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
structure membranous materials, the tensile forces were defined as the primary and secondary parameters, and so the tensile forces were 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 tensile 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 can 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 actions depend on several parameters are also investigated [13,14]. Bridgens, Gosling 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 membrane, 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 load 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...
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 odlaganju spoljašnjem opterećenju. Ono se definise vrednošću intenziteta u glavnom i pomoćnom pravcu, ali su u ovom istraživanju oni uzimani kao jednak. 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 vidljive 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 modificovanu 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 dio 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 rezultatne 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. Ovo se događa u ovom istraživanju. Kao što je i bilo očekivano, maksimalna sile zatezanja, u glavnom i pomoćnom pravcu, su ovisne o visini modela i različitim intenzitetima sila zatezanja. U pet visina modela iste osnove utiče na promene intenziteta sila zatezanja. Rezultati maksimalnih sila zatezanja pod dejstvom koncentrisane sile u ovom istraživanju su 1, 2, 3, 4 i 5 kN/m. Slike 1 i 3 prikazuju promene orijentacije membrane i visine ispitivanih modela. Promene intenziteta prednaprezanja nisu vidljive, 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 modificovanu metodu gustine sile za proračun membranskih konstrukcija.

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 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. Nainje sile zatezanja zabeležene su u nižim osloncima. Rasporedi intenziteta sila pod dejstvom snega u glavnom i pomoćnom pravcu takođe su simetrični po dijagonala.

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.

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

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

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 primene 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 sile zatezanja nalaze se blizu nižih oslonaca, a u nekim slučajevima u centru membrane. Raspora 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. Raspora intenziteta sile 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 sile zatezanja raspoređeni duž vlakana pravca koji se razmatra. Najniže sile zatezanja postoje kod nižih oslonaca. Raspora intenziteta je u pomoćnom pravcu obrnut. Oblast s nižim intenzitetom sile zatezanja proteže se od centralnog dela membrane k nižim osloncima. Maksimalne sile zatezanja nalaze se blizu viših oslonaca.

3.2 Promena intenziteta sile 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. Grafički na slici prikazuju rezultate za glavni i weft pravac. U glavnom pravcu, raspora sile zatezanja podrobnije pruža se u centru membrane i ka višim osloncima. Međutim, u pomoćnom pravcu oni se sadržavaju u crnom delu, na slici 5. Prvi zaključak u vezi s rezultatima predstavljenim na slici 4 jesti 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. Sličnost zaključaka je da je uticaj dva analizirana parametra na sile zatezanja potpuno različit. Može se primetiti da visina modela praktično ne utiče na vrednost maksimalnih sile zatezanja. Ovo je veoma zanimljivo, jer se smatra da je povećanje visine modela, odnosno povećanje zakrivljenosti modela, način da se smanje negativni uticaji spoja opterećenja. Međutim, u slučaju paralelne orijentacije materijala, vlakna nisu zakrivljena iako je model zakrivljen, budući da se forma modela može generisati sa dva seta pravih linija. Stoga, povećanje visine modela ne utiče na

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.

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

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)

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
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)](image)

*Figure 5. Maximal membrane forces of models with diagonal patterning under different prestress intensity and model height, in warp (above) and weft (below)*
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. Ovo deo istraživanja posvećen je istraživanju značaja dejstava koncentrisanih sila na membranske konstrukcije. Kako bi se ovaj značaj ispitao, rezultati dejstva koncentrisane sile upoređeni su sa rezultatima dejstva opterećenja od snega. Intenzitet koncentrisane sile od 1 kN, koji predstavlja dejstvo jednog čoveka, te tipično opterećenje snegom od 0.6 kN/m², 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 materijala.

Maksimalne sila 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 najčešćem slučaju, 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 sile 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.
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)
4 ZAKLJUČAK

U ovom istraživanju, ispitivani su različiti modeli membrananskih 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 membrananskog 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 kN/m², radi poređenja.

U prvom delu istraživanja, analiziran je raspored intenziteta sile 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 membrananskog 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 kN/m² 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.
Modeli s paralelnom orijentacijom materijala imaju ogledalski preslikan raspored sila zatezanja u glavnom i pomoćnom pravcu. Vlakna direktno opterećena koncentrisanim silom imaju povećane intenziteti sila zatezanja, od pozicija dejstva sile ka osloncima. Veliki deo membrane trije samo male promene intenziteta sila zatezanja. Modeli s dijagonalnom orijentacijom imaju razičite 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 prednaprezanja izaziva povećanje maksimalnih sile zatezanja kod modela s paralelnom orijentacijom. Modeli s dijagonalnom orijentacijom imaju relativno male promene maksimalnih sile zatezanja u glavnom pravcu, kada se menjaju visina modela i intenzitet prednaprezanja. Povećanje visine modela dovodi do povećanja maksimalne sile zatezanja u glavnom pravcu. U pomoćnom pravcu, povećanje intenziteta prednaprezanja rezultira znatnim povećanjem maksimalnih sile zatezanja. Visina modela ima znacajniji uticaj na maksimalne sile zatezanja pri nižim vrednostima intenziteta prednaprezanja.

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 sile zatezanja pri dejstvu koncentrisane sile. Modeli istih karakteristika, izuzev orijentacije materijala, imaju veće maksimalne sile zatezanja u glavnom i manje u pomoćnom pravcu kod dijagonalne orijentacije materijala pri dejstvu koncentrisane sile. Međutim, kada se uporedi sa silama zatezanja izazivanih 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 znatnije promene nego dejstvo snega.

Istraživanje prikazano u ovom radu bavi se temom koja do sada nije bila detaljno razmatrana. Zbog toga, izloženi zaključci trebali 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., Angelieri, 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., Stimpfe, B., Sürre, 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] Milosevic, V., Kostic, D., Milosevic, 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] Milosevic, V., Markovic, B., Stojic, D.: Effects of Point Loads on Membrane Structures. Građevinar 70, No. 12, 1033-1041 (2018)

[13] Milosevic, 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] Milosevic, 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., Bilginoglú, 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., Sahnoone, F., Siemens, P., Stimpfe, 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 състоймечен 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 uvodenja prigušenja u njima. Građevinski materijali i konstrukcije 60, No. 1, 3-30 (2017)
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 pravčene su sile zatezanja izazvane dejstvom koncentrisane sile. Variirani parametri jesu visina modela, intenzitet sila 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 sila prednaprezanja, visina modela

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