

**PRIMENA MEMBRANSKIH KONSTRUKCIJA U REKONSTRUKCIJI FASADE
FAKULTETA TEHNIČKIH NAUKA
APPLICATION OF MEMBRANE STRUCTURES IN THE FACADE RECONSTRUCTION
OF THE FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES**

Sandra Todorović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ARHITEKTURA

Kratak sadržaj – Projekat istražuje integraciju ETFE membranske konstrukcije na fasadi univerzitetske zgrade radi kontrole osvetljenja i zaštite od sunca, poboljšavajući radne uslove uz očuvanje vizuelne povezanosti sa eksterijerom.

Ključne reči: Membranske konstrukcije, ETFE materijal

Abstract – The project explores the integration of an ETFE membrane structure on a university building façade to control lighting and provide sun protection, enhancing work conditions while preserving visual connectivity with the exterior.

Keywords: Membrane structures, ETFE material

1. UVOD

Zategnute konstrukcije predstavljaju inovativan arhitektonski pristup koji uspešno kombinuje funkcionalnost i estetiku. Dizajnirane da rade pod dejstvom sila zatezanja, ove strukture su idealno rešenje za stvaranje lakih i elegantnih oblika. Savremene arhitekta i inženjeri sve više ih koriste kao odgovor na zahteve za kontrolu prirodnog osvetljenja i termalnu izolaciju.

Ključna prednost zategnutih konstrukcija leži u njihovoj sposobnosti da obezbede visoku strukturalnu stabilnost uz minimalnu upotrebu materijala. Ovo značajno smanjuje ukupnu težinu objekta i omogućava projektovanje velikih, otvorenih prostora bez potrebe za masivnim stubovima ili zidovima, čime postaju idealno rešenje za raznovrsne tipove zgrada — od stadiona i sportskih arena do paviljona, aerodroma i javnih prostora. Pored svoje funkcionalnosti, zategnute strukture privlače pažnju i svojim elegantnim i organskim formama, koje se često harmonično uklapaju u prirodno okruženje.

Savremeni razvoj novih materijala kao što su PVC premazani poliesteri, PTFE premazana staklena vlakna i ETFE, proširio je mogućnosti primene ovih konstrukcija. Ovi materijali su ne samo lagani i izdržljivi, već i otporni na vremenske uslove, lako se održavaju i omogućavaju visoku transparentnost, što je od ključnog značaja za kontrolu svetlosti u velikim prostorima. Pored toga, napredni digitalni alati za projektovanje i simulaciju naprezanja omogućavaju istraživanje sve složenijih i kreativnijih formi.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Bojan Tepavčević, red. prof.

Savremena arhitektura se suočava sa izazovima kao što su prekomerna svetlost i pregrevanje unutrašnjih prostora, što negativno utiče na komfor i produktivnost korisnika. U tom kontekstu, adaptivni sistemi zasenčenja postaju ključni za kreiranje udobnih i funkcionalnih prostora. Ovaj projekat posvećen je integraciji membranske konstrukcije od ETFE-a na fasadi zgrade, sa ciljem rešavanja problema prekomerne svetlosti i pregrevanja, pružajući priyatnije uslove za rad i boravak.

2. ZATEGNUTE KONSTRUKCIJE

U većini struktura, bilo prirodnih ili veštačkih, sile pritiska su glavni faktori. Ove sile teže skraćivanju tela u jednom pravcu - odnosno kompresiji. Na primer, kameni zid može da izdrži težinu krova kroz unutrašnje sile pritiska, koje su svojstvene svakom materijalu. S druge strane, sile zatezanja teže produžavanju komponenti u pravcu primenjene sile. Čelik je dobar primer materijala sa odličnom čvrstoćom na zatezanje. Koristi se u armiranom betonu upravo u delovima gde su veće sile zatezanja. Zategnute strukture su jedinstvene kompleksne strukture. Njihovi noseći elementi mogu da podnesu samo sile zatezanja, dok pritisak i savijanje nisu dozvoljeni.

Zategnute konstrukcije se mogu podeliti na osnovu ravni u kojoj deluju sile zatezanja u strukturi, a prema tome postoje tri osnovna tipa:

1. Linijske zategnute konstrukcije - Ove strukture se sastoje od elemenata koji su podložni linearnim silama zatezanja, dok drugi elementi (obično stubovi) podnose sile pritiska. Primer ovakvih konstrukcija su viseći mostovi, gde kablovi nose glavno opterećenje, a stubovi prenose sile na zemlju.
2. Trodimenzionalne zategnute konstrukcije (tensegrity) - Ove strukture se sastoje od napetih i kompresovanih elemenata. Uglavnom se koriste kao krovovi za velike sportske arene. Sile zatezanja se prenose kroz mreže kablova, dok se sile pritiska prenose na centralne stubove.
3. Strukture sa površinskim naponom - U ovim strukturama, membrane služe za prenos sila zatezanja, a napetost se održava pomoću kablova ili krutih elemenata kao što su čelični okviri. One se obično sastoje od tekstilnih ili polimernih materijala koji su zategnuti u svim pravcima kako bi se obezbedila stabilnost.

Sve ove konstrukcije imaju zajedničku osobinu da su podložne silama zatezanja, ali se razlikuju po svojoj geometriji i funkciji u odnosu na opterećenje i stabilnost.

2.1. Materijali zategnutih konstrukcija

Materijale zategnutih konstrukcija možemo podeliti u tri grupe: tekstile, folije i materijale zatege.

Tekstil obuhvata sve materijale napravljene od vlakana ili niti koji se mogu obraditi u mekane materijale, uključujući tkanine, netkane materijale, filc i pletene proizvode. Mogu biti od prirodnih vlakana (pamuk, vuna, svila) ili sintetičkih (polieter, najlon).

Filcane tkanine pružaju efikasnu izolaciju, dok neki eksterijerni tekstili usmeravaju i reflektuju prirodnu svetlost, otvarajući mogućnosti za korišćenje solarne energije. Kombinovanjem metalnih tkanina, premazanih tekstila i netkanih tkanina moguće je sklopiti celu fasadu.

Strukturna tkanina se sastoji od osnovne tkanine od isprepletanijh niti, stabilizovanih i zaštićenih premazom s obe strane. Osnovna tkanina se sastoji od osnovne (dužine rolne) i potke (širine). Mrežasta tkanina ima razmak između svezaka niti, a neki tipovi su premazani pre pletenja.

Sve tkanine će se istegnute pod opterećenjem, ali strukturna tkanina ne „popušta“ kada dostigne potpuno prednaprezanje. Svaka rolna tkanina se testira na dvosmernom opterećenju, a rezultati se koriste za izračunavanje kompenzacija u softveru za modelovanje krojenja. Nadstrešnica se proizvodi sa manjim dimenzijama da bi se postiglo pravilno naprezanje.

Za spoljašnju upotrebu, glavni izbori su PVC (polivinil hlorid) premazani poliester i PTFE (politetrafluoroetilen) premazana staklena vlakna.

PVC premaz sadrži UV stabilizatore, usporivače gorenja, boje i antifungicidne aditive. Iako ima strukturni vek duži od 20 godina, vizuelni izgled često određuje njegov vek. Plastifikatori u PVC-u tokom vremena migriraju na površinu, što otežava čišćenje.

S druge strane, komponente PTFE/stakla su inertne, što ih čini boljim izborom za trajne strukture sa dizajnerskim vekom preko 15 godina. Kada je nov, PTFE je bež boje, ali pod jakim sunčevim svetlom brzo izbledi. Predviđeni vek membrane je 25-30 godina.

ETFE je plastični materijal koji se sve više koristi za krovove i fasade zbog svoje lakoće, otpornosti na koroziju, jednostavnog održavanja i sposobnosti reciklaže. Idealan je za velike projekte i ima odlična svojstva za kontrolu svetlosti i termalnu izolaciju.

Prvobitno razvijen kao premaz u vazduhoplovnoj industriji, poslednjih godina je stekao široku primenu u arhitekturi, posebno za krovne i fasadne strukture. Svoju prvu primenu imao je u poljoprivrednim objektima i staklenicima, a sada se koristi širom sveta.

ETFE može biti jednoslojan ili dvoslojan (u obliku pneumatskih jastučića), debljine 0,2 mm. Dostupan je u potpuno prozirnoj, mlečnoj ili tačkastoj varijanti, u zavisnosti od željenog stepena osvetljenja. Ovaj materijal je otporan na koroziju, ne zahteva mnogo održavanja, a mrlje se lako čiste kišom. Iako je podložan probijanju, oštećenja se lako popravljaju ETFE trakom. ETFE je veoma lagan, elastičan (može se proširiti do tri puta bez

gubitka svojstava), reciklira se i izuzetno je otporan na vatru. Jednoslojna membrana stvara suptilan, difuzan efekat svetlosti.

Primeri projekata izrađenih od ETFE membrane su Nacionalni stadion (Ptičje gnezdo) i Nacionalni plivački centar u Pekingu, izgrađeni za Olimpijske igre 2008. U plivačkom centru, naduvani jastuci pružaju dobru izolaciju i lep estetski efekat. Kontrolom zapremine naduvanog vazduha, transparentnost membrane se može promeniti, što omogućava efikasno korišćenje prirodne svetlosti, a takođe se može kontrolisati i odjek zvuka.

Volter Bird je osnovao kompaniju Birdair, koja je realizovala nekoliko velikih pneumatskih struktura. Ove konstrukcije, podržane niskim pritiskom vazduha, održavaju membranu tkanine u zategnutom stanju tako što je podržavaju u odnosu na niži spoljašnji pritisak. Razlika u pritisku u ovakvim strukturama može biti relativno mala, tako da ljudi unutar njih mogu bezbedno disati isti vazduh. Svaka pneumatska struktura ima prednost što je veoma sigurna, ekonomična i dugotrajna.

Tensegriti strukture oslanjaju se na posebne zatezne materijale koji obezbeđuju njihovu stabilnost. Najčešće se koriste čelični kablovi, koji su lagani, izdržljivi i otporni na velika zatezanja, što ih čini idealnim za prenos opterećenja. Pored njih, primenjuju se i sintetički materijali poput poliestera i tekstilnih vlakana, koji doprinose elastičnosti konstrukcije. Novi kompoziti koji kombinuju čvrstoću i malu težinu dodatno unapređuju performanse zateznih elemenata.

2.2. Konstruktivna logika membranskih konstrukcija

Arhitektonski tekstili i polimeri, kada se koriste za oblikovanje membrana, podležu zatezanju pre nego što delovanje bilo kakvih spoljašnjih opterećenja stupi na snagu; ovo stanje napetosti je poznato kao prednaprezanje. Ukupna čvrstoća membrane dodatno je uslovljena njenim stepenom zakrivljenosti u svakoj tački. Zakrivljenost i prethodno naprezanje su karakteristični za dizajn membrana, kao i to da kompresija nije poželjna, jer stvara nabore.

Prilikom projektovanja membranskih konstrukcija, potrebno je razumeti ponašanje kablova, koji prenose opterećenja isključivo putem zatezanja. Zatim, zakrivljenost membrane igra ključnu ulogu u njenoj krutosti i stabilnosti. Ona je definisana radijusom zakrivljenosti, a dvostruka zakrivljenost i prethodno naprezanje obezbeđuju stabilnost u membrani.

2.3. Tensegriti strukture

Tensegriti je relativno nov princip, star nešto više od 60 godina, koji omogućava stvaranje fantastičnih, ultralakih i adaptivnih struktura. Najveći uticaj na razvoj tensegrity struktura imalo je istraživanje i izumi Buckminster Fullera, koji je stvorio termin "tensegrity" da opiše "samonapružene strukture sastavljene od krutih elemenata i kablova, sa silama naprezanja i kontrakcije, koje zajedno čine integrisanu celinu."

Veze između krutih elemenata i kablova mogu se uporediti s vezama između kostiju i mišića; jedan element pruža krutost, dok drugi omogućava fleksibilnost, čime se stvara

stabilna celina. Georgija Viktor opisuje ove strukture kao "organizaciju elemenata koji čine živa bića prema karakteristikama njihove geometrije." Ova prostorna organizacija formira kontinuirano polje naprezanja i kontrakcije, u stalnoj ravnoteži s gravitacijom.

Fulera su fascinirale tensegriti strukture jer su mu omogućile da kombinuje suprotne sile i dobije sigurnu strukturu sa minimalnim brojem elemenata. Kenet Snelson, student umetnosti koji je pohađao predavanja Bukminster Fulera, bio je inspirisan da istražuje trodimenzionalne modele, praveći različite strukture. Rezultat je bio "Needle Tower," koji je doprineo daljem razvoju lakih struktura. Čvrste šipke su pod silom kontrakcije i postavljene su izolovano, tako da se ne dodiruju, čineći celinu s čeličnim kablovima koji primaju sile zatezanja.

2.4. Istorijski razvoj zategnutih konstrukcija

Prvi oblici zategnutih konstrukcija, poput šatora, datiraju još iz ledenog doba, dok su se jedra na brodovima koristila pre više od pet hiljada godina kao rane zategnute strukture. U Rimsko doba, sklopive nadstrešnice na stadionima i pozorištima su predstavljale rane primene u arhitekturi, ali tada nisu smatrane umetnošću.

U 19. veku, cirkuski šatori postaju prepoznatljiv primer zbog svoje mobilnosti, a ruski inženjer Vladimir Šuhov unapređuje zategnute konstrukcije uvođenjem čelika i tankih ljski. Nakon Drugog svetskog rata, Fraj Oto razvija membranske strukture kroz projekte poput paviljona u Montrealu 1967. i Minhenske olimpijske arene 1972, definisavši novu eru zategnutih struktura.

2.5. Tradicionalne metode dizajna

U 18. veku prirodnjaci su želeli da razumeju „univerzalne zakone forme” kako bi objasnili oblike živih organizama. Tokom 20. veka, prošireni su ovi koncepti, pa danas smatramo da zakoni matematike i fizike opisuju rast i formu bioloških sistema. D'Arsi Ventvort Tompson je povezivao prirodne oblike sa matematičkim modelima, ukazujući na sličnosti između, na primer, meduza i kapi tečnosti.

Razumevanje tih korelacija otvorilo je nova polja istraživanja. Proučavanje sapunica objasnilo je minimalne površi membrana, dok su pčelinja saća inspirisala lagane panele. Fraj Oto je izjavio: „Arhitekta više liči na babicu nego na stvarajućeg Boga” pri traženju formi za svoje strukture.

Oto je 1960-ih osnovao Institut za ultralake strukture u Štutgartu i proučavao sapunice, koje se prirodno šire između tačaka, formirajući najmanju površinu. Horst Berger je 1974. matematički opisao formiranje ovih oblika u strukturi zgrade.

Drugi metod su bili fizički modeli od likre, omogućavajući vizualizaciju i šabloniranje. Gaudi je koristio modele lanaca za Koloniju Guelj i Sagradu Familiju, dok je Fraj Oto primenio isti princip za dizajn Minhenskog stadiona 1972. godine.

2.6. Epoha digitalnog dizajna

Modeli za pronalaženje forme koje je koristio Fraj Oto poslužili su za dizajn, ali su bili ograničeni za analizu sila. Zato su Heinz Isler i Oto kreirali detaljne strukturalne makete u razmeri kako bi analizirali geometriju i merili sile. U slučaju paviljona u Montrealu, Jörg Schlaich je istakao potrebu za dodatnim računarskim metodama. Klaus Linkvitz se pridružio timu i, koristeći fotogrametriju, definisao šemu za složene strukture. Linkvitz je 1971. razvio Metodu gustine sile, što je omogućilo brži i precizniji proces dizajna.

Računarski alati su postali standard krajem 1980-ih sa dostupnošću jeftinih računara. Iako je CAD ubrzao planiranje, tek uvođenjem 3D modelovanja i digitalne fabrikacije početkom 1990-ih počinje stvarna revolucija.

Oko 21. veka, digitalna fabrikacija je našla primenu u dizajnu malih proizvoda, ali nije uspela u građevinskoj industriji. Neil Leach definiše „digitalnu tektoniku”: „Digitalne tehnologije su prodrle u svaki aspekt arhitektonske proizvodnje... sada omogućavaju da modelujemo materijalna svojstva sve sofisticiranije. Nova tektonika digitalnog – digitalna tektonika – počela je da se pojavljuje.”

Veliki napredak u oblasti računarskih nauka, je imao značajan uticaj na razvoj parametarskog dizajna. Postmodernizam i dekonstruktivizam su bili prelazni pokreti koji su uveli projektante u eru istraživanja i inovacija. William J. Mitchel sa svojim CAD softverom, John von Neuman sa teorijom čelijskih automata, George Stiny sa gramatikom oblika, kao i razvoj Bezijerovih krivih, samo su neki od doprinosa koji su postavili temelje onoga što danas nazivamo parametarskim dizajnom.

Parametrizam, kao stil dizajna koji je iznikao u digitalnoj eri, zasnovan je na ideji korišćenja parametara i algoritama za kreiranje varijabilnih i fleksibilnih geometrija, što omogućava arhitekti da brzo istražuje različite forme i prilagođava dizajn u skladu sa promenljivim uslovima.

3. IDEJNO REŠENJE

Projekat rekonstrukcije predlaže se za Fakultet tehničkih nauka, koji se nalazi unutar univerzitetskog grada u Novom Sadu. Zgrada fakulteta, smeštena na trgu i vidljiva sa svih strana, izgrađena je 1968. godine, dok je četvrti sprat, na kome je prisutan najveći problem sa svetlošću, dograđen 1998. godine.

U ovom arhitektonskom projektu, membranska konstrukcija je dodata na fasadu da reši problem prekomerne svetlosti u unutrašnjosti zgrade, gde većina korisnika radi na računarima. Prevelika količina svetlosti stvara odsjaj na ekranima i dovodi do pregrevanja prostora, što narušava radne uslove. Sistem zasenčenja pruža zaštitu od direktnog sunčevog zračenja i može se prilagoditi prema potrebama korisnika.

Materijal odabran za ovu konstrukciju je ETFE, koji se odlikuje visokom transparentnošću, lakoćom i otpornošću na vremenske uticaje. Ovaj materijal omogućava prolaz difuzne svetlosti, smanjujući toplotno opterećenje unutrašnjih prostora, dok zadržava vizuelnu povezanost sa eksterijerom.



Slika 1. Izgled modula na fasadi fakulteta tehničkih nauka

Membranska konstrukcija doprinosi estetskom izrazu zgrade i uklapa se sa razigranim dizajnom prozora. Istražena su rešenja u 3D, a kroz iteracije su se razvili centralni trouglovi, formirajući veće oblike i smanjujući broj potrebnih veza.

Na kraju, dizajn je finalizovan kao kompozicija dva različita elementa - većeg i manjeg - koji se ritmično ponavljaju duž fasade, stvarajući dinamičnu i elegantnu strukturu. Manji element predstavlja dvostruko zakrivljenu membranu, dok se veći sastoji od dve simetrične membrane, što stvara složeniji oblik. Sistem sa kablovima stabilizuje strukturu i omogućava različita rastezanja. Membrana je fleksibilna i može se prilagoditi vremenskim uslovima, što omogućava kontrolu svetlosti prema potrebama.

4. ZAKLJUČAK

Projekat dodavanja membranske strukture na fasadu univerzitetske zgrade na trgu predstavlja simbiozu funkcionalnih i estetskih rešenja, koja su rezultat detaljnog proučavanja zategnutih konstrukcija, njihovog istorijskog razvoja i savremenih tehnoloških inovacija. Dok većina tradicionalnih građevina počiva na silama kompresije, ovaj projekat koristi zategnute sisteme koji omogućavaju stvaranje laganih i dinamičnih oblika, pogodnih za kontrolu svetlosti i termalnu izolaciju.

Konkretno, korišćenje ETFE membrane kao glavnog materijala odražava novu eru u arhitekturi, gde plastični materijali sa visokom otpornošću doprinose energetskej efikasnosti zgrade. Zahvaljujući svojoj laganosti i fleksibilnosti, ova membrana omogućava stvaranje dvostruko zakrivljenih oblika koji se protežu duž fasade i dodaju dinamičnost prostoru.

Kroz ovaj projekat istraživane su različite zategnute konstrukcije, poput membranskih sistema i tensegriti struktura, koje koriste sile zatezanja za održavanje stabilnosti. Sistem nosača i kablova, inspirisan "flying

mast" vezama, omogućava da se konstrukcija prilagodi različitim dimenzijama prozora, a istovremeno osigurava čvrstinu i stabilnost.

Dodatno, adaptivnost sistema je jedan od najznačajnijih elemenata ovog projekta. Zahvaljujući sistemu sajli, membrana se može zatezati ili skupljati u zavisnosti od vremenskih uslova ili potreba korisnika. Ovo omogućava fleksibilnu kontrolu svetlosti, naročito u slučajevima kada je neophodno propustiti više prirodne svetlosti.

Projekat membranske strukture na fasadi ne samo da rešava probleme pregrevanja i prekomerne svetlosti u prostorijama, već i stvara novi vizuelni identitet zgrade. Ovaj projekat predstavlja primer kako savremene zategnute konstrukcije mogu da odgovore na funkcionalne potrebe, istovremeno doprinoseći estetskoj inovaciji i poštovanju konteksta arhitekture.

4. LITERATURA

- [1] Shreya Sen, "Soap Film Modelling: A form finding experiment", 2014.
- [2] Christodoulou Marilena, "The History of Parametric Design and Its Applications in Footwear Design", 2020.
- [3] Bradley Quinn, "Textiles in architecture", 2006.

Kratka biografija:



Sandra Todorović rođena je u Novom Sadu 2000. god. Završila je osnovne akademske studije na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Arhitekture 2023. godine.
kontakt:
sandratoro.arh@gmail.com