

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2017.08>

Posebnosti projektiranja membranskih konstrukcija

Elizabeta Šamec, Maja Baniček

Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

kontakt: esamec@grad.hr

Sažetak

Ukratko su prikazane osnovne karakteristike membranskih konstrukcija te su opisani koraci u postupku projektiranja i izgradnje membranskih konstrukcija s njihovim specifičnostima. Posebna je pozornost posvećena postupku proračuna membranskih konstrukcija. Istaknuto je temeljno obilježje po kojem se te konstrukcije razlikuju od konvencionalnih tipova konstrukcija – nalaženje oblika, te su navedeni neki djelomice neriješeni problemi koji postoje u proračunu zbog nedostatka europskih norma za taj tip konstrukcija. Proveden je proračun membranske konstrukcije po uzoru na postojeću konstrukciju u sklopu zgrade zračne luke Zadar u kompjutorskom programu IxCube. Prikazani su pomaci membrane za djelovanje vjetra te je konstrukcija provjerena na gomilanje padalina.

Ključne riječi: membranska konstrukcija, proračun laganih konstrukcija, nalaženje oblika

Particularities in the structural design of membrane structures

Abstract

Main characteristics of membrane structures are briefly presented with overview of design and construction process particularities. Particular attention is given to the structural design of tensile membrane structures. Form-finding, i.e. the main aspect by which they differ from more conventional structural types, is emphasized and some partly unsolved problems in structural design due to lack of European standard are outlined. Design of membrane structure, inspired by existing structure within the Zadar airport, is conducted with computer software IxCube. Membrane displacements for wind load are presented and the structure is verified for rain and snow accumulation.

Keywords: membrane structures, structural design of lightweight structures, form finding

1 Uvod

Membranske konstrukcije, kako privremene, tako i trajne, prisutne su preko 50 godina, a primjenu nalaze od jednostavnih samostojećih tendi do kompleksnih krovnih konstrukcija. Danas se membranske konstrukcije najčešće upotrebljavaju kao krovni sustavi za natkrivanje stadiona, tržnica, zračnih luka, kolodvora, kao zaštita arheoloških nalazišta, oplata za izgradnju ljusaka ili u ulozi fasada za smanjenje zagrijavanja od sunca [1].

Zbog atraktivnoga arhitektonskog oblika membranske konstrukcije često postaju simbolom grada. No te konstrukcije nisu samo privlačne izgledom, već su i konstrukcijski zanimljive, a posjeduju i određene ekonomske i ekološke prednosti u odnosu na klasične konstrukcije. Razvoj membranskih i sličnih tipova konstrukcija potaknut je pojavom samooblikovanja prirodnih struktura (npr. paukova mreža), koje su visoko optimizirane po pitanju odnosa težine, površine i čvrstoće. Ako je konstrukcija napravljena od fleksibilnoga materijala (uže, platno), koji nije u mogućnosti prenijeti tlačnu silu i moment savijanja, konstrukcija će se "prilagoditi" pod opterećenjem i zauzeti ravnotežni oblik. Mijenjajući rubne uvjete može se indirektno utjecati na oblik membranske konstrukcije sve dok se ne postigne željena forma.

Za razliku od klasičnih konstrukcija kod kojih su stabilnost i prijenos sila omogućeni težinom i materijalnom krutošću, kod sustava ovisnih o obliku sam oblik definira način nošenja i suprotstavljanja utjecajima na konstrukciju [2]. Membranski i pneumatski sustavi te sustavi mreže kabela nosivi su sustavi koji prenose opterećenja vlačnim silama u elementima. Konstrukcija tako posjeduje samo uzdužnu vlačnu krutost, pa se nosivost i geometrijska krutost moraju postići povoljnim oblikovanjem i prednapinjanjem. Možemo stoga reći da se vlačne gipke konstrukcije ponašaju prema principu eng. *form follows force* [3]. Oblik konstrukcije nije odabran, već slijedi iz uvjeta ravnoteže, uvažavajući rubne uvjete i razdiobu prednaponskih sila, a u kabelskim sustavima i topologiju mreže elemenata, te često ne može biti opisan jednostavnim matematičkim funkcijama. Problem nalaženja oblika (eng. *form finding*) zapravo je potraga za stabilnom minimalnom plohom, problem kojim se matematičari bave već desetljećima.

Dok je čvrstoća tlačnih elemenata ograničena pojavom izvijanja, vlačni se elementi mogu opterećivati gotovo do granice tečenja materijala, čime su materijal i poprečni presjek u potpunosti iskorišteni. Posljedica je toga vrlo mala, pa čak i zanemariva vlastita težina, odnosno visok omjer nanesenoga opterećenja prema vlastitoj težini u usporedbi s klasičnim čeličnim ili betonskim konstrukcijskim sustavima. To ih čini superiornima prilikom odabira konstrukcija za svladavanje velikih raspona [2].

2 Postupak projektiranja i izgradnje membranskih konstrukcija

Iako se membranske konstrukcije doimaju jednostavnima i elegantnima, za njihovo je oblikovanje potrebno mnogo specifičnoga inženjerskog znanja i iskustva. Kompleksnost projektiranja proizlazi iz geometrijske nelinearnosti konstrukcije i promjene njezinoga oblika uzrokovane djelovanjima ili relaksacijom vlačnih elemenata. Početni oblik membranske konstrukcije ne ovisi isključivo o zamisli arhitekta, već je rezultat preliminarnoga statičkog proračuna koji nazivamo nalaženje oblika, a koji osigurava da je svaka točka konstrukcije u ravnotežnom stanju, što se postiže početnim prednapinjanjem vlačnih elemenata. Stoga je vrlo važno da u fazi projektiranja membranskih konstrukcija budu uključeni ne samo arhitekti i projektanti konstrukcije, već i izvođači pa čak i proizvođači materijala. Projektiranje membranskih konstrukcija tako postaje iteracijski proces prema arhitektonski zanimljivom, a statički učinkovitom obliku konstrukcije. Proces projektiranja sadrži 4 glavne faze: nalaženje oblika, proračun konstrukcije, krojenje i izradu radioničkih nacрта te izvedbu.

2.1 Nalaženje oblika

Prvi je korak pri projektiranju membranskih konstrukcija pronalaženje početnoga, ravnotežnog oblika. On se određuje pomoću specijaliziranih kompjutorskih programa, a ponekad još uvijek i pomoću fizičkih modela. Standardni građevinski kompjutorski programi nisu pogodni za nalaženje oblika, jer se koriste numeričkim postupcima koji su jako osjetljivi na odabir inicijalnoga oblika, te će konvergirati k rješenju samo ako je taj oblik dovoljno blizak konačnom. U ovom se koraku u obzir ne uzimaju vanjska djelovanja, ali se nanosi početno prednapinjanje kojim se kontrolira i po potrebi mijenja početni oblik te se osigurava da ne dolazi do gubitka vlačnih naprezanja odnosno nestabilnosti konstrukcije. Dobiveni oblik membrane s kojim se nastavlja proračun konstrukcije funkcija je omjera naprezanja u glavnim smjerovima platna (osnove i ispune) i rubnih uvjeta. Usporedba postojećih metoda za nalaženje oblika mreža kabela dana je u [3], a za membrane pregledni rad takvoga tipa još ne postoji.

2.2 Proračun konstrukcije

Sljedeći korak je proračun konstrukcije, u kojemu se u obzir uzimaju vanjska djelovanja koja se nanose na početni oblik dobiven u prvom koraku. Iako membranske konstrukcije postoje već pola stoljeća i postoji podosta znanja o njihovu projektiranju, njihov proračun nije popraćen europskom normom. Proračun krutoga dijela konstrukcije koji podupire vlačnu konstrukciju uobičajeno se provodi po pripadajućim normama Eurokod, ovisno o tome je li riječ o čeliku, drvu ili aluminiju. No, najzahtjevniji dio proračuna koji se odnosi na membranu zbog njezine fleksibilnosti i kompleksne prostorne zakrivljenosti najčešće nije pokriven europskom normom. Jedina europska

norma trenutno dostupna za membranske konstrukcije jest [4] no njezino je područje primjenjivosti ograničeno na privremene šatore tlocrtne ploštine veće od 50 m². Projektanti su tako primorani oslanjati se na smjernice dane u [5] i u nedavno objavljenom tehničkom izvješću radne skupine za membranske konstrukcije [1] unutar CEN/TC 250. Cilj je smjernica razviti jedinstven standardiziran pristup proračunu i izgradnji membranskih konstrukcija, kao i opsežnu europsku normu do 2024. godine.

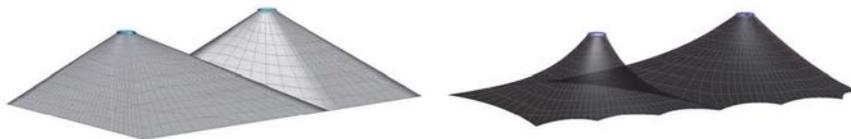
Osim prednapinjanja, djelovanja koja uzimamo u proračun odgovaraju djelovanjima na klasične konstrukcije. Ipak, membranske konstrukcije osjetljive su na nejednoliko raspodijeljeno opterećenje, a točno određivanje raspodjele opterećenja izuzetno je teško s obzirom na njihovu razvedenu površinu. Stoga vrijednosti iz [6] često ne odgovaraju stvarnim djelovanjima, a kako europska norma ne postoji, veliku ulogu igraju iskustvo i ispitivanja na fizičkim modelima. Dominanta su vanjska djelovanja opterećenje snijegom i opterećenja zbog djelovanja vjetra kao i opterećenje zbog održavanja. Opterećenja koja se mogu zanemariti vlastita su težina (0,7-2,0 kg/m² [4]) zbog minimalnoga utjecaja na ponašanje, temperaturna opterećenja koja uglavnom imaju puno manji utjecaj nego kod klasičnih krutih konstrukcija (osim za mreže kabela) te potresno opterećenje pošto membranske konstrukcije imaju vrlo malu specifičnu težinu. Konstrukcija bi također trebala biti projektirana tako da se kišnica prirodno odvodi, pa se opterećenje kišom u tom slučaju može zanemariti, ali se konstrukcija mora provjeriti na gomilanje padalina u obliku snijega i/ili leda. Moguća točkasta opterećenja (rasvjetna tijela ili sportska oprema) moraju se izbjegavati na membranskom dijelu konstrukcije te se postavljaju na potpurnu konstrukciju. Vjetar je zbog lakoće i velike površine membrane redovito kritično djelovanje, a treperenje se može spriječiti dovoljnom zakrivljenošću plohe i prednapinjanjem. Kod klasičnih se konstrukcija tlak vjetra definira dinamičkim tlakom pomnoženim koeficijentom tlaka (c_p), a njegova se promjena s obzirom na promjenu geometrije uzrokovanu vjetrom zanemaruje. No ta pretpostavka ne vrijedi za gipke konstrukcije, pa su u [5] dani koeficijenti tlaka za učestale oblike membranskih konstrukcija (pergola, jedro, itd.). Dodatno se na dinamičko djelovanje vjetra provjeravaju konstrukcije velikih raspona, kao i one sa slobodnim rubovima. Za konstrukcije kompliciranije geometrije treba provesti ispitivanje u vjerovnom tunelu. Projektiranje membranskih konstrukcija u velikoj mjeri ovisi o iskustvu i osobnoj procjeni inženjera, npr. treba li prednapinjanje uzeti kao opterećenje ili kao svojstvo krutosti pri provjeri graničnoga stanja nosivosti i uporabljivosti [1], što još uvijek nije definirano. Zbog velike geometrijske nelinearnosti i ovisnosti geometrije ne samo o vrijednosti, već i o raspodjeli opterećenja, trenutno se vode rasprave i o pravilnoj primjeni parcijalnih faktora te kombinacijama opterećenja, što se može se pronaći u [1, 5].

2.3 Krojenje, izrada radioničkih nacrti i izvedba konstrukcije

Radionički nacrti krojeva platna nacrti su kojima se trodimenzionalna površina platna pretvara u dvodimenzionalne površine (šablone) za izradu krojeva. Tako izrezani komadi platna kasnije se spajaju varenjem ili lijepljenjem kako bi se dobio trodimenzionalni oblik konstrukcije. Izvedba membranskih konstrukcija razlikuje se od standardne gradnje, a izvođač mora biti uključen u projekt od samoga početka. Njegova prisutnost potrebna je u fazi donošenja odluka o veličini i geometriji dijelova platna koji se ugrađuju kao i u odabiru smjera u kojem će se materijal polagati, što utječe na proračun konstrukcije, na krojenje i na način pakiranja platna. Radnje poput pripreme, polaganja, spajanja, podizanja, vješanja i prednapinjanja platna zahtijevaju posebno obučene radnike, a često i veliku ploštinu gradilišta te mnogo mehanizacije. Prednapinjanje membrane ključan je proces u izgradnji, koji ovisi o preciznoj razradi oblikovanja detalja spojeva membrane na konstrukciju kao i plana predapinjanja, jer se oprema za prednapinjanje (mehanička, hidraulička ili električna) zbog svoje težine može premještati isključivo dizalicom. Puno više o specifičnostima izvedbe membranskih konstrukcija i ekonomskim aspektima može se pronaći u [7, 8].

3 Primjer proračuna membranske konstrukcije

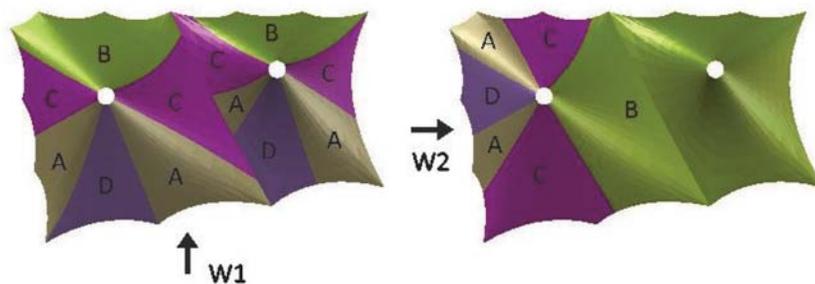
U nastavku je prikazan i ukratko opisan proračun membranske konstrukcije po primjeru već izvedene konstrukcije u sklopu zgrade zračne luke Zadar u Zadru. Spajanjem dvaju jedara s visokom točkom dobiven je šatorasti oblik membrane. Tlocrtni su gabariti konstrukcije dimenzija 22 x 13 m, a visina je visokih točaka 8 m. Odabrana je membrana tipa II napravljena od platna s PVC premazima, a kabeli su spiralni, poprečnoga presjeka 1 x 37 i 1 x 61 od čelika galvanizirani galfanom. Vanjski kabeli su promjera 12 mm, dok je unutarnji kabel, koji spaja dva jedra, promjera 20 mm.



Slika 1. Inicijalni oblik membrane (lijevo) i početni oblik dobiven pomoću metode gustoća sila (desno)

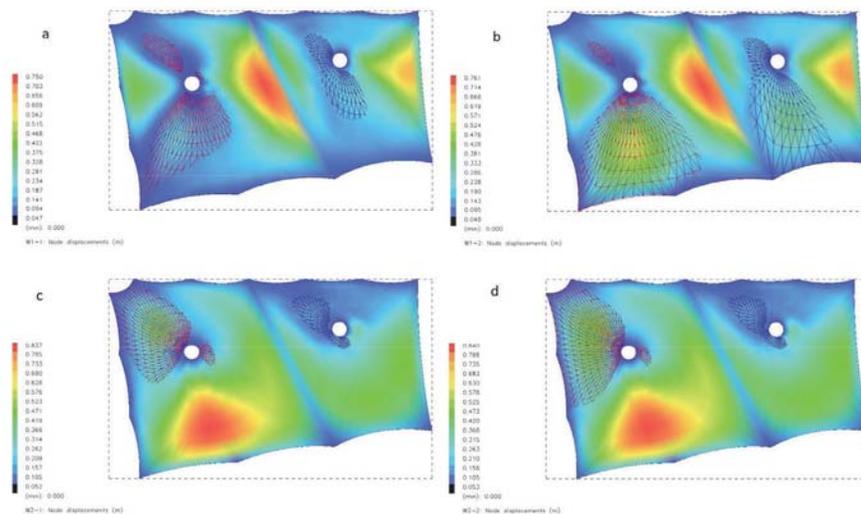
Kako bi se spriječilo gomilanje snijega u središnjem dijelu membrane te njezino trepenje zbog dinamičkoga djelovanja vjetra, potrebna je napetost membrane, što je postignuto prednapinjanjem inicijalnoga oblika u prvom koraku postupka. Minimalni, a ujedno i početni oblik membrane pronađen je pomoću metode gustoća sila (eng. *Force Density Method*) u računalnom programu IxCube [9], a prikazan je na slici 1. Sljede-

ći je korak nanošenje opterećenja na dobiveni početni oblik membrane. Opterećenje snijegom i iznosi opterećenja od djelovanja vjetra dobiveni su uz pomoć smjernica [5] i nacionalnih dodataka [6], a proračun konstrukcije s opterećenjima od djelovanja vlastite težine, snijega i vjetra proveden je iteracijskim postupkom, teorijom II. reda.



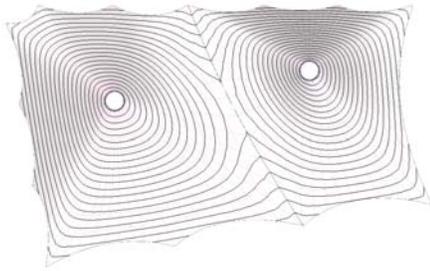
Slika 2. Scheme opterećenja zbog djelovanja vjetra prema smjercima [4]

Sheme djelovanja vjetra prikazane su na slici 2., a pripadajući pomaci u odnosu na početni oblik membrane (vidljiv u obliku mreže) prikazani su na dijagramima na slici 3.



Slika 3. Dijagrami pomaka za opterećenje vjetrom: a) smjer vjetra W1 oddole, b) W1 pritiskujuće, c) smjer vjetra W2 oddole, d) W2 pritiskujuće

Za membranu je provedena i provjera na moguće gomilanje padalina pomoću prikaza izolinija za oblik membrane pod opterećenjem snijegom. Na membrani neće doći do gomilanja padalina, jer, kako je vidljivo iz slike 4., izolinije niti na jednom mjestu ne zatvaraju poligon.



Slika 4. Prikaz izolinija s visinskim razlikama od 20 cm

4 Zaključak

Cilj je ovoga rada upozoriti na nedostatak europske norme, što otežava i onako specifičan postupak projektiranja membranskih konstrukcija. Aktualnost ovoga problema očituje se u činjenici da se u okviru CEN-a radi na normi koja će, nadamo se, odgovoriti na dvojbe istaknute u članku. Svakako, iskustvo i specifično znanje projektanata ostat će neizbježna potreba, ali uređena europska norma značajno će olakšati projektiranje i zasigurno pridonijeti popularizaciji ovoga tipa konstrukcija.

Zahvala

Rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom IP-2014-09-2899.

Literatura

- [1] Stranghöner, N., Uhlemann, J., Bilginoglu, F., Bletzinger, K.U., Bögner-Balz, H., Corne, E., Gibson, N., Gosling, P., Houtman, R., Llorens, J. i drugi: Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures, 2016.
- [2] Šamec, E., Fresl, K.: Ocjena primjenjivosti bezmrežnih postupaka u oblikovanju prednapetih gipkih konstrukcija, 1. Simpozij doktorskog studija građevinarstva, Lakušić, Stjepan (ur.), Zagreb, Građevinski fakultet u Zagrebu, pp. 159-166, 2015.
- [3] Veenendaal, D., Block, P.: An overview and comparison of structural form finding methods for general networks, International Journal of Solids and Structures, 49 (2012) 26, pp. 3741–3753

- [4] HRN EN 13782:2015 – Privremene konstrukcije – Šatori – Sigurnost
- [5] Forster, B., Mollaert, M.: European design guide for tensile surface structures, TensiNet, 2004.
- [6] HRN EN 1991 – Eurokod 1 – Djelovanja na konstrukcije – Svi dijelovi i nacionalni dodaci
- [7] Seidel, M.: Tensile Surface Structures: A Practical Guide to Cable and Membrane Construction, 2009.
- [8] Šamec, E.: Economic aspects and particularities in building of lightweight tensile structures, Proceedings of the 12th International Conference: OTMC, Cerić A., Kotarytarova J., Radujković M., Vukomanović M., Završki I. (ur.), Primošten, Hrvatska Udruga za organizaciju građenja i Sveučilište u Zagrebu, 122–135, 2015.
- [9] ixCube (v. 2.35), ixRay l.t.d., 2016, <http://www.ixcube.com>, studentska verzija