom radu izvedeno je na modelima membranskih konstrukcija formiranih u softveru Sofistik [16]. Korišćeni softver već je upotrebljavan u naučnim istraživanjima, na primer, u doktorskim disertacijama [13,18,19]. Određeni parametri modela nisu menjani, dok su drugi varirani kako bi se ispitao njihov uticaj na intenzitete sile zatezanja.

Svi modeli imaju kvadratnu osnovu, sa stranicom dužine 6 m. Modeli su sedlastog oblika, sa po dva viša i po dva niža oslonca. Ivični oslonci su pravi i nepomerljivi. Karakteristike membranskog materijala

other hand, membrane forces are fundamental during the structural analysis of tensile structures. Based on the values of maximum tensile force, the appropriate membrane material is selected for each analyzed structure. Due to the membrane material structure, membrane forces are analyzed in two directions, warp and weft, following the yarns of the woven fabric.

There are few researches investigating point load actions on tensile membrane structures or the membrane forces of tensile membranes. However, Huntington states that point loads should be taken into account in the structural analysis of tensile membrane structures [9]. It is known that point load actions cause large deflections and changes in tensile membrane forces [12]. There is a research exploring the deflections of a rubber membrane under point load [15]. Valdes, Miguel and Onate test the proposed analysis methodology on flat membrane under point load [20]. Deflections of membrane structures under point load depending on several parameters are also investigated [13,14]. Bridgens, Gosling and Birchall investigate membrane material behaviour and show warp and weft stresses under biaxial testing [2,3]. Gosling and Bridgens proposed a new approach for fabric stress-strain behaviour representation [6]. Bridgens and Birchall present results for membrane forces under snow and wind loading [1]. Gosling et al. also provide data for membrane forces under the same loads as a part of their research [7].

This paper presents research done on the dependence of membrane forces on different parameters. It builds on the previously published paper [11] by adding one more variable parameter into consideration. Variable parameters are the height of the model, the intensity of prestressing forces, and the orientation of the membrane material. The goal of the research is to make a step towards better understanding the effects of point load actions and finding out which types of tensile membrane structures are more susceptible to point load actions. Additionally, this research aims to investigate the importance of the point load actions for tensile membrane structures. It will be done by comparing maximal membrane forces under point and another common load at different sets of variable parameters. Wind and snow loads act commonly on tensile membrane structures. Seismic loads are insignificant because of the lightweight nature of membranes; however, if the structure incorporates some heavy parts, a seismic analysis should be conducted [5,21]. Therefore, due to the dynamic nature of wind actions, snow load was selected for comparison with point load action as the least complex.

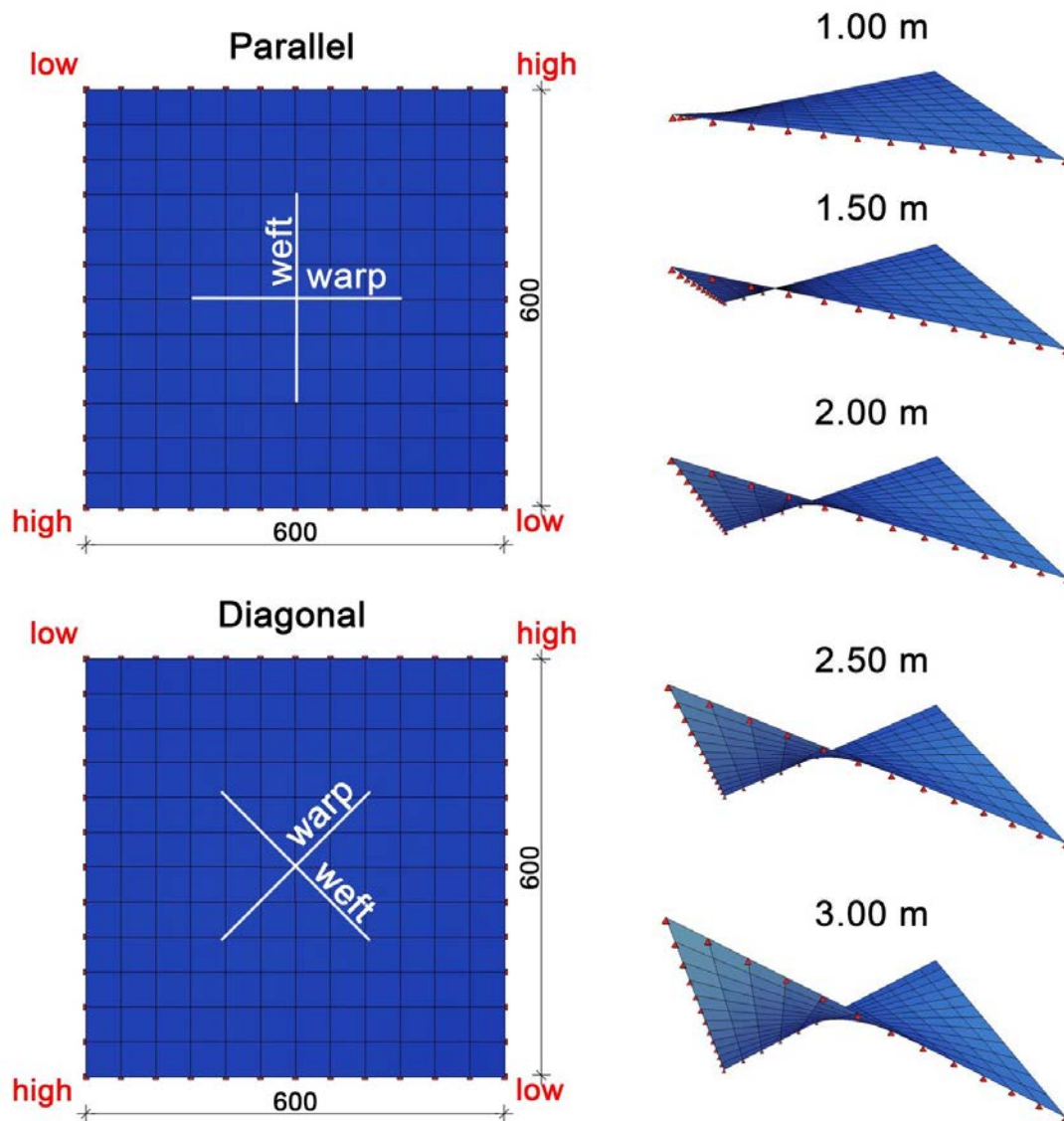
## 2 METHODOLOGY

Research for this paper is conducted on models of tensile membrane structures which are formed in software Sofistik [16]. This software was already used in scientific researches, for example, in the doctoral thesis [13,18,19]. Some model parameters are fixed for all models, while others are varied in order to investigate their influence on membrane force intensities.

All models have a square base with a 6 m side. The models are saddle-shaped with two high and two low supports. Edges are straight and fixed. Membrane material properties are also unvaried. Elastic modulus is

nisu varirane. Moduo elastičnosti je 600 kN/m, moduo smicanja – 25 kN/m, a Poasonov koeficijent je 0,3. Debljina membrane je 1 mm. Membrana je podeljena na 144 konačna elementa, dimenzija približno 0,5x0,5 m. Ista opterećenja deluju na sve modele. Koncentrisana sila intenziteta 1 kN deluje u centru membrane vertikalno naniže. Opterećenje od snega deluje intenzitetom 0,6 kN/m<sup>2</sup> vertikalno naniže preko cele membrane, slično kao i u prethodnim istraživanjima [1,7].

600 kN/m, the shear modulus is 25 kN/m, and the Poisson coefficient is 0.3. The thickness of the membrane is 1 mm. The membrane is divided into 144 finite elements, approximately 0.5x0.5 m. The same loads are applied to all models. Point load with 1 kN intensity, the vertical downward direction is applied in the centre of the membrane. Snow load of 0.6 kN/m<sup>2</sup> with a vertical downward direction is applied across the whole membrane, as in previous researches [1,7].



Slika 1. Promena orijentacije membranskog materijala i visine modela korišćene u istraživanju  
Figure 1. Variation of material orientation and model height used in research

Tri parametra konstrukcije su varirana. To su orijentacija membranskog materijala, visina modela i intenzitet sila prednaprezanja membrane. Orijentacija materijala određuje se prilikom projektovanja. Ona utiče na izgled i konstruktivne karakteristike membrane. Dve vrste orijentacije se najčešće primenjuju – paralelna i dijagonalna. Kod paralelne orijentacije vlakna membrane paralelna su sa ivicama membrane, a kod dijagonalne vlakna su paralelna s dijagonalama osnove. Obe ove orijentacije analizirane su u istraživanju. Promena visine

Three parameters of the structure are varied. They are the orientation of the membrane material, height of the model, and intensity of prestress forces. The orientation of the membrane material, or patterning direction, is defined during the design process. It affects the visual appearance and the structural behaviour of the membrane. Two orientations are most commonly used, parallel and diagonal. In parallel patterning yarns of the membrane material are in the same direction as the edges, while in diagonal patterning yarns are in the

modela iste osnove utiče na promenu zakrivljenosti. Što je veća visina modela, to je veća i zakrivljenost. S obzirom na osnovu analiziranih modela dimenzija 6x6 m, za visinu modela, kao najrealističnije, izabrane su vrednosti između 1 m i 3 m. Ispitivane su sledeće vrednosti: 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 i 3 m. Prednaprezanje membrane služi da pomogne u odupiranju spoljašnjem opterećenju. Ono se definiše vrednošću intenziteta u glavnom i pomoćnom pravcu, ali su u ovom istraživanju oni uzimani kao jednaki. Vrednosti od 1 do 5 kN/m koriste se najčešće i kao takve su uzete za granične vrednosti u ovom istraživanju. Ispitivane vrednosti intenziteta prednaprezanja su 1, 2, 3, 4 i 5 kN/m. Slika 1 prikazuje promene orijentacije membrane i visine ispitivanih modela. Promene intenziteta prednaprezanja nisu vidljivije, te nisu mogle biti prikazane na slici.

Analizirane su dve vrste orijentacije membranskog materijala, pet visina modela i pet različitih intenziteta prednaprezanja membrane. Ovo ukupno daje 50 različitih modela koji će biti ispitivani. Svaki model će biti izložen dejstvu opterećenja, a rezultati maksimalnih sila zatezanja biće praćeni. Analiza je izvršena po teoriji trećeg reda. Softver Sofistik koristi modifikovanu metodu gustine sile za proračun membranskih konstrukcija.

### 3 REZULTATI I DISKUSIJA

Prikazano istraživanje podeljeno je u tri dela. U prvom delu, analiziran je raspored intenziteta sila zatezanja. Promene intenziteta sila su praćene i opisane. Drugi deo posvećen je analizi parametara koji utiču na promene intenziteta sila zatezanja. Rezultati ovog dela mogu da se koriste za smanjenje maksimalnih sila zatezanja pod dejstvom koncentrisane sile. U trećem delu istraživanja, ispitivan je značaj dejstva koncentrisanih sila na membranske konstrukcije. Upoređene su rezultujuće maksimalne sile zatezanja pod dejstvom koncentrisane sile i opterećenja od snega.

#### 3.1 Raspored sila zatezanja

Nakon izvršenog proračuna svih modela, usledila je analiza rezultata. Primećeni su određeni obrasci ponašanja kada je u pitanju raspored intenziteta sila zatezanja u membrani. Jedan karakterističan primer prikazan je na slici 2. Na toj slici prikazani su rezultati za model koji ima visinu 2 m, intenzitet prednaprezanja 3 kN/m i paralelnu orijentaciju materijala. Slika prikazuje vrednosti intenziteta sila zatezanja u glavnom i pomoćnom pravcu, i od dejstva koncentrisane sile i od dejstva snega. Kao što je i bilo očekivano, maksimalna sila zatezanja, pod dejstvom koncentrisane sile, zabeležena je na mestu dejstva opterećenja, odnosno u centru membrane. U glavnom pravcu područje sila zatezanja s višim intenzitetom proteže se duž vlakana glavnog pravca prema ivicama membrane. Najveći deo membrane trpi samo male promene u intenzitetima sila zatezanja. Na manjem delu membrane dolazi do smanjenja intenziteta sila zatezanja. Slično se događa i

same direction as the diagonals of the base. Both of these orientations are analyzed in this research. Changing the height of the models with the same base directly affects the curvature of the model. The higher the model, the greater the curvature is. For the 6x6 m base, in this research, the height of the models is varied from 1 to 3 m. These values are selected as the most realistic for the given base dimension. The analyzed values of the model height are 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, and 3.0 m. Prestressing the membrane will help it resist external loads more efficiently. The intensity of the prestress is defined separately in warp and weft direction, but in this research, these values are taken to be the same. The range of prestressing values from 1 to 5 kN/m covers the most frequently used prestress intensities. Therefore, in this research, values of 1, 2, 3, 4, and 5 kN/m are selected for analysis. Figure 1 shows the variations of membrane orientation and model height. The change of prestressing intensity is not shown since it does not affect the appearance of the membrane.

There are two variations in material orientation, five different values for the height of the models, and five different values for the prestress intensities. This makes a total of 50 different models that will be analyzed. Each of the models will be loaded, and resulting maximal membrane forces will be monitored. The third-order theory is used in the analysis. Software Sofistik uses a modified force density method for the calculation of membrane structures.

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

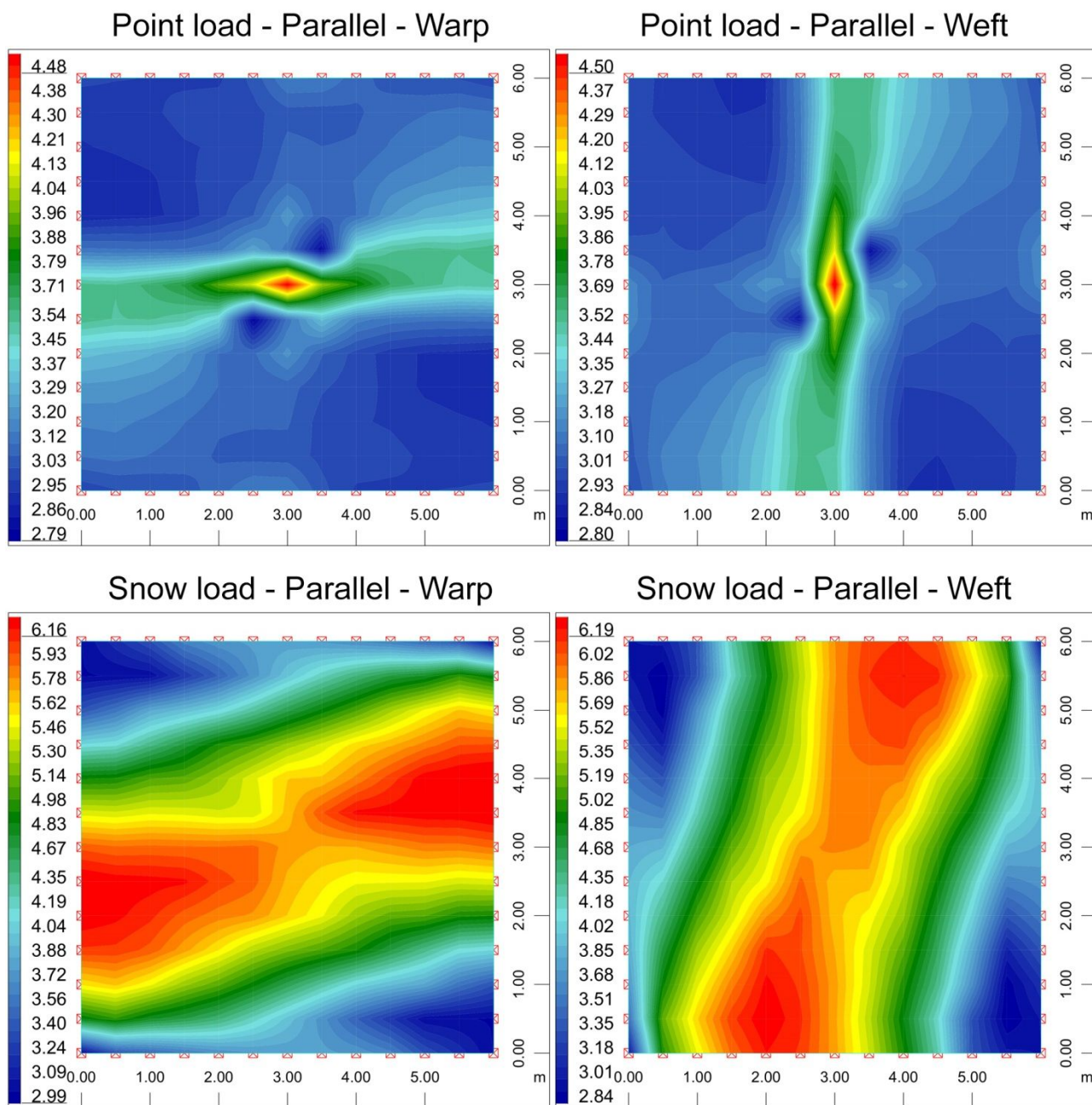
The research is divided into three parts. In the first part layout of the membrane forces under point load is investigated. Changes of membrane forces are monitored and described. The second part of the research analyzes the parameters that influence changes of membrane forces. The obtained results can be used for reducing maximal membrane forces under point load. The third part of the research investigates the importance of point load actions to tensile membrane structures. Resulting maximal membrane forces from point load action will be compared to the results under snow load.

#### 3.1 Force intensities layout

After the calculation has been carried out on all models, the results were analyzed. Specific patterns of behaviour are noted regarding the layout of membrane force intensities. One typical example is shown in Figure 2. In this figure, the results from a model with the 2 m height, prestress intensity of 3 kN/m, and parallel membrane orientation are presented. The figure presents membrane forces in both warp and weft direction, from point load and snow load. As expected, maximal membrane forces under point load in both directions occur in the position of the point load, i.e. in the centre of the membrane. Area of higher membrane forces in warp extends along the direction of warp yarns towards the edge supports. The largest part of the membrane suffers only small changes in membrane force. A smaller part of the membrane will experience a reduction of membrane forces. A similar situation is in

u pomoćnom pravcu, gde oblast s većim intenzitetom sila prati vlakna pomoćnog pravca, počevši od centra membrane. Zapravo, rasporedi intenziteta sila zatezanja u glavnom i u pomoćnom pravcu ogledalski su preslikani sa osom simetrije koja prolazi kroz dva niža ili dva viša oslonca. Nasuprot ugibima, koji su pod dejstvom snega najveći u centru membrane, sile zatezanja su najviše blizu ivičnih oslonaca. Najniže sile zatezanja zabeležene su u nižim osloncima. Rasporedi intenziteta sila pod dejstvom snega u glavnom i pomoćnom pravcu takođe su simetrični po dijagonalama.

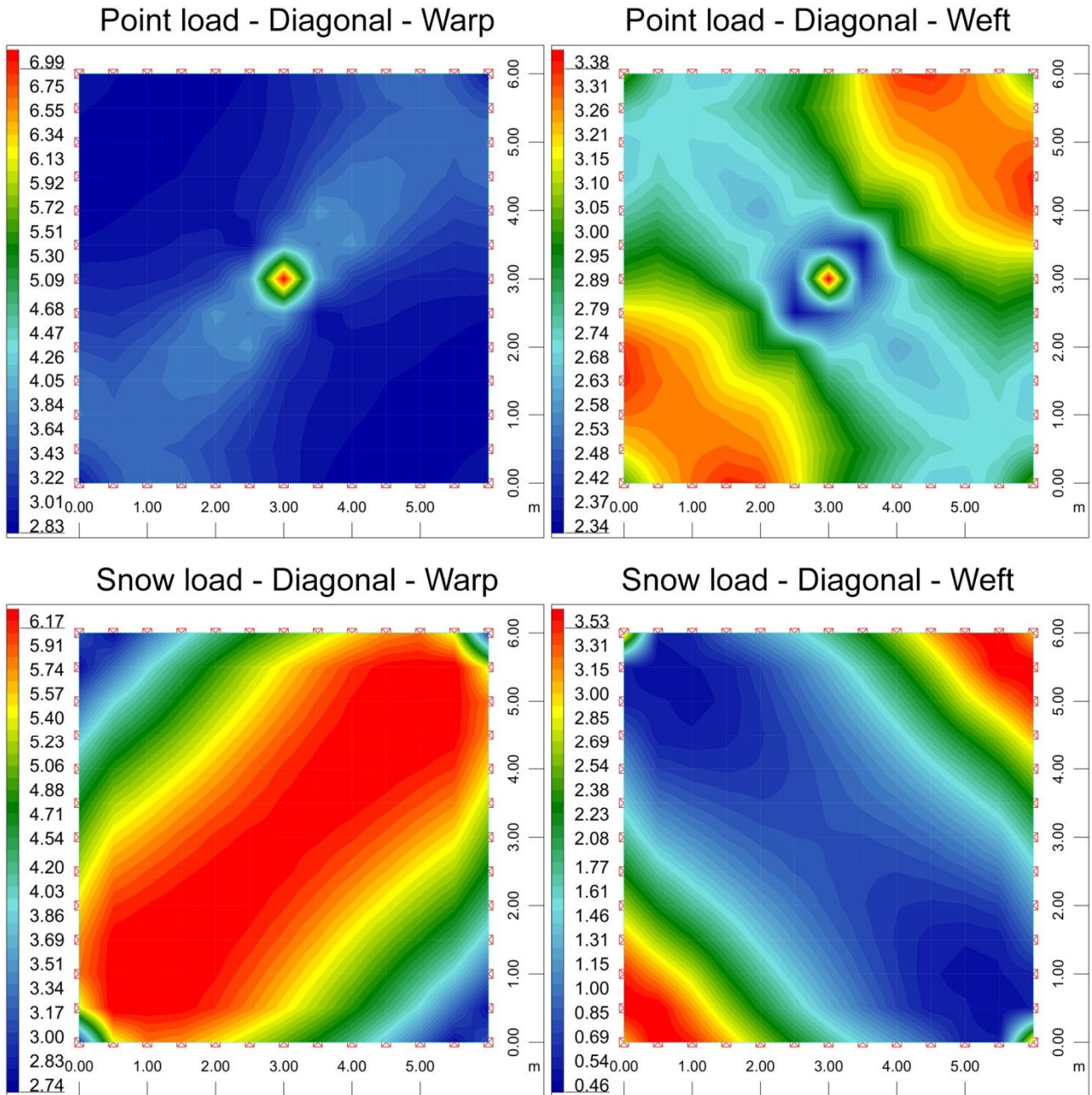
the weft direction, where higher membrane forces follow the direction of weft yarns, starting from the centre. Actually, the layout of forces in weft and the layout in warp direction are mirrored along the axis defined by either two low points or two high points. In contrast to deflections where maximal deflections are recorded in the centre, the snow load produces maximal membrane forces close to the edge supports. Minimal forces occur at low points. The layout of membrane forces under snow load in warp and weft are also mirrored along diagonals.



Slika 2. Sile zatezanja analiziranog modela s paralelnom orijentacijom materijala pod dejstvom koncentrisane sile i opterećenja od snega – u glavnom i u pomoćnom pravcu

Figure 2. Membrane forces of the analyzed model with parallel patterning under point and snow load in warp and weft directions





Slika 3. Sile zatezanja analiziranog modela s dijagonalnom orijentacijom materijala pod dejstvom koncentrisane sile i opterećenja od snega – u glavnom i u pomoćnom pravcu

Figure 3. Membrane forces of the analyzed model with diagonal patterning under point and snow load in warp and weft directions

Slika 3 prikazuje rezultate za model s visinom od 2 m, intenzitetom prednaprezanja 3 kN/m i dijagonalnom orijentacijom materijala. Jedina razlika u poređenju s modelom prikazanim na slici 2 jeste u orijentaciji materijala. Ipak, rezultati kod ovih modela uočljivo su drugačiji, i u pogledu intenziteta sile zatezanja i prema njihovom rasporedu. U odeljku 3.2 biće detaljnije razmatrani intenziteti sile, dok se ovaj deo bavi samo njihovim rasporedom. Pri dejstvu koncentrisane sile, maksimalne sile

Figure 3 shows the results from the model with 2 m height, prestress intensity of 3 kN/m, and diagonal patterning. The only difference compared to the model in Figure 2 is in membrane material orientation. However, the results differ significantly, both in the intensity of membrane forces and in their layout. Chapter 3.2 will discuss the maximal intensity of membrane forces in more detail, while here, only the layout of forces will be discussed. Under point load, maximal membrane forces

zatezanja u glavnom pravcu zabeležene su na mestu dejstva opterećenja, odnosno u centru membrane. Visoki intenziteti sila zatezanja koncentrisani su oko ove tačke. Međutim, u pomoćnom pravcu, maksimalne sile primećene su ili u centru membrane ili kod ivica membrane blizu viših oslonaca. Kod viših intenziteta prednaprezanja i viših modela, maksimalne sile zatezanja u pomoćnom pravcu nisu se nalazile u centru membrane. Ovo se objašnjava većom sposobnošću membrane da se odupre dejstvu koncentrisane sile u centralnom delu bilo zbog veće zakrivljenosti, zbog povećanog intenziteta prednaprezanja ili zbog kombinacije ovih faktora. Niži intenziteti sila zatezanja nalaze se blizu nižih oslonaca, a u nekim slučajevima u centru membrane. Raspored sila zatezanja u pomoćnom pravcu skoro se potpuno razlikuje u odnosu na model s paralelnom orijentacijom materijala. U glavnom pravcu, oblast membrane s višim silama zatezanja pruža se duž glavnih vlakana prema višim osloncima. Veći deo membrane ima male promene intenziteta sile zatezanja. Raspored intenziteta sila zatezanja sličan je modelu s paralelnom orijentacijom materijala, budući da područje visokih intenziteta sile zatezanja prati glavna vlakna, s tim što su vlakna drugačije orijentisana. Pod dejstvom opterećenja od snega, u glavnom pravcu, najveće sile zatezanja nalaze se u centralnom delu membrane i ka višim osloncima. Treba napomenuti i to da su ponovo visoki intenziteti sila zatezanja raspoređeni duž vlakana pravca koji se razmatra. Najniže sile zatezanja postoje kod nižih oslonaca. Raspored intenziteta je u pomoćnom pravcu obrnut. Oblast s nižim intenzitetom sila zatezanja proteže se od centralnog dela membrane ka nižim osloncima. Maksimalne sile zatezanja nalaze se blizu viših oslonaca.

### 3.2 Promena intenziteta sila zatezanja

U ovom odeljku prikazani su rezultati za svih 50 modela opterećenih koncentrisanom silom. Najpre su prikazani rezultati za modele s paralelnom orijentacijom membranskog materijala. Intenzitet prednaprezanja i visina modela varirani su prema usvojenoj metodologiji. Maksimalne sile zatezanja ovih modela prikazane su na slici 4. Grafici na slici prikazuju rezultate za glavni i pomoćni pravac zasebno. Na sličan način, na slici 5 prikazani su i rezultati modela s dijagonalnom orijentacijom materijala.

Prvi zaključak u vezi s rezultatima predstavljenim na slici 4 jeste da su maksimalne sile zatezanja pod dejstvom koncentrisane sile iste i u glavnom i u pomoćnom pravcu. Ovakvo ponašanje objašnjava se dvostrukom simetrijom membrane. U slučaju paralelne orijentacije materijala, vlakna glavnog i pomoćnog pravca iste su dužine i jednako su opterećena, te su sile zatezanja iste. Sledeći zaključak jeste da je uticaj dva analizirana parametra na sile zatezanja potpuno različit. Može se primetiti da visina modela praktično ne utiče na vrednost maksimalnih sila zatezanja. Ovo je veoma zanimljivo, jer se smatra da je povećanje visine modela, odnosno povećanje zakrivljenosti modela, način da se smanje negativni uticaji spoljašnjeg opterećenja. Međutim, u slučaju paralelne orijentacije materijala, vlakna nisu zakrivljena iako je model zakrivljen, budući da se forma modela može generisati s dva seta pravih linija. Stoga, povećanje visine modela ne utiče na

in warp occur at the position of point load, in the centre of the membrane. High intensities are concentrated around this point. However, in weft direction maximal forces occur either in the centre of the membrane or at the edge supports close to high points. At higher prestress intensities and larger height of the models, maximal forces in weft are unlikely to occur at the centre. This is explained by the increased capacity of the membrane under the position of point load to resist loading either by increased curvature, increased prestress forces, or both. Lower membrane forces exist in the areas close to the low supports and, in some cases, in the centre of the membrane. The layout of forces in the weft direction is almost completely different compared to the model with parallel orientation. In warp direction, the area of higher forces spreads along the direction of warp yarns towards the high supports. Most of the membrane has small changes in membrane forces. This layout is similar to the one on the model with parallel orientation since the areas of high membrane forces are aligned with the warp yarns, only the yarns are differently oriented. Under snow load in the warp direction, high membrane forces are located in the central part of the membrane and towards the high supports. It can be noted that, once again, the arrangement of high forces follows the direction of the analyzed yarns. Lowest membrane forces are present at low supports. In weft direction, the layout is quite the opposite. The area of low membrane forces stretches in the central part of the membrane and towards the low supports. Maximal membrane forces are present close to high supports.

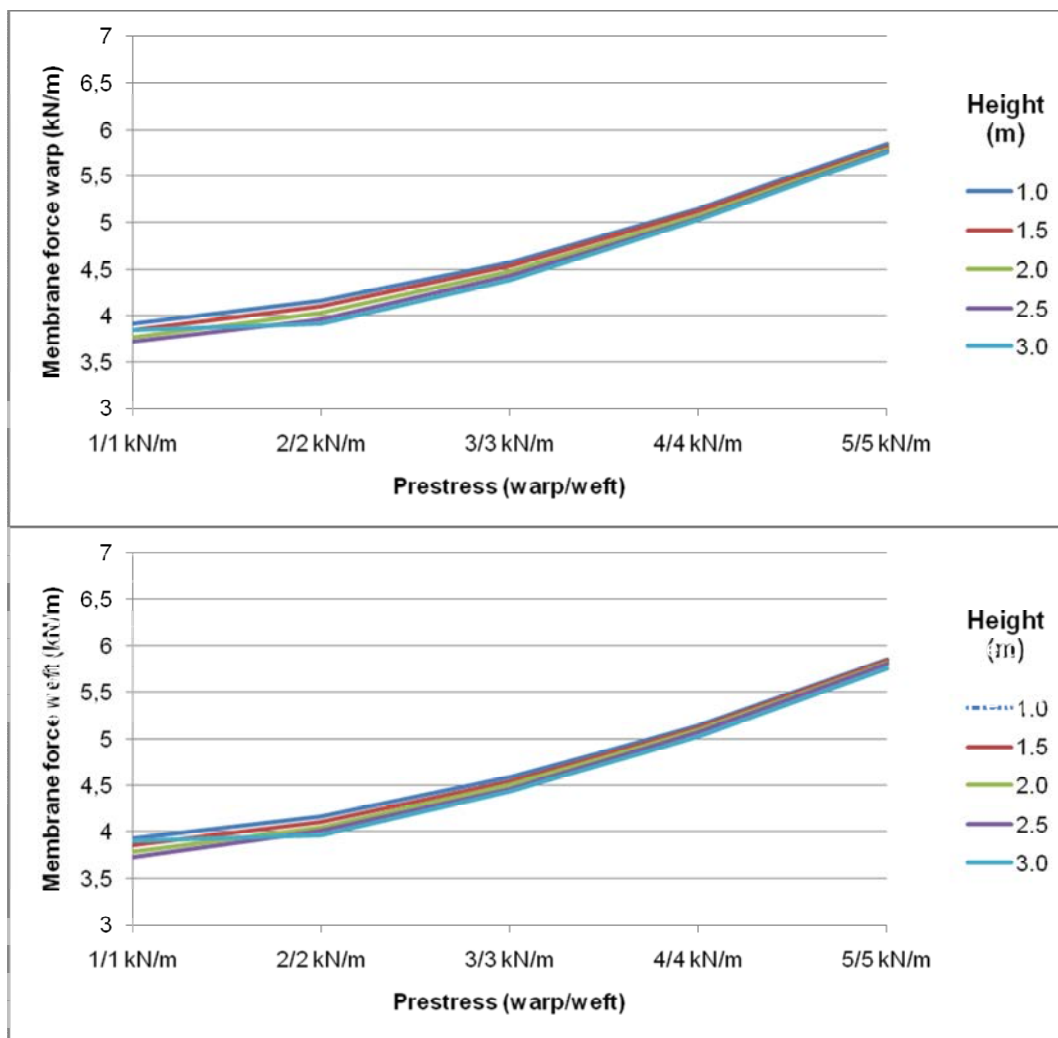
### 3.2 Change of force intensities

This chapter shows the results for all 50 analyzed models under point load action. First, the results for models with parallel membrane material orientation are presented. The intensity of the prestress and the height of the models were varied in the selected range. Maximal membrane forces of these models are shown in Figure 4. The graphs in this figure show the results for warp and weft direction separately. In the same manner, the results of models with diagonal patterning are given in Figure 5.

The first conclusion about the results presented in Figure 4 is that the maximal membrane forces under point load in warp and weft directions are the same. This behaviour is explained by double symmetry of the membrane. In the case of parallel membrane material orientation, the yarns of warp and weft have the same length and are evenly loaded, thus the resulting membrane forces are the same. The next conclusion is that the impact of the two analyzed parameters on maximal membrane forces is much different. It can be noticed that the height of the models practically does not affect the value of the maximal membrane force. This is very interesting since increasing the height of the model, i.e. increasing the curvature of the models, is often used as a method for reducing the negative effects of external loads. However, in the case of parallel patterning, yarns lack curvature, although the model is double curved since the form of the model can be generated with sets

zakrivljenost vlakana, te ostaju prava, ako zanemarimo nabore nastale tkanjem vlakana. S druge strane, povećanje intenziteta prednaprezanja dovodi do povećanja maksimalnih sila zatezanja. Ova veza je nelinearna. Promena maksimalnih sila zatezanja u slučaju svih modela pod dejstvom koncentrisane sile najveća je pri intenzitetu prednaprezanja od 1 kN/m, a opada s povećanjem intenziteta prednaprezanja. Minimalne sile zatezanja pod dejstvom koncentrisane sile nisu istraživane u ovom radu.

of straight lines. Therefore, the increase of models' height does not affect the curvature of the yarns and they remain straight if we disregard crimp. On the other hand, the increase of the prestress intensity will lead to an increase in maximal membrane forces. This relation is nonlinear. The change of maximal membrane force for all model heights, under point load, is the largest at models with the prestress intensity of 1 kN/m and this change decreases as the prestress intensity increases. Minimal forces under point load are not investigated in this research.



Slika 4. Maksimalne sile zatezanja modela s paralelnom orijentacijom materijala pri različitim vrednostima intenziteta prednaprezanja i visine modela – u glavnom (gore) i u pomoćnom pravcu (dole)

Figure 4. Maximal membrane forces of models with parallel patterning under different prestress intensity and model height, in warp (above) and weft (below)

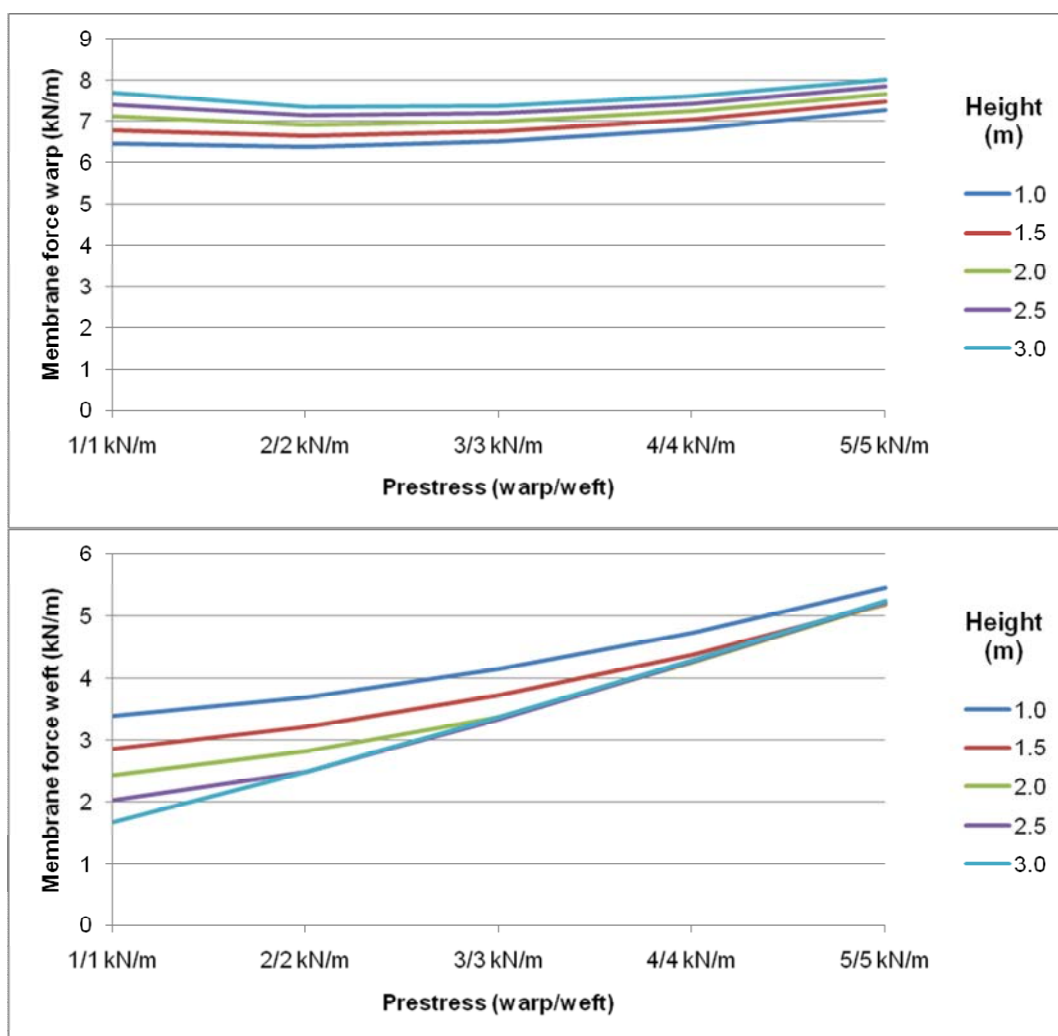
Rezultati prikazani na slici 5 prikazuju različito ponašanje membrana s dijagonalnom orijentacijom materijala, u odnosu na one s paralelnom orijentacijom. Pre svega, rezultati u glavnom i u pomoćnom pravcu nisu isti. Razlog za to jeste suprotna zakrivljenost vlakana glavnog i pomoćnog pravca kod dijagonalne orijentacije materijala. Zbog toga, opterećenja koja deluju vertikalno naniže nemaju isti uticaj na njih. U glavnom pravcu, oba analizirana parametra značajna su

The results presented in Figure 5 show different behaviour of membranes with diagonal orientation, compared to parallel orientation. The results in warp and weft direction are different. The reason for this lies in the fact that warp and weft yarns have opposite curvature in models with diagonal patterning. Therefore, vertical downward loads do not have the same impact on them. In the warp direction, both of the analyzed parameters influence the maximal membrane forces. Increase of



za vrednost maksimalnih sila zatezanja. Povećanje visine modela rezultira povećanjem maksimalne sile zatezanja. Povećanje intenziteta prednaprezanja ima kompleksnije dejstvo. Prilikom povećanja intenziteta prednaprezanja, sile zatezanja najpre opadaju, a zatim rastu. Ovakvo ponašanje detaljno je objašnjeno u prethodnom istraživanju [11]. Sila zatezanja pod dejstvom opterećenja jednaka je zbiru sile prednaprezanja i promene vrednosti sile izazvane dejstvom opterećenja. Na analiziranim modelima, promena vrednosti intenziteta sile smanjuje se s povećanjem intenziteta sile prednaprezanja, dajući sumu prikazanu na slici 5. U pomoćnom pravcu, intenzitet prednaprezanja ima veći uticaj na sile zatezanja u poređenju s visinom modela. Povećanje intenziteta prednaprezanja rezultuje povećanjem maksimalnih sila zatezanja. Visina modela ima značajniji uticaj na maksimalne sile zatezanja u pomoćnom pravcu kada su u pitanju modeli s nižim intenzitetom prednaprezanja, a taj uticaj opada s povećanjem prednaprezanja.

model height results in an increase in the maximal membrane force. The increase in the intensity of prestressing has a more complex impact. When increasing the intensity of prestressing membrane forces start declining at first, but afterward, it starts to increase. This phenomenon is explained in detail in previous research [11]. Membrane force under load equals prestressing force plus the change of membrane force due to loading. On the analyzed models, the change of membrane forces decreases as the prestress forces increase, giving the sum as presented in Figure 5. In the weft direction, the intensity of prestressing has a greater impact on membrane forces than the height of the model. The increase of prestressing intensity results in an increase in maximal membrane forces. The height of the model has a more significant influence on the maximal membrane forces in weft for models with lower prestress intensity, and it decreases as the prestress increases.



Slika 5. Maksimalne sile zatezanja modela s dijagonalnom orijentacijom materijala pri različitim vrednostima intenziteta prednaprezanja i visine modela – u glavnom (gore) i u pomoćnom pravcu (dole)

Figure 5. Maximal membrane forces of models with diagonal patterning under different prestress intensity and model height, in warp (above) and weft (below)

Intenziteti maksimalnih sila zatezanja upoređivani su kod modela s paralelnom i dijagonalnom orijentacijom materijala. Modeli s paralelnom orijentacijom imaju maksimalne sile zatezanja u glavnom pravcu od 3,72 do 5,85 kN/m. Maksimalne sile zatezanja kod modela s dijagonalnom orijentacijom materijala jesu od 6,38 do 8,01 kN/m. Ovo znači da modeli s dijagonalnom orijentacijom materijala imaju veće maksimalne sile zatezanja u glavnom pravcu. U pomoćnom pravcu, sile zatezanja kod modela s paralelnom orijentacijom materijala iste su kao i u glavnom pravcu, a kod modela s dijagonalnom orijentacijom imaju vrednosti od 1,67 do 5,46 kN/m. Treba istaći i to da svi modeli s dijagonalnom orijentacijom materijala imaju manje maksimalne sile zatezanja u pomoćnom pravcu nego modeli s paralelnom orijentacijom materijala.

### 3.3 Poređenje sila zatezanja pod dejstvom koncentrisane sile i opterećenja od snega

Raspored intenziteta i promena vrednosti intenziteta sila zatezanja analizirani su u prethodna dva poglavlja. Međutim, značaj vrednosti intenziteta sila zatezanja pod dejstvom koncentrisane sile nije razmatran. Ovaj deo istraživanja posvećen je istraživanju značaja dejstva koncentrisanih sila na membranske konstrukcije. Kako bi se ovaj značaj ispitaio, rezultati dejstva koncentrisane sile upoređeni su s rezultatima dejstva opterećenja od snega. Intenzitet koncentrisane sile od 1 kN, koji predstavlja dejstvo jednog čoveka, te tipično opterećenje snegom od  $0.6 \text{ kN/m}^2$ , uzeti su za poređenje. Ovi intenziteti opterećenja predstavljaju uobičajene vrednosti i zbog toga su izabrani za komparaciju. Slika 6 prikazuje rezultate poređenja opterećenja od snega i koncentrisane sile za modele s paralelnom orijentacijom. Maksimalne sile zatezanja pri dejstvu koncentrisane sile oduzete su od odgovarajućih sila zatezanja pri dejstvu opterećenja od snega. Praktično, negativni rezultati ukazuju na to da su sile zatezanja veće pri dejstvu koncentrisane sile nego pri dejstvu snega. Među modelima s paralelnom orijentacijom materijala nema takvih slučajeva. U najvećem broju slučajeva, sile zatezanja znatno su veće pri dejstvu opterećenja od snega. Razlika u intenzitetu sila zatezanja pri opterećenju od snega i koncentrisane sile opada s povećanjem visine modela, a najmanja je za model s najmanjom silom prednaprezanja.

Slika 7 prikazuje rezultate za modele s dijagonalnom orijentacijom membranskog materijala na isti način kao i slika 6. Rezultati prikazani na slici 7 pokazuju da su razlike zavisne – i od visine i od intenziteta prednaprezanja. U glavnom pravcu, vrednost razlike smanjuje se s povećanjem visine modela. Osim toga, vrednost razlike se smanjuje i sa smanjenjem intenziteta prednaprezanja. U pomoćnom pravcu, razlike se takođe smanjuju sa smanjenjem vrednosti prednaprezanja. Povećanje visine modela ne dovodi do jednoznačne promene razlika.

Treba napomenuti i to da među modelima s dijagonalnom orijentacijom ima puno negativnih vrednosti. U glavnom pravcu od analiziranih 25 modela postoji 16, a u pomoćnom pravcu od 25 modela postoji 11 kod kojih koncentrisana sila dovodi do većih sila zatezanja nego opterećenje od snega. Ukupno, postoji devet modela kod kojih koncentrisana sila proizvodi veće

Maximal membrane force intensities among models with parallel and diagonal patterning were also compared. Models with parallel patterning have maximal force intensities in warp direction from 3.72 to 5.85 kN/m. Maximal membrane forces of models with diagonal patterning are from 6.38 to 8.01 kN/m. This means that models with diagonal patterning have larger maximal membrane forces in the warp direction. In weft direction, membrane forces of models with parallel patterning are the same as in warp, and membrane forces of models with diagonal patterning range from 1.67 to 5.46 kN/m. It should be noted that all models with diagonal patterning have smaller membrane forces in weft direction compared to models with parallel patterning.

### 3.3 Comparison of force intensities under point and snow load

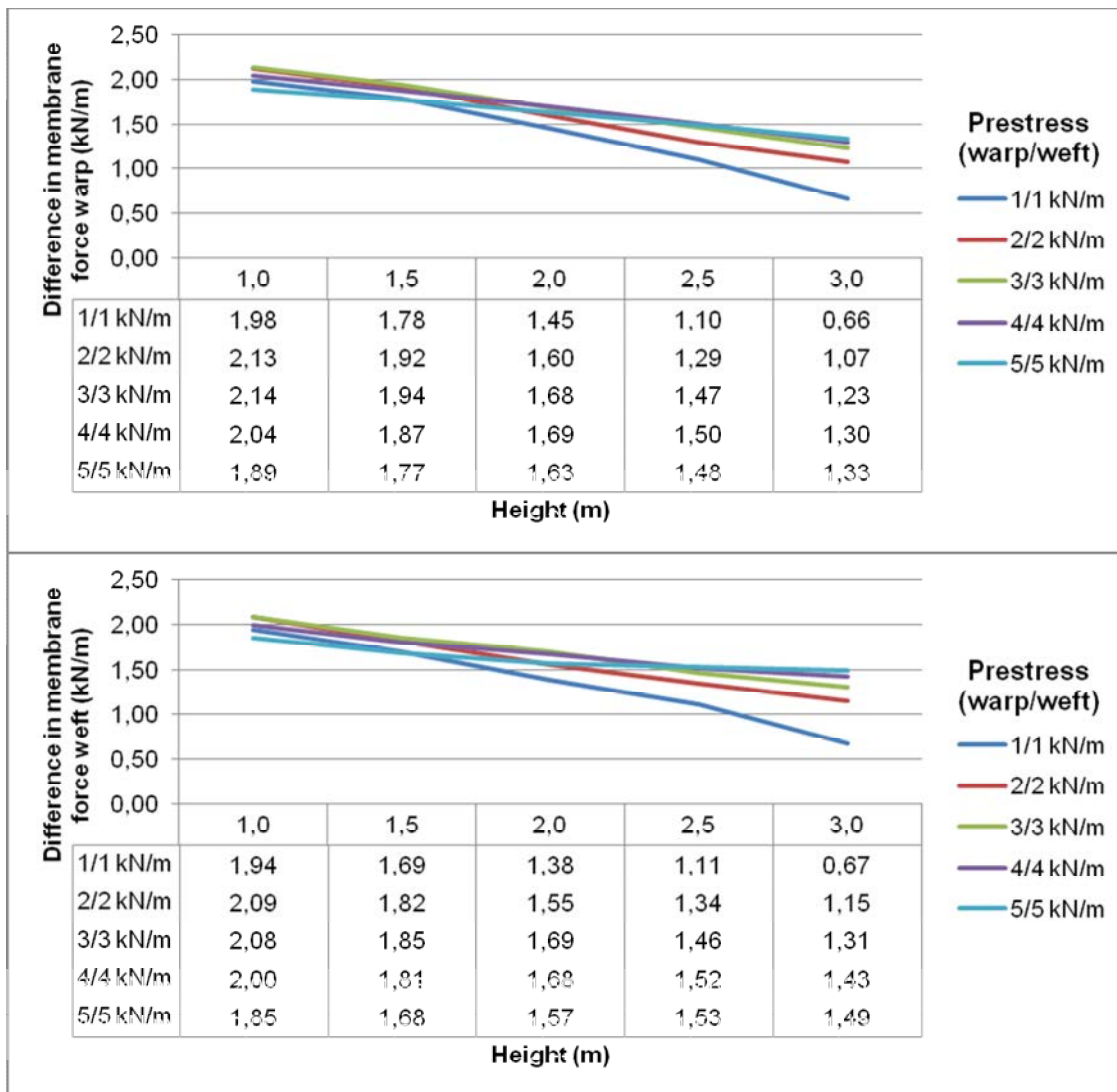
The layout of force intensities and change of force intensities were analyzed in two previous chapters. However, the importance of values of membrane forces under point load was not discussed. This part of the research is dedicated to exploring the significance of point load actions to membrane forces of tensile membrane structures. In order to check the importance of point load effects, they were compared to the effects of snow load. The intensity of 1 kN for point load, representing one man, and the typical intensity of  $0.6 \text{ kN/m}^2$  for snow load were selected for analysis. These load intensities simulate common loads acting on membrane structures and thus provide comparable results. Figure 6 presents the results of the comparison of snow load and point load effects to membrane forces for models with parallel patterning. Maximal membrane forces under point load were deducted from corresponding membrane forces under snow load. Practically, negative results would show that membrane forces are larger under point load than under snow load. Among models with parallel membrane material orientation, there are no such cases. In most cases, membrane forces are significantly larger under snow load. The difference in membrane forces under snow and point load decreases with the increase of height of the model and is the smallest for the model with the lowest prestress value.

Figure 7 presents the results for the models with the diagonal orientation of membrane material in the same way as Figure 6. Results in Figure 7 show that differences are dependent on both the height of the model and the prestress intensity. In warp direction value of differences decreases as the height of the models increases. In addition, it decreases with the decrease of the prestress intensity. In the weft direction value of differences also decreases when the prestress intensity is lowered. However, the increase of model height will not lead to an unambiguous change of differences.

It can be noted that among models with diagonal orientation, there are many cases with negative values. In warp there are 16 models out of 25 and in weft 11 out of 25 models in which point load produces larger membrane forces than the snow load. Overall, there are 9 models in which point load produces larger membrane

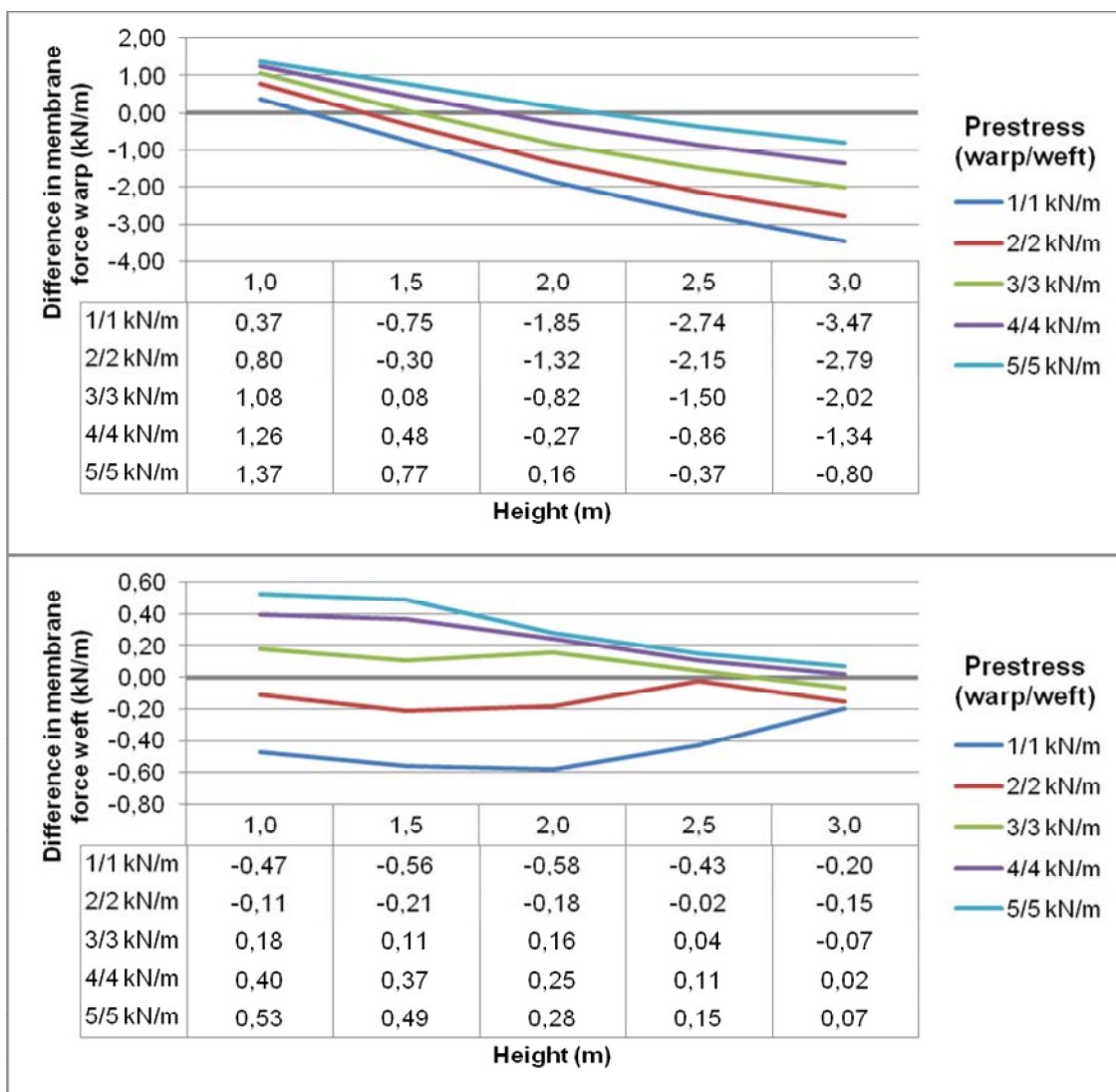
sile zatezanja i u glavnom i u pomoćnom pravcu, u poređenju sa opterećenjem od snega. Najveća razlika između sila zatezanja izazvanih koncentrisanom silom i opterećenjem od snega zabeležena je u glavnom pravcu kod modela sa intenzitetom prednaprezanja 1 kN/m i s visinom od 3 m. Ova razlika iznosi 3,47 kN/m u korist koncentrisane sile. Ovaj rezultat je značajan jer dokazuje relevantnost dejstva koncentrisanih sila na membranske konstrukcije.

forces in both warp and weft directions compared to snow load. The largest difference between point and snow load is recorded in warp direction in model with 1 kN/m prestress value and 3 m height. This difference has a value of 3.47 kN/m and is in favour of point load. This finding is very important and proves the significance of point load actions to tensile membrane structures.



Slika 6. Razlika maksimalnih sila zatezanja kod modela s paralelnom orijentacijom materijala između opterećenja snegom i koncentrisanom silom – u glavnom (gore) i u pomoćnom pravcu (dole)

Figure 6. Difference of maximal membrane forces of models with parallel patterning between snow load and point load, in warp (above) and weft (below)



Slika 7. Razlika maksimalnih sila zatezanja kod modela s dijagonalnom orijentacijom materijala između opterećenja snegom i koncentrisanom silom – u glavnom (gore) i u pomoćnom pravcu (dole)

Figure 7. Difference of maximal membrane forces of models with diagonal patterning between snow load and point load, in warp (above) and weft (below)

#### 4 ZAKLJUČAK

U ovom istraživanju, ispitivani su različiti modeli membranskih konstrukcija, opterećeni koncentrisanom silom od 1 kN u centru membrane kako bi se odredili efekti ovog dejstva na sile zatezanja. Nijedan drugi parametar modela nije menjan, izuzev orijentacije membranskog materijala, intenziteta prednaprezanja membrane i visine modela. Promenama navedenih parametara formirano je 50 različitih modela. Svi modeli su opterećeni koncentrisanom silom, a takođe i opterećenjem od snega intenziteta  $0.6 \text{ kN/m}^2$ , radi poređenja.

U prvom delu istraživanja, analiziran je raspored intenziteta sila zatezanja pod dejstvom koncentrisane sile. Zaključeno je da maksimalne sile zatezanja nastaju na mestu dejstva koncentrisane sile, izuzev u nekim slučajevima u pomoćnom pravcu kod modela s dijagonalnom orijentacijom membranskog materijala.

#### 4 CONCLUSION

In this research, different models of tensile membrane structures were tested for the effects of 1 kN point load acting in the centre of the membrane on membrane forces. All model parameters except the orientation of the membrane material, the intensity of the prestressing force and the model height were kept constant. By changing these parameters, 50 models were created. All models were loaded with the same point load and also  $0.6 \text{ kN/m}^2$  snow load that is used for comparison.

In the first part of the research, the general layout of the membrane forces under point load is analyzed. It was concluded that maximal membrane forces occur at the position of point load action, except in some cases in weft direction among models with diagonal patterning. Models with parallel material orientation have mirrored layouts of warp and weft membrane forces. Yarns that

Modeli s paralelnom orijentacijom materijala imaju ogledalski preslikan raspored sila zatezanja u glavnom i pomoćnom pravcu. Vlakna direktno opterećena koncentrisanom silom imaju povećane intenzitete sila zatezanja, od pozicija dejstva sile ka osloncima. Veliki deo membrane trpi samo male promene intenziteta sila zatezanja. Modeli s dijagonalnom orijentacijom imaju različite rasporede sila zatezanja u glavnom i pomoćnom pravcu zbog suprotne zakrivljenosti vlakana glavnog i pomoćnog pravca membrane.

Drugi deo istraživanja posvećen je istraživanju uticaja variranih parametara na maksimalne sile zatezanja u membrani. Rezultati su pokazali da promena visine modela ne utiče na maksimalne sile zatezanja ukoliko je orijentacija materijala paralelna. Povećanje intenziteta prednapreznja izaziva povećanje maksimalnih sila zatezanja kod modela s paralelnom orijentacijom. Modeli s dijagonalnom orijentacijom imaju relativno male promene maksimalnih sila zatezanja u glavnom pravcu, kada se menjaju visina modela i intenzitet prednapreznja. Povećanje visine modela dovodi do povećanja maksimalne sile zatezanja u glavnom pravcu. U pomoćnom pravcu, povećanje intenziteta prednapreznja rezultovaće znatnim povećanjem maksimalnih sila zatezanja. Visina modela ima značajniji uticaj na maksimalne sile zatezanja pri nižim vrednostima intenziteta prednapreznja.

U poslednjem delu istraživanja, maksimalne sile zatezanja pod dejstvom koncentrisane sile upoređene su s maksimalnim silama zatezanja pod dejstvom opterećenja od snega. Ovo je sprovedeno kako bi se ocenio značaj promena maksimalnih sila zatezanja pri dejstvu koncentrisane sile. Modeli istih karakteristika, izuzev orijentacije materijala, imaće veće maksimalne sile zatezanja u glavnom i manje u pomoćnom pravcu kod dijagonalne orijentacije materijala pri dejstvu koncentrisane sile. Međutim, kada se uporede sa silama zatezanja izazvanim dejstvom opterećenja od snega, svi modeli s paralelnom orijentacijom materijala imaju manje maksimalne sile zatezanja pri dejstvu koncentrisane sile. Među modelima s dijagonalnom orijentacijom materijala, devet modela ima veće sile zatezanja i u glavnom i u pomoćnom pravcu, u poređenju s dejstvom opterećenja od snega. To pokazuje da – pod određenim vrednostima parametara – koncentrisana sila može da izaziva značajnije promene nego dejstvo snega.

Istraživanje prikazano u ovom radu bavi se temom koja do sada nije bila detaljno razmatrana. Zbog toga, izloženi zaključci trebalo bi da posluže da se dalje istraži ponašanje membranskih konstrukcija pri dejstvu koncentrisane sile. Nalaze ovog istraživanja trebalo bi potvrditi eksperimentalnim testiranjima na realnim membranskim konstrukcijama. Dalja istraživanja biće usmerena ka ispitivanju membranskih konstrukcija s fleksibilnim ivicama. U sledećoj fazi istraživanja efekata dejstva koncentrisanih sila na membranske konstrukcije biće istraživane minimalne sile zatezanja i potencijalni nestanak zatezanja u membrani.

are directly affected by point load have increased force intensities starting from the point load position towards the supports. A large part of the membrane will suffer small changes of membrane forces. Models with diagonal patterning have different layout of forces in warp and weft due to opposite curvature of warp and weft yarns.

The second part of the presented research aimed at investigating the influence of varied parameters on maximal membrane forces. The results showed that the change of model height does not affect maximal membrane forces if the orientation of material is parallel. The increase of prestressing intensity causes the increase of maximal membrane forces at models with parallel patterning. Models with diagonal patterning in warp direction have relatively small changes of maximal membrane forces when the height of the model and prestress intensity are varied. The increase of model height leads to an increase of maximal membrane forces in the warp. In weft direction increase of prestressing intensity will result in a significant increase of maximal membrane forces. The height of the model has a larger influence at lower prestress intensities.

In the last part of the research, maximal membrane forces under point load are compared to maximal membrane forces under typical snow load. This was motivated by the need to evaluate the significance of changes in maximal membrane forces under point load. Models with the same properties, except the orientation of the material, will have larger maximal forces in the warp and lower maximal forces in weft in case of diagonal patterning under point load. However, when compared to membrane forces under snow load, all models with parallel patterning have lower membrane forces caused by point load. Among models with diagonal patterning, nine models have larger membrane forces in both warp and weft compared to snow load. This shows that under certain sets of parameters, point loads can have a more significant impact on membrane forces than snow load.

The research presented in this paper deals with the topic that was not previously investigated in detail. Therefore, the presented findings should be used to further analyze the behaviour of tensile membrane structures under point load actions. Conclusions obtained during this research should be verified by experimental testing on real tensile membrane structures. Further research will be directed towards the tensile membrane structures with flexible edges. The next phases of the research regarding the effects of point loads on tensile membrane structures will investigate minimal membrane forces and the possible loss of tension in the membrane.



## 5 LITERATURA REFERENCES

- [1] Bridgens, B., Birchall, M.: Form and Function: The Significance of Material Properties in the Design of Tensile Fabric Structures. *Engineering Structures* 44, 1-12 (2012)
- [2] Bridgens, B., Gosling, P., Birchall, M. J.: Membrane Material Behaviour: Concepts, Practice & Developments. *The Structural Engineer* 82, 28-33 (2004)
- [3] Bridgens, B., Gosling, P., Birchall, M. J.: Tensile Fabric Structures: Concepts, Practice & Developments. *The Structural Engineer* 82, 21-27 (2004)
- [4] Devulder, T.: The Thermal Response of Textile Membrane Constructions. PhD thesis, University of Nottingham (2004)
- [5] Forster, B., Mollaert, M.: European Design Guide for Tensile Surface Structures. *TensiNet* (2004)
- [6] Gosling, P. D., Bridgens, B. N.: Material Testing and Computational Mechanics – A New Philosophy for Architectural fabrics. *International Journal of Space Structures* 23, 214-232 (2008)
- [7] 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.: Analysis and Design of Membrane Structures: Results of a Round Robin Exercise. *Engineering Structures* 48, 313-328 (2013)
- [8] Harvie, G.: An Investigation into the Thermal Behaviour of Spaces Enclosed by Fabric Membranes. PhD Thesis, University of Wales College of Cardiff (1996)
- [9] Huntington, C.G.: Tensile Fabric Structures: Design, Analysis and Construction. ASCE, Reston (2013)
- [10] Kostic, D., Milosevic, V., Bogdanovic, V., Vasov, M., Vucur, A.: Influence of Single and Double Membrane Roofs on Thermal Behaviour of Enclosed Space. *Tehnički vjesnik* 25, Supplement 1, 188-196(2018)
- [11] Milošević, V., Kostić, D., Milošević, J.: Membrane forces of typical tensile membrane structures under point load action. V International Symposium for Students of Doctoral Studies in the Fields of Civil Engineering, Architecture and Environmental Protection, Niš, 319-326 (2019)
- [12] Milošević, V., Marković, B., Stojić, D.: Effects of Point Loads on Membrane Structures. *Građevinar* 70, No. 12, 1033-1041 (2018)
- [13] Milošević, V.: Aspekt promene geometrije pri dejstvu koncentrisane sile u projektovanju montažnih membranskih konstrukcija, PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering and Architecture University of Nis, 2018, pp. 248.
- [14] Milošević, V.: Dependence of Membrane Deflection on the Position and Intensity of Point Loads. *Structural Engineering International* 25, No. 1, 20-25 (2015)
- [15] Selvadurai, A. P.: Deflections of a Rubber Membrane. *Journal of Mechanics and Physics of Solids* 54, 1093-1119 (2006)
- [16] SOFiSTiK. SOFiSTiK AG, Oberschleissheim (2015)
- [17] Stranghoner, N., Uhlemann, J., Bilginoglu, F., Bletzinger, K.U., Bogner-Balz, H., Corne, E., Gibson, N., Gosling, P., Houtman, R., Llorens, J., Malinowsky, M., Marion, J.M., Mollaert, M., Nieger, M., Novati, G., Sahnoune, F., Siemens, P., Stimpfle, B., Tanev, V., Thomas, J.C.: Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures. European Commission, Joint Research Centre, Luxembourg (2016)
- [18] Tanev, V.: Текстилни мембранни конструкции со стоманен опорен контур. PhD Thesis, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Sofia (2005)
- [19] Uhlemann, J.: Elastic Constants of Architectural Fabrics for Design Purposes. PhD Thesis, Universität Duisburg-Essen (2016)
- [20] Valdes, J., Miguel, J., Onate, E.: Nonlinear Finite Elements Analysis of Orthotropic and Prestressed Membrane Structures. *Finite Elements in Analysis and Design* 45, 395-405 (2009)
- [21] Ćosić, M., Folić, R., Brčić, S.: Pregled savremenih seizmičkih analiza i načina uvođenja prigušenja u njima. *Građevinski materijali i konstrukcije* 60, No. 1, 3-30 (2017)

## REZIME

### ZAVISNOST SILA ZATEZANJA MEMBRANSKIH KONSTRUKCIJA OD RAZLIČITIH PARAMETARA POD DEJSTVOM KONCENTRISANE SILE

Vuk MILOŠEVIĆ  
Dragan KOSTIĆ  
Jelena MILOŠEVIĆ

Koncentrisane sile mogu da izazivaju znatne ugibe zategnutih membranskih konstrukcija. Istraživanje predstavljeno u ovom radu bavi se efektima dejstva koncentrisane sile na sile zatezanja membranskih konstrukcija. Kako bi se ovi efekti ispitali, varirana su tri parametra konstrukcije, a praćene su sile zatezanja izazvane dejstvom koncentrisane sile. Varirani parametri jesu visina modela, intenzitet sile prednaprezanja i orijentacija membranskog materijala. Istraživanje je sprovedeno na modelima formiranim u specijalizovanom softveru. Kako bi se ocenio značaj efekata dejstva koncentrisane sile, rezultujuće sile zatezanja upoređene su sa silama zatezanja pod dejstvom opterećenja od snega. Rezultati istraživanja pokazuju raspored intenziteta sile zatezanja u membrani pod dejstvom koncentrisane sile i zavisnost maksimalnih sila zatezanja od ispitivanih parametara. Pri određenim kombinacijama ispitivanih parametara, koncentrisana sila izaziva vrlo značajne sile zatezanja.

**Ključne reči:** zategnute membranske konstrukcije, sile zatezanja, dejstvo koncentrisanih sila, opterećenje od snega, orijentacija materijala, intenzitet sile prednaprezanja, visina modela

## ABSTRACT

### TENSILE MEMBRANE STRUCTURE FORCES DEPENDENCE ON DIFFERENT PARAMETERS UNDER POINT LOAD ACTION

Vuk MILOSEVIC  
Dragan KOSTIC  
Jelena MILOSEVIC

Point load actions may have a significant impact on deflections of tensile membrane structures. Research presented in this paper is aimed at exploring the effects of point load actions on membrane forces of tensile membrane structures. Therefore, three different parameters of the structure were varied, and the membrane forces resulting from point loads were monitored. Variable parameters are the height of the model, the intensity of prestressing forces, and the orientation of the membrane material. The research was done on models in specialized software. In order to evaluate the significance of point load effects, membrane forces were compared to those under snow load. The results of the research show the layout of membrane forces under point load and dependence of maximal membrane forces on the varied parameters. Specific sets of analyzed parameters lead to significant values of maximal membrane forces under point load action.

**Key words:** tensile membrane structures, membrane forces, point load actions, snow load, patterning direction, prestress intensity, model height