

Viseće konstrukcije-materijali, elementi, načini izvedbe

Jurić, Marina

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:750311>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB

ZAVRŠNI RAD

VIŠEĆE KONSTRUKCIJE
- MATERIJALI, ELEMENTI, NAČINI IZVEDBE

Marina Jurić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET ZAGREB

ZAVRŠNI RAD

VIŠEĆE KONSTRUKCIJE
- MATERIJALI, ELEMENTI, NAČINI IZVEDBE

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Nikolina Vezilić Strmo

Student:

Marina Jurić

Zagreb, 2023.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

OBRAZAC 2

TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: **Marina Jurić**

JMBAG: **0082066068**

Završni ispit iz predmeta: **Visokogradnje**

Naslov teme
završnog ispita:

HR

**Viseće konstrukcije - materijali,
elementi, načini izvedbe**

ENG

**Suspended constructions - materials,
elements, construction methods**

Opis teme završnog ispita:

Rad se bavi istraživanjem primjene visećih konstrukcija u visokogradnji. Istražuje se povijest primjene, njihove tipološke karakteristike, materijali, načini te uvjeti njihove ugradnje i izvedbe. Teoretske postavke istraživanja dodatno se prezentiraju kroz analizu nekoliko izvedenih primjera visećih konstrukcija.

Datum: **17.04.2023.**

Komentor:

(Ime i prezime komentora)

Mentor:

doc.dr.sc.Nikolina Vezilić Strmo

(Ime i prezime mentora)

N. Vezilić Strmo

(Potpis mentora)

SAŽETAK

Cilj ovog rada jest pobliže objasniti viseće konstrukcije, njihovu podjelu, oblike, konstrukcijska svojstva, materijale od kojih se izvode, način na koji se izvode te njihove prednosti. Također, razmotrit će se nekoliko izvedenih primjera visećih konstrukcija kako bi se što bolje prikazala njihova primjena. Prve viseće konstrukcije pojavile su se još prije više od 40 000 godina u obliku šatora, a danas predstavljaju strukture kojima se dosežu svjetski rekordi. Veliki doprinos njihovu razvoju dali su Frei Otto i Jörg Schlaich te ih danas ponajviše susrećemo u obliku visećih krovova ili visećih mostova. Viseće krovove možemo vidjeti u različitim geometrijskim oblicima, što im omogućuje i široko područje primjene od stadiona, zračnih luka, kazališta, amfiteatara, izložbenih prostora i dr. Također, ove konstrukcije postaju vizualno i konstrukcijski sve zanimljivije zbog izvođenja različitim materijalima koji se neprestano poboljšavaju. Viseće se konstrukcije izvode montažno zbog bržeg, točnijeg, preciznijeg i neovisnog načina izvođenja u odnosu na tradicionalni način gradnje. Zbog mnogih svojih prednosti danas postaju strukture koje se odabiru pri planiranju modernih i urbaniziranih središta, a njihov vrhunac tek slijedi u budućnosti.

Ključne riječi: viseće konstrukcije, šator, Frei Otto, viseći krovovi, viseći mostovi, suvremeni materijali, montažna gradnja

ABSTRACT

The aim of this paper is to provide a closer explanation of suspended structures, their classification, forms, structural properties, materials used in their construction, the methods of execution, and their advantages. Additionally, several examples of suspended structures will be discussed to better illustrate their applications. The first suspended structures appeared over 40,000 years ago in the form of tents, and today they represent structures that achieve world records. Frei Otto and Jörg Schlaich made significant contributions to their development, and nowadays, we encounter them primarily in the form of suspended roofs or bridges.

Suspended roofs can be seen in various geometric shapes, which allows for a wide range of applications, including stadiums, airports, theaters, amphitheaters, exhibition spaces, and more. Furthermore, these structures are becoming increasingly fascinating both visually and structurally due to the use of continuously improving materials. Suspended structures are assembled using prefabricated elements, which ensures a faster, more accurate, precise, and independent construction process compared to traditional building methods.

Due to their numerous advantages, suspended structures are now favored when planning modern and urban centers, and their peak is yet to come in the future.

Keywords: suspended structures, tent, Frei Otto, suspended roofs, suspended bridges, modern materials, prefabricated construction

Sadržaj

1. UVOD.....	1
1.1. Općenito	1
1.2. Povijesni pregled.....	2
2. PODJELA.....	4
2.1. Viseći krovovi	4
2.1.1. Krovovi od napete tkanine.....	4
2.1.2. Krovovi poduprti zrakom	5
2.2. Viseći mostovi.....	5
3. OBLICI.....	8
4. KONSTRUKCIJSKO OBLIKOVANJE	12
4.1. Nalaženje oblika viseće konstrukcije	12
4.2. Proračun konstrukcije.....	13
4.3. Konstrukcijski elementi i spojevi.....	13
5. MATERIJALI.....	18
5.1. Čelik	18
5.2. Tkanine.....	20
6. NAČIN IZVEDBE	22
7. PREDNOSTI VISEĆIH KONSTRUKCIJA	23
8. PRIMJERI	24
8.1. 1915 Çanakkale most	24
8.2. Khan Shatyr.....	27
8.3. Denver Union Station.....	30
9. ZAKLJUČAK.....	32

1. UVOD

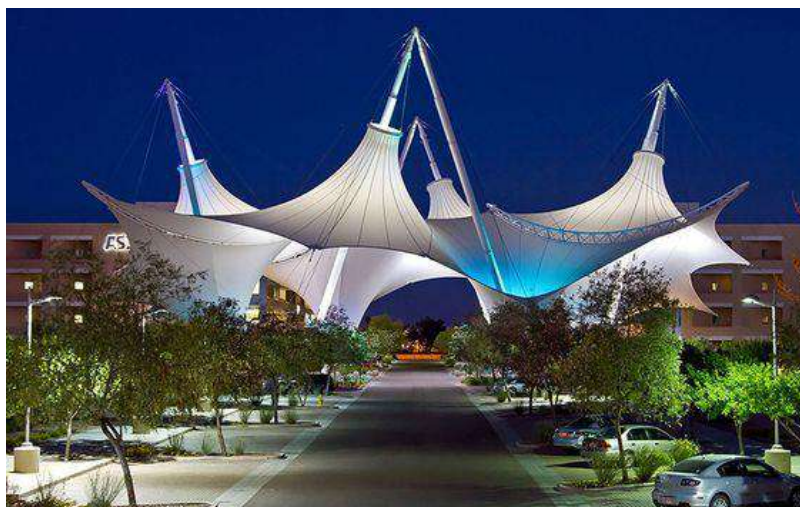
Viseće konstrukcije predstavljaju posebne, atraktivne, jedinstvene i vizualno impresivne konstruktivne oblike koji arhitektima i inženjerima daju priliku eksperimentiranja i osmišljavanja strukture koja će dominirati prostorom kao pravo umjetničko djelo. Njihova je primjena danas velika i raznovrsna. Najčešće se upotrebljavaju kao krovni sustavi u urbanim sredinama za natkrivanje sportskih dvorana, stadiona, izložbenih prostora, amfiteatara, kazališta, trgovačkih centara, zračnih luka, itd. Posebnu vrstu visećih konstrukcija čine i viseći mostovi, kojima se zasada mogu svladati najveći mogući rasponi (više od 2000 m).

1.1. Općenito

Suvremeni pristup projektiranju, koji karakterizira optimiziranje konstrukcije, a uključuje povećanje brzine građenja, korištenje minimalne količine materijala i nisku cijenu izvođenja uz ispunjenje zahtijevane nosivosti potaknuli su inženjere da osmisle konstruktivni sustav koji će zadovoljiti sve spomenute zahtjeve. Tragom toga osmišljene su viseće konstrukcije koje su lagane i kojima se mogu natkriti veliki rasponi bez upotrebe unutarnjih stupova čime se omogućava veliki uporabni prostor građevine.

Glavna karakteristika ovakvih konstrukcija su nosivi elementi membrana i kabeli, koji čine vlačnu konstrukciju (prenose opterećenja preuzimajući vlačne sile) i koji moraju formirati specifičan geometrijski oblik.

U posljednje vrijeme ubrzano se razvijaju materijali i tehnike projektiranja ovih konstrukcija što dovodi i do razvoja područja primjene istih na vrlo zanimljiv i spektakularan način.



Slika 1. Skysong, Scottsdale, AZ, SAD

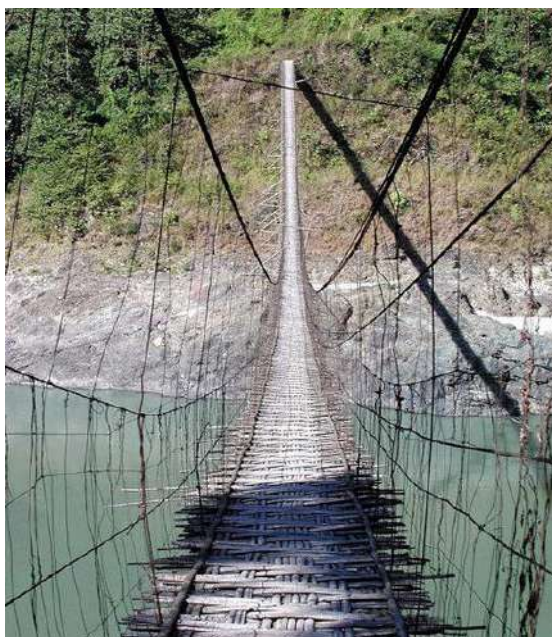
1.2. Povijesni pregled

Primjena i gradnja visećih konstrukcija seže daleko u prošlost još prije čak 44 000 godina, kada su nomadska plemena, posebno u nepovoljnim klimatskim uvjetima, izrađivali šatore, jednostavna skloništa od životinjske kože raširene između štapova usidrenih u tlo, kako bi se zaštitili od loših vremenskih uvjeta i snažnog vjetra. Idealan oblik šatora za takve uvjete je stožasti i najviše su ih izvodila i razvijala indijanska plemena. [1]



Slika 2. Indijanski šator Teepee

Nadalje, zbog potrebe za prelaskom rijeka ili drugih prepreka prije više od 3000 godina počeli su se izrađivati mostovi od dvaju bambusovih užeta međusobno povezanih daskama. Takvi mostovi najviše su se izrađivali u Kini i trajali su i nekoliko stoljeća. [2]



Slika 3. Most od bambusa

Iako primjena visećih konstrukcija seže daleko u prošlost, njihov značajniji razvoj kreće tek prije nekoliko stotina godina i to prvenstveno u mostogradnji, kada su se počela primjenjivati čelična užad za konstrukcije mostova velikih raspona. Prvi izvedeni moderni viseći most bio je most Menai u Sjevernom Walesu. [3]



Slika 4. Most Menai, Sjeverni Wales

Tek pedesetih godina prošlog stoljeća dolazi do značajnijeg razvoja visećih konstrukcija u visokogradnji i to u vidu krovnih elemenata. Veliki doprinos tomu dao je Frei Otto, njemački inženjer i arhitekt i utemeljitelj Instituta za lagane konstrukcije Sveučilišta u Stuttgartu, čije je najpoznatije djelo krovište Olimpijskog stadiona u Münchenu. [2] Uz njega, treba spomenuti i drugog njemačkog inženjera Jörga Schlaicha koji je također zaslužan za pionirske napore pri razvoju vlačnih konstrukcija. [4]



Slika 5. Olimpijski stadion, München



Slika 6. Krovna konstrukcija, Olimpijski stadion

2. PODJELA

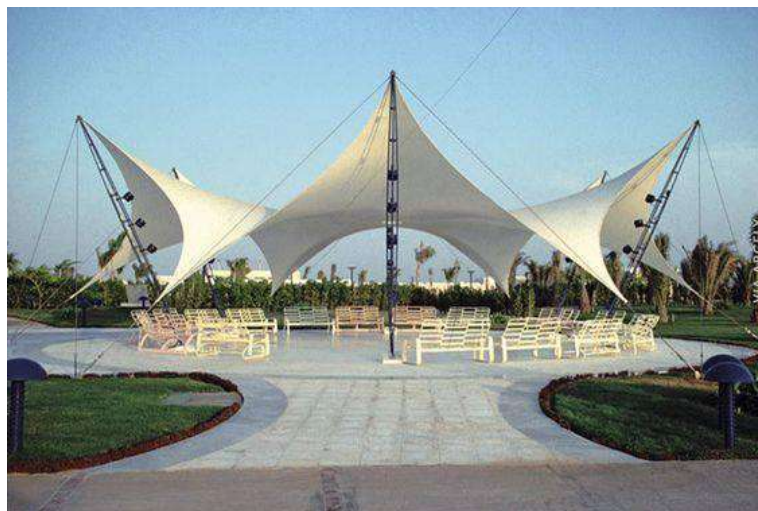
Podjela visećih konstrukcija temelji se na načinu djelovanja i prijenosa vlačnih sila. Mogu se podijeliti na linearne vlačne konstrukcije, koje su uobičajeno viseći mostovi, trodimenzionalne vlačne konstrukcije, koje čine krovovi sportskih arena te površinski napregnute vlačne konstrukcije, kod kojih je tkanina dio nosive strukture i to su najčešće viseći krovovi. [5]

2.1. Viseći krovovi

Viseći krovovi su specifičan tip krovnih konstrukcija koji su ovješeni ili pridržani pomoću užadi. Kod ovješениh krovova koriste se kabeli za izravno prenošenje opterećenja s krova i to na dva načina: kad je krovna konstrukcija oslonjena na užad ili kad se dodatna opterećenja ovjese na i ispod užadi. U sustavima koji su pridržani pomoću užadi opterećenje krova nose kruti konstrukcijski dijelovi, a užad služe kao dodatna ojačanja. Viseće krovne konstrukcije mogu biti: od napete tkanine ili poduprte zrakom. [6]

2.1.1. Krovovi od napete tkanine

Izvode se tako što se tkanina pričvršćuje na nenapeta krovna užad, a zatim se napinjanjem užadi napinje i tkanina. Zbog toga su ovakvi krovovi lagani i čvrsti te atraktivni. [6]



Slika 7. Krovna konstrukcija od napete tkanine

2.1.2. Krovovi poduprti zrakom

Ovakve konstrukcije izgledaju i funkcioniraju poput balona. Kada je krov napuhan, sustav užadi sprječava prekomjerno rastezanje tkanine, a ukoliko krov nije napuhan, užad su opuštena, ali i dalje pružaju potporu konstrukciji. [6]

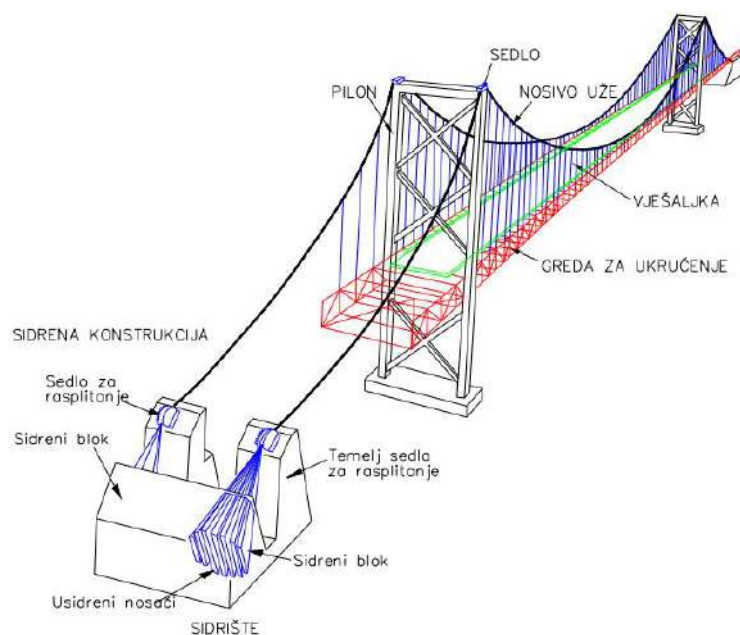


Slika 8. Krovna konstrukcija poduprta zrakom

Iako su ovakve konstrukcije atraktivne na više načina (estetski, ekološki i tehnički) donedavno se nisu intenzivno gradile, a glavni razlog tomu jest vjerojatno to što ih je teško analizirati i proračunavati. Prvi korak u njihovu analiziranju jest definiranje geometrije tj. pronalaženje optimalnog oblika o čemu će se detaljnije govoriti u nekom od sljedećih poglavlja. [7]

2.2. Viseći mostovi

Viseći mostovi jedan su od najstarijih i najprimitivnijih tipova mostova. Glavni nosivi sustav čine: vlačno uže koje je obješeno preko pilona, piloni, gredna kolnička struktura, vješaljke i sidreni blokovi. [8]



Slika 9. Osnovni dijelovi visećeg mosta

Ovisno o načinu sidrenja u sidreni blok viseći mostovi mogu biti pravi ili nepravilni viseći mostovi. Kod pravih visećih mostova užice se sidri u tlo, koje preuzima sva opterećenja dok se kod nepravilnih visećih mostova užice sidri u gredu za ukrućenje, koja onda preuzima horizontalna djelovanja. [8]



Slika 10. Pravi viseći most



Slika 11. Nepravilni viseći most

Budući da su osnovni nosivi dijelovi visećih mostova izrađeni od čelika, masovna proizvodnja čelika dovela je do sve većeg proučavanja i izgradnje visećih mostova. Prve teorije za proračun dao je Navier (1823.) nakon čega su Rankine i Melan dali i svoje pretpostavke temeljene na teoriji elastičnosti. [9]

Danas se u mostogradnji najviše koriste nosivi sustavi oblika lančanice jer omogućuju svladavanje vrlo velikih raspona i jednostavnu izvedbu.

Značajna karakteristika visećih mostova su velike deformacije pod pokretnim opterećenjem i pod utjecajem vjetra, što izaziva vibracije. Stoga se ovi sustavi koriste isključivo za cestovni i pješački promet, a ne i za željeznički. [10]

Iz povijesti su poznati mostovi do čijeg je rušenja došlo upravo zbog aerodinamičke nestabilnosti, a jedan od najpoznatijih jest slučaj rušenja Tacoma mosta u SAD-u.



Slika 12. Rušenje Tacoma mosta, SAD

Tijekom povijesti izveden je velik broj visećih mostova, a prvi moderni među njima jest već spomenuti Menai most preko tjesnaca Menai između Walesa i otoka Anglesey.

Rekordni raspon visećih mostova, ali i mostova uopće jest 2023 m (glavni raspon) u Turskoj preko kanala Dardaneli, prirodne granice između Europe i Azije. Most je otvoren 2022. godine.



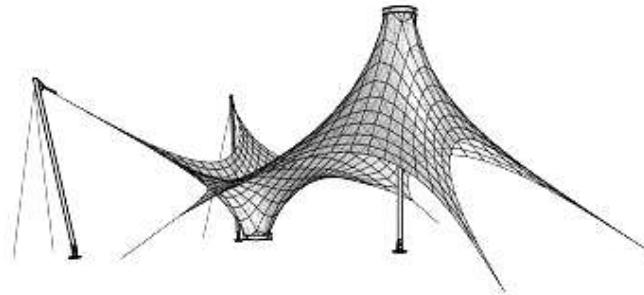
Slika 13. Çanakkale most, Turska

3. OBLICI

Iako je idealan oblik ovakvih konstrukcija stožasti, danas postoje i mnogi drugi različiti osnovni oblici visećih konstrukcija. Neki od njih su:

a) oblik stošca

Karakterizira ga postojanje visoke točke koja može biti pridržana unutarnjim ili vanjskim elementima te velika radijalna naprezanja u okolini središta. [11]



Slika 14. Oblik stošca



Slika 15. Primjer izvedene konstrukcije stožastog oblika

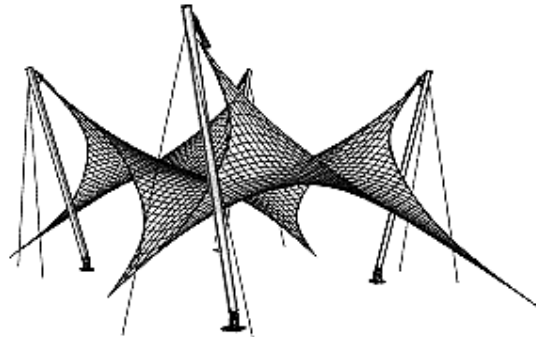
Postoje i složeni stožasti oblici nastali kombiniranjem nekoliko osnovnih. Oni se dodiruju na fiksnim rubnim elementima i mogu biti međusobno neovisni ili djelovati kao cjelina. [11]



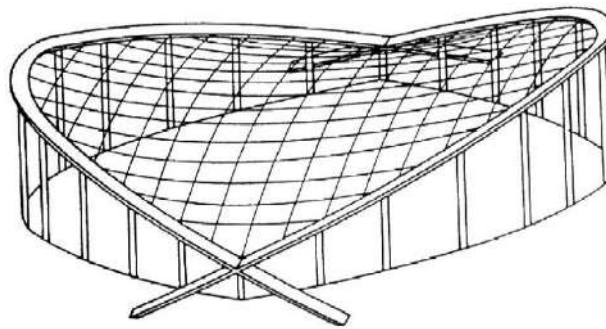
Slika 16. Primjer izvedene konstrukcije složenog stožastog oblika

b) hipar ili oblik sedla

Ploha dvostruke zakrivljenosti koja može biti fiksirana između krajnjih točaka ili između lukova. [11]



Slika 17. Oblik sedla fiksiran između krajnjih točaka



Slika 18. Oblik sedla fiksiran između lukova

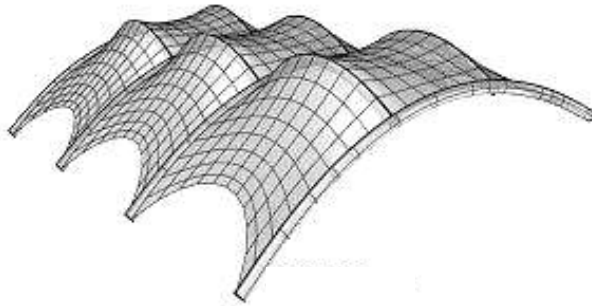


Slika 19. Primjeri izvedenih konstrukcija sedlastog oblika

Također, postoje složeni oblici pojedinačnih sedla spojenih u jednu cjelinu koji mogu djelovati kao pojedinačni elementi ili zajedno. [11]

c) oblik svoda

Poseban oblik konstrukcija koji, ovisno o rasponima, može biti vrlo ekonomičan za izvođenje. [11]



Slika 20. Oblik luka



Slika 21. Primjer izvedene konstrukcije lučnog oblika

Moguće je i kombiniranje oblika ili postavljanje svodova u paralelnom nizu.



Slika 22. Primjer izvedene konstrukcije s paralelnim lukovima

d) mrežne membrane

Karakterizira ih kombinacija užiadi i naprednih laganih ETFE, PTFE i PVC membrana. Koriste se za krovove velikih raspona, najčešće na stadionima. [11]



Slika 23. Membranska mreža



Slika 24. Primjer izvedene konstrukcije s membranskim mrežama

Navedeni oblici su oblici visećih krovova, a za viseće mostove najčešće se koriste nosivi sustavi oblika lančanice.

4. KONSTRUKCIJSKO OBLIKOVANJE

Prilikom projektiranja bilo kojega tipa konstrukcije bitno je težiti optimizaciji nosivosti. Međutim, kod betonskih, zidanih, drvenih ili nekih drugih konstrukcija unaprijed je poznat oblik pa je potrebno samo dimenzionirati elemente na određena opterećenja, koja se mogu pojaviti tijekom uporabnog vijeka konstrukcije.

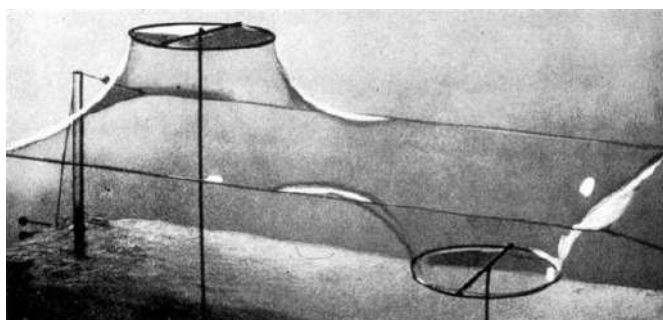
Ipak, kod visećih konstrukcija koje izgledaju jednostavno potrebno je najprije odrediti tj. pronaći ravnotežni oblik konstrukcije. Takav kompleksniji način projektiranja ne ovisi samo o zamisli arhitekta, već je rezultat statičkog proračuna koji se naziva nalaženje oblika, a osigurava da je svaka točka konstrukcije u ravnotežnom stanju. [12]

Stoga je vrlo važno da projektiranje ovakvih konstrukcija bude isprepleteno suradnjom arhitekata, projektanata konstrukcije, izvođača, proizvođača materijala, itd. Konstrukcijsko oblikovanje čine 3 faze: nalaženje oblika, proračun konstrukcije, krojenje i izrada radioničkih nacрта. [12]

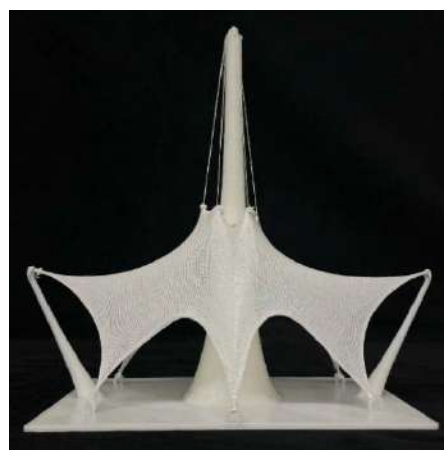
4.1. Nalaženje oblika viseće konstrukcije

Nalaženje oblika prva je i jedna od najbitnijih točaka pri projektiranju visećih konstrukcija, a podrazumijeva određivanje početnog, ravnotežnog oblika. [12]

U samim počecima projektiranja inženjeri su shvatili da oblici u prirodi tvore minimalne oblike i takvim su se fizikalnim modelima koristili pri pronalasku optimalnog oblika konstrukcije. Koristili su se modeli opne od sapunice te različiti materijali kao što su tkanina, žica ili spjalice. [13]



Slika 25. Fizikalni model od sapunice



Slika 26. Fizikalni model od tkanine

Međutim, takav pristup pokazao je velika odstupanja od stvarne konstrukcije pri mjerenju koordinata točaka te su se razvili određeni numerički modeli pa se oblik pronalazi pomoću specijaliziranih računalnih programa. [14]

4.2. Proračun konstrukcije

Nakon određivanja oblika konstrukcije, uzimaju se u obzir vanjska djelovanja i proračunava konstrukcija. Proračun krutog dijela konstrukcije definiran je europskim normama ovisno o materijalu od kojega je izrađen. Međutim, proračun membranskih konstrukcija, zbog fleksibilnosti membrane i prostorne zakrivljenosti, nije definiran europskim normama. Jedina norma koja je trenutno dostupna je vezana za privremene šatore ograničene površine veće od 50 m². [15]

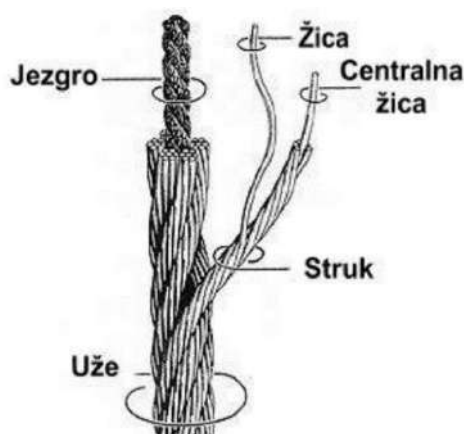
Pri proračunu uzimamo u obzir sva djelovanja koja djeluju i na klasične konstrukcije te dodatno prednapinjanje. Dakle, dominantna djelovanja su opterećenja snijegom i vjetrom dok se vlastita težina, a samim tim i potres te opterećenja od temperature mogu zanemariti. Korisno opterećenje u vidu rasvjetnih tijela ili sportske opreme moraju se izbjegavati na membranskom dijelu i trebaju se postavljati na potpurnu konstrukciju. Zbog male težine i velike površine membrane vjetar je najdominantnije i najkritičnije opterećenje pa je za konstrukcije velikih raspona ili slobodnih rubova potrebno provesti ispitivanje u vjetrovnom tunelu. [12]

Ipak, ovakve su konstrukcije osjetljive na nejednoliko raspodijeljeno opterećenje pa je točno određivanje raspodjele opterećenja izuzetno teško i veliku ulogu imaju iskustvo i ispitivanja na fizičkim modelima. [12]

4.3. Konstrukcijski elementi i spojevi

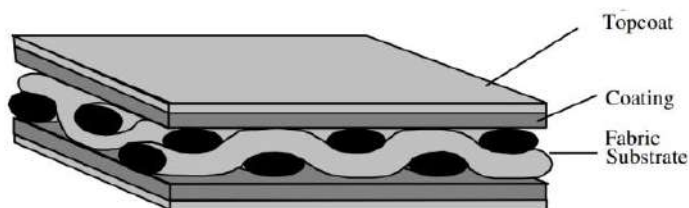
Kako je već i navedeno, osnovni konstrukcijski elementi ovog tipa konstrukcija su nosivo uže te sekundarni elementi užad i tkanina tj. membrana.

Uže treba imati malu fleksijsku i poprečnu krutost da bi se utjecaj momenata savijanja i poprečnih sila zanemario i da bi preuzimao samo vlačne sile. Stoga je najčešće korišten materijal čelik jer zadovoljava navedene uvjete. [4]



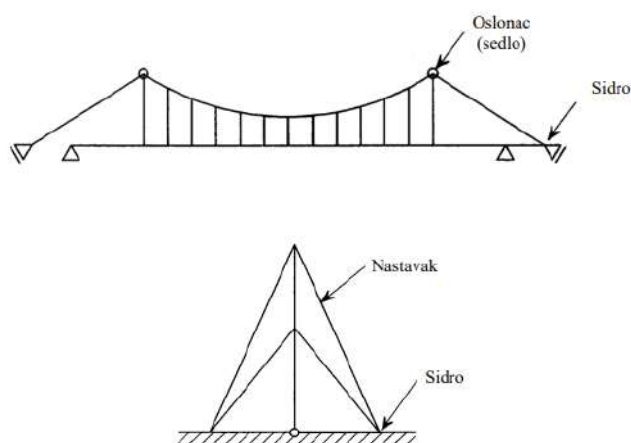
Slika 27. Čelično uže

Tkanina, tj. membrana, najimpresivniji je element visećih konstrukcija pa je stoga sam odabir membrane jako bitan radi estetskog značenja konstrukcije. Međutim, bitna su i trajnost i nosivost takvog elementa pa odabrani element ipak mora zadovoljiti sve potrebne zahtjeve. Membrane se izrađuju od satkanih ili pletenih vlaknaca od različitih materijala, a najviše od sintetičkih tkanina i staklenih vlaknaca. [15]



Slika 28. Unutarnji sastav tkanine

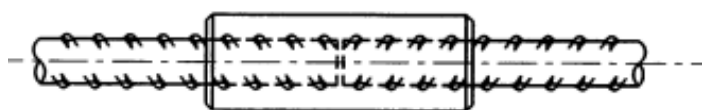
Nastavci, oslanjanje (sedlanja) i sidrenje kabela najznačajniji su tipovi spojeva koji se pojavljuju u ovim konstrukcijama. [4]



Slika 29. Tipovi spojeva u visećim konstrukcijama

Svi navedeni spojevi moraju ispuniti određene zahtjeve: [4]

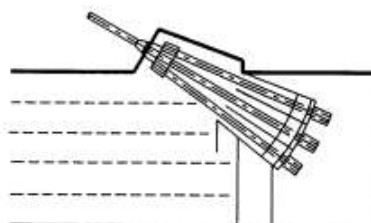
- a) sigurno prenositi opterećenja koja na njih djeluju
- b) sprječavati proklizavanje kabela
- c) odupirati se umoru
- d) biti lako dostupni zbog održavanja



Slika 30. Nastavci



Slika 31. Sedla



Slika 32. Sidra

Ako postoji međusobni prelazak kablova jednog preko drugog, potreban je spojni element koji kablove drži fiksno na već ranije određenom položaju i sprječava klizanje kablova. [2]



Slika 33. Spoj dvosmjernog sustava kablova

Ukoliko imamo konstrukciju većeg raspona, potrebni su kablovi većeg poprečnog presjeka, koji se iz estetskih razloga zamjenjuju dvama paralelnim užetima. [2]



Slika 34. Spoj dvosmjernog sustava s dvama paralelnim užetima

U rubnim dijelovima konstrukcije sile su veće nego u unutarnjim pa je potrebna veća debljina rubnih kablova. Također, na tim mjestima može doći do klizanja pa se takva pojava sprječava načinom spajanja prikazanim na slici 35. [2]



Slika 35. Spoj s rubnim užetom

Spoj užeta s gredom, lukom, jarbolom ili nekim drugim nepomičnim osloncem smatra se nepomičan i krut. Takav način spoja prikazan je na slikama 36. i 37. [2]

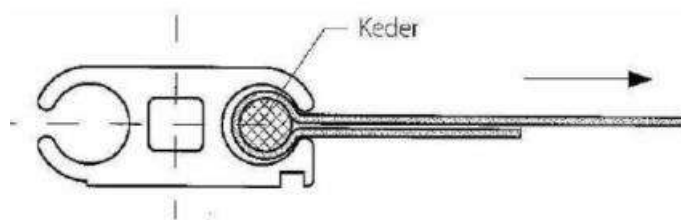


Slika 36. Spoj užeta s čeličnim stupom



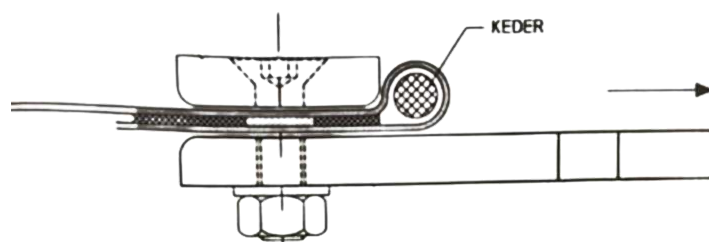
Slika 37. Spoj užeta s betonskim stupom

Nosači za membrane mogu se podijeliti na točkaste i linijske. Linijski nosači su konstruirani pomoću Keder tračnica koje klize u pomoćni profil i pričvršćuju se na potpornu konstrukciju spojnicama. [16]



Slika 38. Keder tračnice u pomoćnom profilu za linijsko sidrenje

Kod točkastih nosača također se koriste Keder tračnice koje se pričvršćuju između dvije čelične ploče kutnog spoja tkanine. [16]



Slika 39. Keder tračnice za točkasto sidrenje

Kod sidrenja membrane na rubovima važno je membranu pričvrstiti na stup, a to se ostvaruje preko elemenata prikazanih na sljedećim slikama. [16]



Slika 40. Spoj membrane s rubnim elementima

5. MATERIJALI

5.1. Čelik

Za vlačne elemente, prvotno korištene biljke povijuše i penjačice, prvo su zamijenjene lancima od lijevanog željeza, dok danas postoji široka upotreba užadi od žica visoke čvrstoće i mogućnost upotrebe plastike ojačane karbonskim vlaknima. Tako od skromnih (neznatnih) početaka malih egzotičnih visećih sustava, put je popločan k primjenama visećih konstrukcija velikih dimenzija (mjerila). Tehnologija izrade užadi je daleko najznačajniji element u razvoju visećih (vlačnih) konstrukcija. [4]

Nosivo uže je izrađeno od čeličnih međusobno povezanih tj. upletenih žica visoke čvrstoće. Čvrstoća čelika za izradu užadi je puno veća od čvrstoće običnog konstrukcijskog čelika. [4]

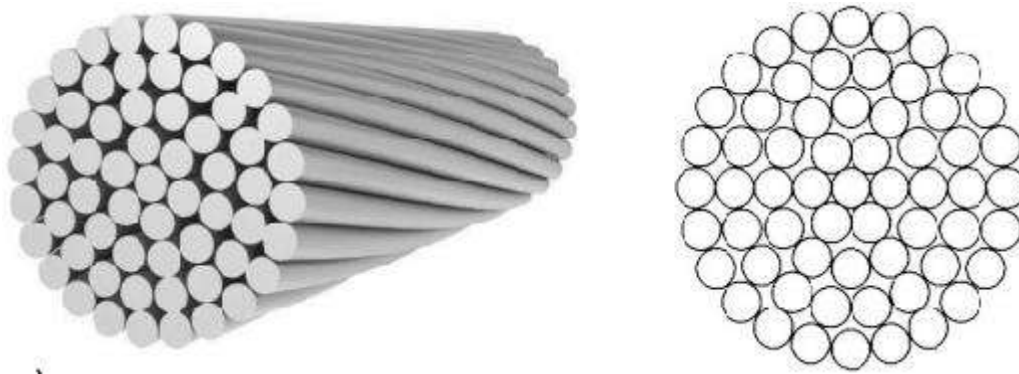
Užad se najčešće izrađuje od nelegiranih, umirenih čelika u kojima je udio ugljika između 0,5% i 0,9% uz postojanje pratećih elemenata silicija, mangana te u manjim količinama sumpora i fosfora. [17] Zbog tog kemijskog sastava i načina proizvodnje vlačna čvrstoća je velika i iznosi do 1800 MPa. Modul elastičnosti užadi manji je od modula elastičnosti čelika od kojeg su izrađene žice, a može iznositi do 200 000 MPa. [4]

Ovisno o načinu namotavanja žica, njihovoj kvaliteti i poprečnom presjeku užad možemo podijeliti na:

a) spiralni snopovi

Nastaju namotavanjem sloja od 6 ravni čeličnih žica (promjera 5-7 mm) oko jezgre. Svaki sljedeći sloj čini 6 žica više nego u prethodnom sloju. Modul elastičnosti ovog tipa užadi je 145-170 GPa.

Ovaj tip užadi se primjenjuje kada je potrebna velika fleksibilnost npr. kod rubnih dijelova, visećih mostova, vlačnih elemenata u stabilizacijskim vezovima itd. [18]

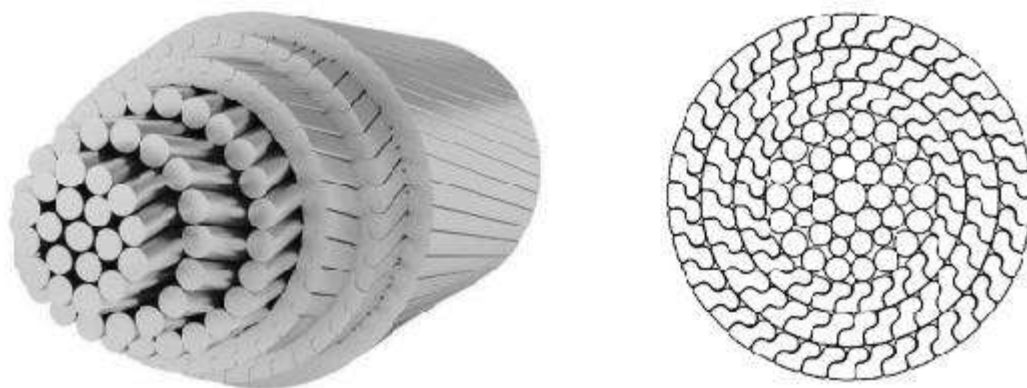


Slika 41. Spiralna čelična užad

b) užad unutar kružnog omotača

Čine ih dvije vrste žica: žice kružnog oblika i žice posebnog Z-oblika. Žice kružnog oblika čine jezgru i namotavaju se u nekoliko slojeva, a žice Z-oblika vanjski su sloj. Zbog tog posebnog Z-oblika one se mogu jako dobro povezati i površina postaje ravna i bez ikakvih šupljina. Modul elastičnosti iznosi između 160 i 180 GPa.

Primjenjuju se kao stabilizirajuća užad kod mostova, tornjeva, pilona, itd. [18]

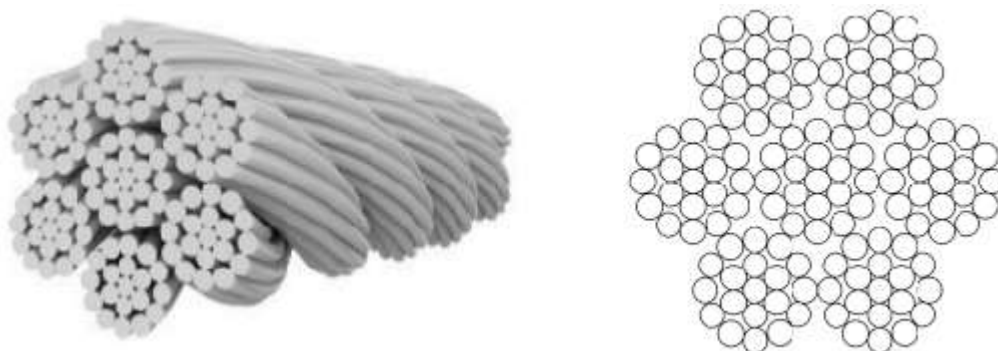


Slika 42. Užad unutar kružnog omotača

c) žičana užad

Karakterizira ih nizak modul elastičnosti, manja otpornost na koroziju i veća mogućnost trošenja i oštećenja površine. Modul elastičnosti iznosi oko 100 MPa.

Koriste se za specijalne namjene u vidu kabela dizala, balkona ili pješačkih prolaza.[18]



Slika 43. Žičana užad

5.2. Tkanine

Najčešće korišteni materijali za membrane visećih konstrukcija su platna s premazima. Neobrađeno platno, najčešće od poliestera ili sa staklenim vlaknima, obrađuje se dodatnim slojevima i premazuje specijalnim PVC, PTFE ili silikonskim premazima. Platno daje čvrstoću i krutost membrani dok premazi poboljšavaju njegova svojstva u vidu vodonepropusnosti, zaštite od UV zračenja i drugih štetnih vanjskih djelovanja. [15]

Različita platna imaju različite namjene i daju različit estetski ugođaj, ali i različita mehanička, optička, termička, hidroizolacijska i druga svojstva. Stoga će se za neke od njih, koji se najčešće koriste u građevinarstvu, navesti razlike i bitne karakteristike. [15]

a) PVC membrane

Glavni i najstariji su materijal u industriji krovnih pokrivača od tkanine od šezdesetih godina prošlog stoljeća. Modul elastičnosti im je od 350 MPa do 1200 MPa, debljina 0,5 mm do 1,5 mm, a vlastita težina od 0,8 kg/m² do 1,1 kg/m². [17]

Prednost im je relativno niska cijena i jednostavnost izvedbe te poprilično dobra svojstva u slučaju požara i otpornost na atmosferilije. Održavanje je jednostavno jer se površina sama čisti, a proizvodi se u različitim bojama. Mane su kratak vijek trajanja (oko 15 godina) i pojava puzanja. [17]



Slika 44. Primjeri konstrukcija od PVC-a

b) Staklena vlakna presvučena PTFE-om (teflonom)

Pogodna su za velike raspone malih zakrivljenosti. Vlačna čvrstoća im iznosi oko 3500 MPa. Potvrđeni vijek trajanja je preko 45 godina i prema najnovijim istraživanjima otporna su na puzanje. [17]

Prednost im je negorljivost, tj. otpornost na visoke temperature, ali i otpornost na niske temperature (od -73°C do 232°C) te otpornost na djelovanja sunčevog zračenja, biološke i kemijske utjecaje. Velike su prozirnosti što smanjuje potrebu za umjetnim svjetlom tijekom dana. [19]

Nedostaci su krhkost materijala i moguća znatna oštećenja pri neadekvatnom transportu i postavljanju. Nedostatak je također i visoka cijena jer su čak i do 10 puta skuplji od PVC tkanina te ograničena mogućnost boja. Zbog velike refleksije estetski su prihvatljivo rješenje za mnoge objekte. [19]



Slika 45. Primjeri konstrukcija s PTFE-om

c) ETFE membrane

ETFE membrane se koriste kod pneumatskih konstrukcija za jako velike raspone. Imaju izuzetno malu vlačnu čvrstoću, samo oko 5% vlačne čvrstoće PVC ili PTFE membrana. Elastična svojstva su im veća nego kod PTFE membrana te može doći do pojave puzanja. [17]

Prednosti su im otpornost na UV zračenje i na kemijska djelovanja te otpornost na visoke temperature i nezapaljivost što im omogućuje veliku izdržljivost u ekstremnim uvjetima. Propuštaju velike količine svjetlosti (do 95%) što uvelike smanjuje potrebu za umjetnom rasvjetom te utrošak energije. Imaju dug vijek trajanja, više od 30 godina, a zahtjevi za održavanjem su maleni jer se prašina i druge nečistoće ne lijepe na površinu. Ako je potrebno popravljavanje, dijelovi se mogu zavariti ili zakrpati bez zamjene cijelog sustava. Ekološki je prihvatljiv jer se lako može ukloniti i reciklirati. [20]

Nedostaci su složen i dugotrajan način izvedbe koji zahtjeva i dodatno iskustvo te visoka cijena koja je i do 3 puta veća od cijene PVC-a. [17]



Slika 46. Primjer konstrukcije od ETFE-a

6. NAČIN IZVEDBE

Kod visećih konstrukcija bitna je, već u fazi projektiranja, uska suradnja između projekatanta, izvođača i montažera konstrukcije kako bi se unaprijed znao plan montaže jer se prilikom montaže javljaju opterećenja koja se trebaju uzeti u obzir, a koja se neće pojaviti za vrijeme uporabnog vijeka konstrukcije. [4]

Ovakve se konstrukcije mogu montirati tako da se mreža na tlu montira i postavlja u konačan položaj ili da se cijela konstrukcija montira u zraku.



Slika 47. Primjer montaže visećeg mosta

Prednosti montažne gradnje su vrlo male ili nikakve potrebe za skelom, brz način izvođenja jer se elementi proizvode u radionicama i dopremaju na gradilište te mogućnost izvođenja bez utjecaja na okolne aktivnosti npr. prilikom montaže visećeg mosta moguće je odvijanje prometa ispod mosta ili kod montiranja krova stadiona moguće je odvijanje svih aktivnosti na stadionu, itd. [4]

Međutim, ovakav način izvođenja nije jednostavan pa su potrebne velika stručnost i preciznost pri izvedbi te neprestana kontrola izvođenja da ne bi došlo do preopterećenja potporne konstrukcije. [4]

7. PREDNOSTI VISEĆIH KONSTRUKCIJA

Danas se viseće konstrukcije sve više izvode zbog mnogih svojih prednosti, a pretpostavlja se da će u budućnosti imati još bolja svojstva i biti još primjenjivije.

Prednosti su im mala vlastita težina, velika nosivost i mogućnost natkrivanja ili svladavanja vrlo velikih raspona. Također, otporne su na različite mehaničke i kemijske utjecaje iz okoline, štite od UV zračenja i otporne su na vrlo visoke temperature. [21]

Ako se pravilno održavaju (korištenje različitih premaza) imaju dug vijek trajanja. Velika prozornost materijala, koji se koriste omogućuje prodiranje dnevne svjetlosti i uštedu energije, ali i stvaranje osjećaj udobnosti te veliku mogućnost oblikovanja različitim svjetlosnim efektima. [21]

Prednost im je, također, kratko vrijeme izgradnje koje omogućuje kratak prekid aktivnosti koje se trebaju odvijati u/na takvim građevinama. Održavanje i mogući popravci odvijaju se vrlo jednostavno zamjenom samo onih dijelova koji su oštećeni. [21]

Ovakve su konstrukcije ekološki vrlo prihvatljive jer materijali koji se koriste nemaju štetan utjecaj na okoliš i moguće ih je u potpunosti reciklirati.



Slika 48. Prikaz osnovnih prednosti visećih konstrukcija

8. PRIMJERI

8.1. 1915 Çanakkale most

1915 Çanakkale most je najduži viseći cestovni most na svijetu. Izgrađen je preko tjesnaca Dardaneli 10-ak km južno od Mramornog mora u pokrajini Çanakkale. Smješten je južno od gradova Lapseki u Aziji i sela Sütluçe u Europi. Most je dio autoceste Kınalı-Balıkesir (O6) koja povezuje autoceste O3 i O7 u Istočnoj Trakiji s autocestom O5 u Andoliji. [22]



Slika 49. Geografski položaj mosta

Ukupna duljina mosta je 3563 m, a s pristupnim cestama 4608 m pri čemu je srednji raspon 2023 m, a rubni 770 m. Visina pilona je 318 m. Prometnica na mostu se nalazi na visini 72,8 m od mora, ukupne širine 45,06 m sa šest prometnih traka (po 3 u svakom smjeru) i prostorom za održavanje mosta. [22]



Slika 50. Prikaz prometnice na mostu

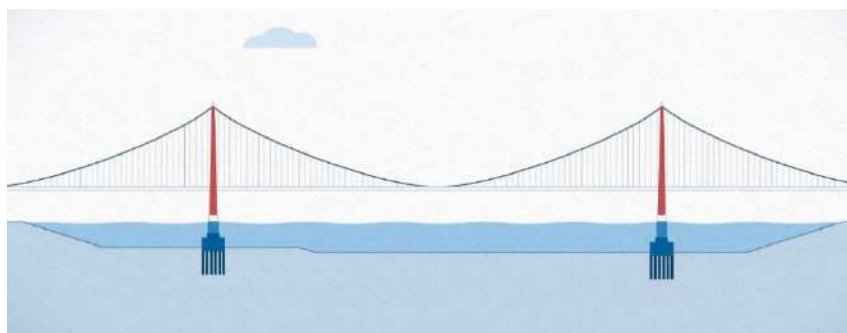
Kamen temeljac za izgradnju mosta postavljen je 2017. godine, a most je otvoren 18. ožujka 2022. godine. Ukupna vrijednost troškova bila je oko 3,41 mil. dolara. [22]

Neke od navedenih brojki imaju simbolično značenje. Tako broj 1915 u nazivu mosta simbolizira poznatu pomorsku bitku u pokrajini Çanakkale (Galipolju) iz 1. Svjetskog rata. Duljina glavnog raspona od 2023 m označava stotu obljetnicu Turske Republike, a datum otvaranja mosta i visina pilona simbolično su povezani s datumom spomenute bitke. Uz sve to, most je crveno-bijele boje koja simbolizira zastavu Turske. [23]

Budući da je zahtjevan velik slobodni profil ispod mosta, projektanti su se odlučili za strukturu visećeg mosta. Projektanti su tvrtka COWI u suradnji s DLSY JV i tvrtkama Daelim, Limak Holding, SK E&C, Yapi Merkezi. U fazi projektiranja, a i izvedbe trebala se obratiti posebna pozornost na jaki vjetar i izrazitu seizmičku aktivnost na tom području te vrstu tla. [23]

Budući da je postojao ograničen rok izvedbe (18. ožujka 2023.) predloženo je modularni način izvođenja. Tako su elementi proizvedeni u radionicama, transportirani i sastavljeni na mjestu ugradnje. [24]

Prije same izvedbe konstrukcije bilo je potrebno poboljšati temeljno tlo na obje kopnene strane i ispod pilona da bi konstrukcija izdržala eventualne udare brodova, potres ili izrazito jak vjetar. [23] Nakon ojačanja tla izvedena su 2 betonska kesona visine 20 m i površine 74×83 m na dubini od 45 m, koji su, da bi se povećala seizmička otpornost, ojačani čeličnim pilotima. Na njih su dodani čelični nastavci da bi se piloni mogli postaviti iznad mora. [24]



Slika 51. Temelji mosta

Nakon montažne izvedbe pilona, nanizala su se užad nit po nit (više od 162 000 km žice). [24]



Slika 52. Početak izvedbe mosta

Nakon montaže pilona, betonska kolnička konstrukcija (greda za ukrućenje) izvedena je na visini 72 m iznad površine mora. [24]



Slika 53. Izvedba kolničke konstrukcije

Cilj planiranja i izvedbe ovakvog mosta bio je povezati europsku i azijsku obalu Turske i time skratiti putovanje od nekoliko sati na samo nekoliko minuta. Njegovom se izvedbom, prema nekim procjenama, godišnje uštedi 458 mil. dolara zbog smanjene potrošnje goriva i emisije ugljika. [25]

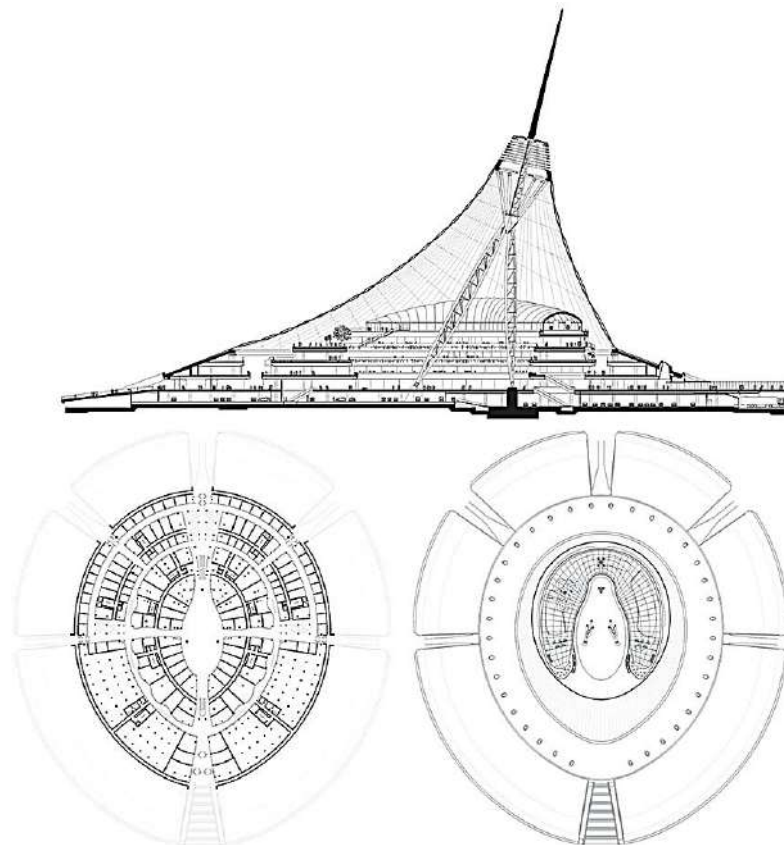
Izgradnja ovog mosta ima veliki utjecaj na infrastrukturu, gospodarstvo i cjelokupni razvoj zemlje i dokaz je veličine i snage, ne samo u inženjerskom pogledu, nego i u onom što se sve može postići zajedničkim trudom i radom te upotrebljavanjem vlastitih talenata.



Slika 54. 1915 Çanakkale most

8.2. Khan Shatyr

Khan Shatyr najviša je viseća konstrukcija na svijetu izvedena u glavnom gradu Kazahstana, Astana. Zamišljena je kao zatvoreni grad tj. zabavni centar koji čine park, zabavni i rekreacijski sadržaji, trgovine, kafići, restorani, kina te neki drugi fleksibilni prostori koji se mogu koristiti za različite namjene npr. za izložbe i druge događaje. Dajući ugodnu atmosferu tijekom cijele godine ova je građevina važno društveno i kulturno središte u sjevernom dijelu grada Astana. [26]



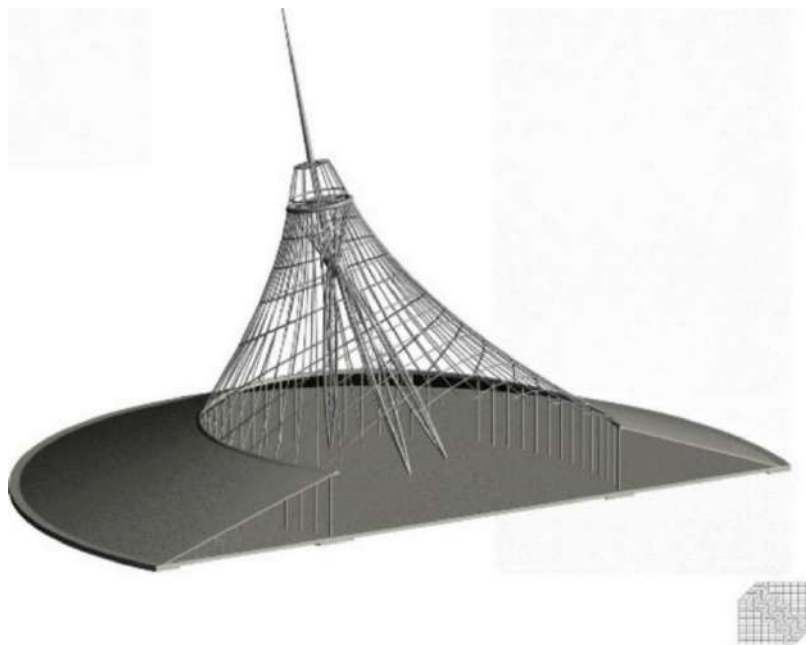
Slika 55. Presjek i tlocrt građevine

Gradnja s vrlo naprednim tehnologijama započela je 2006. godine, a završena 5. srpnja 2010. na rođendan kazahstanskog predsjednika. Khan Shatyr je visine 150 m, obuhvaća područje od 100 000 m² i obložen je ETFE membranom da bi izdržao ekstremne temperature u Kazahstanu (vrlo hladne zime i jako topla ljeta), koje se kreću od -35°C do 35 °C. [27]

Projekt je izradila tvrtka Foster+ Partners i arhitekt Norman Foster, a radove je izvodila tvrtka Sembol. [28]

Konstrukcija je nepravilnog konusnog oblika koji je povučen na jednu stranu radi bolje iskorištenosti unutarnjeg prostora. Radijalna užad se protežu od gornjeg prstena čeličnog jarbola (na visini 90 m od baze) do vanjskog betonskog obruča eliptične baze.

Postoji 192 para radijalnih užadi promjera 38 mm i duljine su od 125 m na prednjoj strani do 70 m na stražnjoj strani šatora. Svaka noga tronošca izrađena je od trostruke rešetke s kružnim šupljim glavnim dijelovima promjera 1000 mm. [28]



Slika 56. Izgled konstrukcije

Na mrežu kabela obješena je troslojna ETFE membrana dizajnirana za zaštitu zatvorenog prostora od vremenskih ekstrema, ali i prodiranje dnevnog svjetla. Cilj je bio izgraditi ekološku građevinu koja stvara ugodnu temperaturu tijekom cijele godine (15 do 30 °C). Tijekom zime sprječava stvaranje leda na unutarnjoj strani strujanjem toplog zraka prema unutrašnjosti membrane, a ljeti se predgrijavanjem vanjskog sloja osigurava zaštita od sunca. [26]



Slika 57. Prozirna membrana Khan Shatyra

Prilikom izvedbe izvođači su morali svladati određene izazove. Najveći izazov bilo je postavljanje tronošca, ali i postavljanje kableske mreže. Zbog vrlo hladnih zima i pojave leda početkom studenog, postojao je i rizik da se beton smrzne prije nego što se stvrdne pa su se koristili plamenici koji bi zagrijavali beton. Zahtjevno je bilo i postavljanje ETFE membrane na niskim temperaturama. Svi navedeni izazovi usporili su izvođenje radova pa su od predviđenih 2 godine, radovi trajali 4 godine. [29]



Slika 58. Khan Shatyr

Ovo je još jedan primjer u kojem su postignuti izvrsni rezultati udruživanjem znanja i stručnosti inženjera i arhitekata iz cijeloga svijeta. Uspješno su prevladane sve teškoće i izazovi ovoga područja i stvoren je jedinstven, velik i otvoren prostor za korištenje tijekom cijele godine unatoč klimatskim uvjetima u kojima se nalazi ovo područje.

8.3. Denver Union Station

Nalazi se u Denveru, Colorado, SAD na raskrižju željezničkih linija A, B, C, E, W i G te mnogih autobusnih linija. Nakon otvaranja prve faze tranzitne infrastrukture u svibnju 2014. godine, novoobnovljena zgrada povijesnog kolodvora otvorena je u srpnju 2014. godine. Od nekad nebitnog željezničkog kolodvora brojnim ulaganjima i izgradnjom nastalo je živahno područje mješovite namjene s velikim gospodarskim značajem i različitim drugim projektima u blizini. [30]



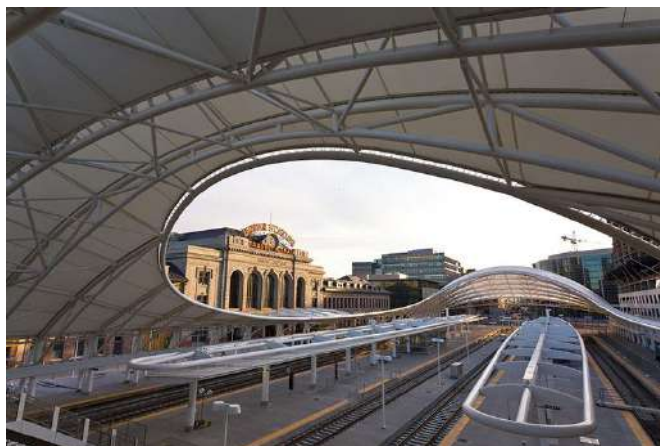
Slika 59. Geografski položaj

Ovaj projekt rezultat je preuređenja 20 ha nekadašnjih željezničkih stanica u glavno regionalno prometno središte. Centar preuređene Denver Union Station je nova dvorana na otvorenom za vlakove, koja se nalazi iza povijesne zgrade kolodvora. Viseća struktura željezničke hale stvara dinamičan kontrast između starog i novog, a duga šetnica povezuje željezničku dvoranu s terminalom lake željeznice. Podzemna autobusna stanica s 22 ulaza ima 16 regionalnih, brzih i lokalnih autobusnih linija. Boje i prirodno osvjjetljenje omogućuju putnicima bolju orijentaciju, a teraco podovi i svjetlucavo žuto staklo izdiže ambijent terminala izvan ugođaja autobusnog kolodvora. Mnštvo otvora i staklenih paviljona omogućuje prodor dnevne svjetlosti dajući osjećaj prostranosti. [31]



Slika 60. Ulaz u podzemnu autobusnu stanicu

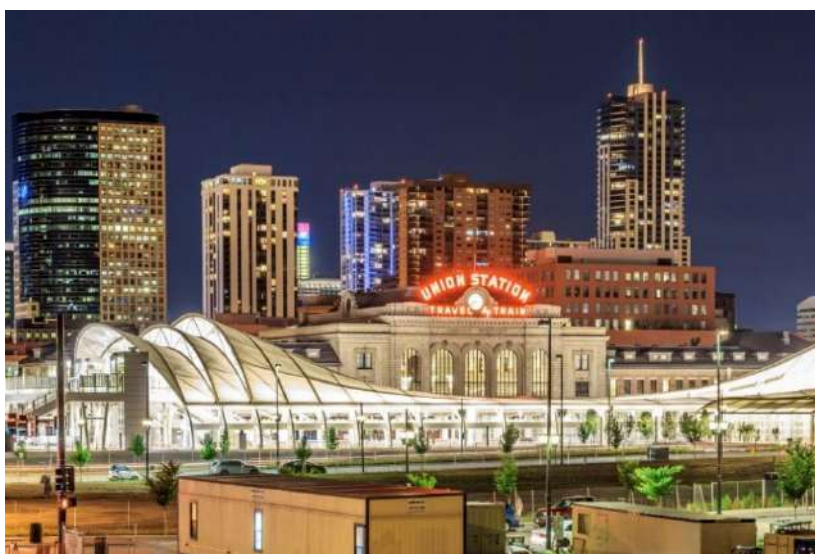
Za projektnu dokumentaciju zadužena je američka arhitektonska, urbanistička i inženjerska firma SOM. Građevina je zamišljena kao učinkovita i isplativa struktura površine 93,68 kvadratnih stopa preko više željezničkih pruga. Osnovni sustav za halu sastoji se od 11 čeličnih lučnih rešetki u rasponu od gotovo 18 stopa, koje podupiru zategnutu PTFE tkaninu. Svaka rešetka je stabilizirana podupiračima. U središtu željezničke hale, lučne rešetke su zamijenjene konzolnim rešetkama, otvarajući nadstrešnicu prema nebu. [31]



Slika 61. Stajalište

Svi elementi su projektirani da izdrže ekstremno hladne i snježne zime. Krov je projektiran na opterećenje snijegom od 30 lbm/m², a opterećenje vjetrom od 90 mph. [32]

Ovaj projekt predstavlja poseban značaj u vidu snage urbanog razvoja i moderne arhitekture s utjecajem na razvoj prometne infrastrukture, ali idalje u skladu sa znamenitom povijesnom podlogom.



Slika 62. Denver Union Station

9. ZAKLJUČAK

Viseće konstrukcije su posebno privlačni i jedinstveni oblici, kojima je moguće stvarati impresivne i vizualno atraktivne građevine. Njihova je primjena danas široka i raznovrsna, a početak primjene seže daleko u prošlost, počevši od jednostavnih šatora koja su nomadska plemena koristila za zaštitu od nepovoljnih vremenskih uvjeta.

Mogu se podijeliti na linearne vlačne konstrukcije, trodimenzionalne vlačne konstrukcije i površinski napregnute vlačne konstrukcije. Viseći mostovi su linearne vlačne konstrukcije, a viseći krovovi površinski napregnute vlačne konstrukcije. Krovovi su lagani, čvrsti i estetski vrlo atraktivni, što ih čini sve popularnijim odabirom za različite građevine. Viseći mostovi se koriste za svladavanje najvećih raspona, iako imaju određene nedostatke u vidu pojave vibracija uslijed djelovanja opterećenja. Postoje različiti oblici visećih konstrukcija, što im dodatno daje široku lepezu primjene.

U fazi projektiranja visećih konstrukcija potrebna je suradnja arhitekata, projektanata konstrukcije, izvođača i proizvođača materijala kako bi se na samom početku postigao dosta dobar rezultat. Projektiranje ovakvih konstrukcija zahtjeva složeniji pristup uključujući nalaženje oblika, koji osigurava stanje ravnoteže te proračun konstrukcije uzimajući u obzir vanjska djelovanja.

Materijali koji se koriste za izvedbu visećih konstrukcija, poput čelika i platna s premazima kao što su PVC, PTFE i ETFE membrane imaju važnu ulogu u osiguranju njihove trajnosti, nosivosti i estetskog izgleda. Svaki materijal ima svoje prednosti i nedostatke te je stoga važno odabrati onaj koji najbolje odgovara postojećim zahtjevima i okolnostima projekta.

Montažna izvedba omogućuje brzo izvođenje uz minimalnu upotrebu skele i bez ometanja aktivnosti koje se odvijaju u okolini građevine. Osim brze izvedbe postoje i mnoge druge prednosti visećih konstrukcija kao što su mogućnost svladavanja velikih raspona, mala vlastita težina uz veliku nosivost, otpornost na vanjske utjecaje, prozirnost materijala te velika mogućnost oblikovanja.

Na koncu, viseće su konstrukcije spektakularan spoj umjetnosti i tehnike te funkcionalnosti i estetike s mnoštvom prednosti, koje će u budućnosti dovesti do još inovativnijih rješenja na području graditeljstva.

LITERATURA

- [1] https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Fabric_structures [10. srpnja 2023.]
- [2] K. Fresl, Građevna statika 2., Predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, <http://www.grad.hr/nastava/gS/gS2/gS2.pdf> [10. srpnja 2023.]
- [3] S. Nasir Abbas, Z. Imran, M. A. Khizar, K. Muneeb, H. Raza, Introduction of cable structures and their real-life examples with sketches, University of Sargodha, Sargodha, Pakistan, <http://www.sci-int.com/pdf/637587572637759454.edited.pdf> [10. srpnja 2023.]
- [4] D. Dujmović, Metalne konstrukcije 3, Separat 4: Viseće konstrukcije, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, <https://dokumen.tips/documents/04-visece-konstrukcije-separat-14-15.html?page=1> [10. srpnja 2023.]
- [5] <https://constrofacilitator.com/different-types-and-shapes-of-tensile-membrane-structures/> [11. srpnja 2023.]
- [6] <https://www.assemblyspecialty.com/guide-to-wire-rope/applications/roof-structures/> [11. srpnja 2023.]
- [7] I. G. Quelle, Cable Roofs. Evolution. Classification and Future Trends., Universidad Politencnica de Valencia, Spain, 2009.
https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/6505/PAP_GONZALEZ_264.pdf?sequence=1&isAllowed=y [11. srpnja 2023.]
- [8] J. Radić, Uvod u mostarstvo, Hrvatska sveučilišna naklada, 2009.
- [9] Z. Šavor, G. Puž, Veliki mostovi New Yorka i njihovi graditelji, GRAĐEVINAR, 53 (2001) <https://hrcak.srce.hr/file/18631> [11. srpnja 2023.]
- [10] Skripta Mostovi, Sveučilište u Splitu, Građevinsko – arhitektonski fakultet, <https://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Betonske%20konstrukcije/SSG%20Mostovi/Skripta%20Mostovi.pdf> [11. srpnja 2023.]
- [11] M. Mollaert, Membrane structures: understanding their forms., Department of Architecture Vrije Universiteit Brussel, https://www.academia.edu/25858675/Membrane_structures_understanding_their_forms
[Membrane_structures_understanding_their_forms](https://www.academia.edu/25858675/Membrane_structures_understanding_their_forms) [12. srpnja 2023.]
- [12] E. Šamec, M. Baniček, Posebnosti projektiranja membranskih konstrukcija, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, http://www.grad.hr/zt2017/docs/proceedings/08_ZT2017.pdf [12. srpnja 2023.]
- [13] S. Zexin, H. Mei, Robotic Form-Finding and Construction Based on the Architectural Projection Logic, 2nd International Conference on Civil Engineering and Materials Science, 2017.

- [https://www.researchgate.net/publication/318103333 Robotic Form-Finding and Construction Based on the Architectural Projection Logic](https://www.researchgate.net/publication/318103333_Robotic_Form-Finding_and_Construction_Based_on_the_Architectural_Projection_Logic) [12. srpnja 2023.]
- [14] P. Gidak, Primjena metode gustoće sila na oblikovanje prednapetih mreža, magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2011.
<https://bib.irb.hr/datoteka/534406.magisterij-Gidak.pdf> [12. srpnja 2023.]
- [15] J. Vukadin, Konstrukcije od platna, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2021., <https://repozitorij.grad.unizg.hr/islandora/object/grad:781> [12. srpnja 2023.]
- [16] N. Freiherrova, M. Krejsa, Membrane structures and their use in civil engineering, Faculty of Civil Engineering, VSB- Technical University of Ostrava, 2018., [https://www.researchgate.net/publication/332419394 Membrane Structures and Their Use in Civil Engineering](https://www.researchgate.net/publication/332419394_Membrane_Structures_and_Their_Use_in_Civil_Engineering) [13. srpnja 2023.]
- [17] D. Stamać, Konstrukcije od užadi, završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2018., <https://www.grad.hr/nastava/gz/sr/pku-ds.pdf> [14. srpnja 2023.]
- [18] R. Vrančić, Iteracijska primjena metode gustoća sila u oblikovanju konstrukcija od užadi, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2014.
[https://www.researchgate.net/publication/282848291 Iteracijska primjena metode gustoće sila u oblikovanju konstrukcija od užadi](https://www.researchgate.net/publication/282848291_Iteracijska_primjena_metode_gustoce_sila_u_oblikovanju_konstrukcija_od_uzadi) [15. srpnja 2023.]
- [19] <https://www.makmax.com.au/fabrics/ptfe/> [15. srpnja 2023.]
- [20] <https://ets-na.com/ets-materials/etfe-film/> [15. srpnja 2023.]
- [21] <https://www.skyshade.in/2021/05/benefits-of-tensile-structures/> [17. srpnja 2023.]
- [22] <https://boskalis.com/about-us/projects/1915-canakkale-bridge> [21. srpnja 2023.]
- [23] <https://www.stirworld.com/see-features-in-conversation-with-cowi-on-the-record-breaking-1915-canakkale-bridge-in-turkey> [21. srpnja 2023.]
- [24] <https://www.theb1m.com/video/turkey-has-built-the-worlds-longest-suspension-bridge> [21. srpnja 2023.]
- [25] <https://theconstructor.org/structures/bridges/1915-canakkale-bridge/563411/> [21. srpnja 2023.]
- [26] <https://www.mgsarchitecture.in/building-materials-products/roofing/48-the-worlds-tallest-tensile-structure.html> [22. srpnja 2023.]
- [27] <https://www.dezeen.com/2010/07/06/the-khan-shatyr-entertainment-centre-by-foster-partners/> [22. srpnja 2023.]
- [28] https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Khan_Shatyr_Entertainment_Centre#Construction [22. srpnja 2023.]

- [29] https://www.inform.kz/en/khan-shatyr-how-it-was-made_a3271616 [22. srpnja 2023.]
- [30] <https://www.rtd-denver.com/projects/union-station-tod-project> [24. srpnja 2023.]
- [31] <https://www.som.com/projects/denver-union-station-hub-transit-oriented-development/> [24. srpnja 2023.]
- [32] <https://fabricarchitecturemag.com/2014/12/01/tensile-fabric-structure-transforms-denver-union-station/> [24. srpnja 2023.]

POPIS SLIKA

Slika 1. Skysong, Scottsdale, AZ, SAD.....	1
[Mrežno]. Available: https://ets-na.com/portfolio/asu-skysong-innovation-center/ [16. srpnja 2023.]	
Slika 2. Indijanski šator Teepee	2
[Mrežno]. Available: https://pixabay.com/photos/tipi-tent-teepee-wigwam-clouds-2000996/ [16. srpnja 2023.]	
Slika 3. Most od bambusa.....	2
[Mrežno]. Available: https://www.guaduabamboo.com/blog/bamboo-cables [16. srpnja 2023.]	
Slika 4. Most Menai, Sjeverni Wales	3
[Mrežno]. Available: https://www.bbc.com/news/uk-wales-63971625 [16. srpnja 2023.]	
Slika 5. Olimpijski stadion, München	3
[Mrežno]. Available: https://pixabay.com/photos/olympic-stadium-munich-stadium-565522/ [16. srpnja 2023.]	
Slika 6. Krovna konstrukcija, Olimpijski stadion, München.....	3
[Mrežno]. Available: https://pf.bbwnetwork.com/installation14A.html [16. srpnja 2023.]	
Slika 7. Krovna konstrukcija od napete tkanine	4
[Mrežno]. Available: https://www.pinterest.com/pin/40180621662742985/ [16. srpnja 2023.]	
Slika 8. Krovna konstrukcija poduprta zrakom	5
[Mrežno]. Available: https://dbs-engineering.com/news/extraordinary-air-supported-structure-in-center-of-helsinki/ [16. srpnja 2023.]	
Slika 9. Osnovni dijelovi visećeg mosta	5
Anđelko Vlašić, Mostovi, Predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb 2023.	
Slika 10. Pravi viseći most.....	6
Anđelko Vlašić, Mostovi, Predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb 2023.	
Slika 11. Nepravi viseći most	6
Anđelko Vlašić, Mostovi, Predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb 2023.	
Slika 12. Rušenje Tacoma mosta, SAD	6
[Mrežno]. Available: https://www.asce.org/publications-and-news/civil-engineering-source/article/2021/04/05/5-things-you-didnt-know-about-the-tacoma-narrows-bridge [16. srpnja 2023.]	
Slika 13. Çanakkale most, Turska	7
[Mrežno]. Available: https://www.luxurytraveladvisor.com/destinations/longest-suspension-bridge-world-opens-turkey [16. srpnja 2023.]	
Slika 14. Oblik stošca	8
[Mrežno]. Available: https://www.pinterest.com/pin/690035974130986303/ [17. srpnja 2023.]	
Slika 15. Primjer izvedene konstrukcije stožastog oblika	8
[Mrežno]. Available: https://www.hani.co.kr/arti/PRINT/803091.html [17. srpnja 2023.]	
Slika 16. Primjer izvedene konstrukcije složenog stožastog oblika	8
[Mrežno]. Available: https://www.archdaily.com/30880/rosa-parks-transit-center-ftl-design-engineering-studio [17. srpnja 2023.]	
Slika 17. Oblik sedla fiksiran između krajnjih točaka	9
[Mrežno]. Available: https://www.pinterest.com/pin/690035974130986303/ [17. srpnja 2023.]	
Slika 18. Oblik sedla fiksiran između lukova	9
[Mrežno]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Fig-11-Diagram-of-the-North-Carolina-State-Fair-Arena_fig1_305407889 [17. srpnja 2023.]	
Slika 19. Primjeri izvedenih konstrukcija sedlastog oblika.....	9
[Mrežno]. Available: https://www.pinterest.com/pin/380272762258099943/ , https://www.pinterest.com/pin/299700550174002149/ [17. srpnja 2023.]	
Slika 20. Oblik luka	10
[Mrežno]. Available: https://www.pinterest.com/pin/690035974130986303/ [17. srpnja 2023.]	
Slika 21. Primjer izvedene konstrukcije lučnog oblika	10

[Mrežno].Avaliable: https://www.bostonmagazine.com/news/2021/04/15/seaport-pavilion-concert-venue/ [17. srpnja 2023.]	
Slika 22. Primjer izvedene konstrukcije s paralelnim lukovima	10
[Mrežno].Avaliable: https://samynandpartners.com/portfolio/222-mg-ricerche/ [17. srpnja 2023.]	
Slika 23. Membranska mreža.....	11
[Mrežno].Avaliable: https://www.pinterest.com/pin/690035974130986303/ [17. srpnja 2023.]	
Slika 24. Primjer izvedene konstrukcije s membranskim mrežama	11
[Mrežno].Avaliable: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Cable_net_structure [17. srpnja 2023.]	
Slika 25. Fizikalni model od sapunice	12
[Mrežno].Avaliable: https://www.archdaily.com/610531/frei-otto-and-the-importance-of-experimentation-in-architecture [17. srpnja 2023.]	
Slika 26. Fizikalni model od tkanine	12
[Mrežno].Avaliable: https://www.dezeen.com/2023/01/27/architecture-student-projects-physical-models-dezeen-schoolshows/ [17. srpnja 2023.]	
Slika 27. Čelično uže	13
[Mrežno].Avaliable: https://abarelto.hr/articles-zanimljivosti.html [17. srpnja 2023.]	
Slika 28. Unutarnji sastav tkanine	14
[Mrežno].Avaliable: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Coating [17. srpnja 2023.]	
Slika 29. Tipovi spojeva u visećim konstrukcijama	14
Darko Dujmović, Metalne konstrukcije 3, Separat 4: Viseće konstrukcije, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet [17. srpnja 2023.]	
Slika 30. Nastavci	14
Darko Dujmović, Metalne konstrukcije 3, Separat 4: Viseće konstrukcije, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet [17. srpnja 2023.]	
Slika 31. Sedla	15
Darko Dujmović, Metalne konstrukcije 3, Separat 4: Viseće konstrukcije, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet [17. srpnja 2023.]	
Slika 32. Sidra.....	15
Darko Dujmović, Metalne konstrukcije 3, Separat 4: Viseće konstrukcije, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet [17. srpnja 2023.]	
Slika 33. Spoj dvosmjernog sustava kablova.....	15
Krešimir Fresl, Građevna statika 2, Predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb 2017., http://www.grad.hr/nastava/g2/g2.pdf [17. srpnja 2023.]	
Slika 34. Spoj dvosmjernog sustava s dvama paralelnim užetima	15
Krešimir Fresl, Građevna statika 2, Predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb 2017., http://www.grad.hr/nastava/g2/g2.pdf [17. srpnja 2023.]	
Slika 35. Spoj s rubnim užetom	16
Krešimir Fresl, Građevna statika 2, Predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb 2017., http://www.grad.hr/nastava/g2/g2.pdf [17. srpnja 2023.]	
Slika 36. Spoj užeta s čeličnim stupom	16
Krešimir Fresl, Građevna statika 2, Predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb 2017., http://www.grad.hr/nastava/g2/g2.pdf [17. srpnja 2023.]	
Slika 37. Spoj užeta s betonskim stupom	16
Krešimir Fresl, Građevna statika 2, Predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb 2017., http://www.grad.hr/nastava/g2/g2.pdf [17. srpnja 2023.]	
Slika 38. Keder tračnice u pomoćnom profilu za linijsko sidrenje.....	16
Nela Freijerova, Martin Krejsa, Membrane structures and their use in civil engineering, Technical University of Ostrava, siječanj 2019. [17. srpnja 2023.]	
Slika 39. Keder tračnice za točkasto sidrenje	17
Nela Freijerova, Martin Krejsa, Membrane structures and their use in civil engineering, Technical University of Ostrava, siječanj 2019. [17. srpnja 2023.]	

Slika 40. Spoj membrane s rubnim elementima	17
Nela Freijerova, Martin Krejsa, Membrane structures and their use in civil engineering, Technical University of Ostrava, siječanj 2019. [17. srpnja 2023.]	
Slika 41. Spiralna čelična užad	18
[Mrežno].Avaliable: https://www.researchgate.net/figure/Rope-assemblies-3D-figures-published-by-courtesy-of-Fatzer-AG-a-spiral-strand-rope_fig1_353073551 [18. srpnja 2023.]	
Slika 42. Užad unutar kružnog omotača	19
[Mrežno].Avaliable: https://www.researchgate.net/figure/Rope-assemblies-3D-figures-published-by-courtesy-of-Fatzer-AG-a-spiral-strand-rope_fig1_353073551 [18. srpnja 2023.]	
Slika 43. Žičana užad	19
[Mrežno].Avaliable: https://www.researchgate.net/figure/Rope-assemblies-3D-figures-published-by-courtesy-of-Fatzer-AG-a-spiral-strand-rope_fig1_353073551 [18. srpnja 2023.]	
Slika 44. Primjeri konstrukcija od PVC-a	20
[Mrežno].Avaliable: https://www.austinchronicle.com/daily/news/2023-06-01/austin-airport-agrees-to-a-massive-settlement-to-get-its-expansion-underway/ , https://www.bdir.com/product/inverted-umbrella-tensile-structure-shade-sail-canopy-and-awning [19. srpnja 2023.]	
Slika 45. Primjeri konstrukcija s PTFE-om	21
[Mrežno].Avaliable: https://www.tzg.com.au/project/blaxland-riverside-playground-kiosk/ , https://www.france-voyage.com/tourism/centre-pompidou-metz-2574.htm [19. srpnja 2023.]	
Slika 46. Primjer konstrukcije od ETFE-a.....	21
[Mrežno].Avaliable: https://www.bdir.com/product/water-cube-the-worlds-largest-etfe-application-project , https://www.bdir.com/product/yujiapu-railway-station-etfe-cushions-tensile-roof-membrane-structure [19. srpnja 2023.]	
Slika 47. Primjer montaže visećeg mosta	22
Boskalis,Project sheet, https://boskalis.com/media/fljkbaj3/170220_canakkale_bridge.pdf [20. srpnja 2023.]	
Slika 48. Prikaz osnovnih prednosti visećih konstrukcija	23
Autorski rad [20. srpnja 2023.]	
Slika 49. Geografski položaj mosta	24
[Mrežno].Avaliable: https://www.1915canakkale.com/en-us/corporate/project-information [21. srpnja 2023.]	
Slika 50. Prikaz prometnice na mostu	24
[Mrežno].Avaliable: https://theconstructor.org/structures/bridges/1915-canakkale-bridge/563411/ [21. srpnja 2023.]	
Slika 51. Temelji mosta	25
[Mrežno].Avaliable: https://www.theblm.com/video/turkey-has-built-the-worlds-longest-suspension-bridge [21. srpnja 2023.]	
Slika 52. Početak izvedbe mosta.....	25
[Mrežno].Avaliable: https://www.theblm.com/video/turkey-has-built-the-worlds-longest-suspension-bridge [21. srpnja 2023.]	
Slika 53. Izvedba kolničke konstrukcije	26
[Mrežno].Avaliable: https://www.stirworld.com/see-features-in-conversation-with-cowi-on-the-record-breaking-1915-canakkale-bridge-in-turkey [21. srpnja 2023.]	
Slika 54. 1915 Çanakkale most.....	26
[Mrežno].Avaliable: https://www.webuildvalue.com/en/infrastructure/cannakkale-bridge-turkey.html [21. srpnja 2023.]	
Slika 55. Presjek i tlocrt građevine	27
[Mrežno].Avaliable: https://www.mgsarchitecture.in/building-materials-products/roofing/48-the-world-s-tallest-tensile-structure.html [22. srpnja 2023.]	
Slika 56. Izgled konstrukcije	28
[Mrežno].Avaliable: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Khan_Shatyr_Entertainment_Centre [22.	

srpnja 2023.]	
Slika 57. Prozirna membrana Khan Shatyra	28
[Mrežno].Avaliable: https://arquitecturaviva.com/works/centro-de-ocio-khan-shatyry-astana-7 [22. srpnja 2023.]	
Slika 58. Khan Shatyr	29
[Mrežno].Avaliable: https://www.burohappold.com/projects/khan-shatyr-entertainment-centre/# [22. srpnja 2023.]	
Slika 59. Geografski položaj	30
[Mrežno].Avaliable: https://www.rtd-denver.com/projects/union-station-tod-project [22. srpnja 2023.]	
Slika 60. Ulaz u podzemnu autobusnu stanicu	30
[Mrežno].Avaliable: https://www.som.com/projects/denver-union-station-hub-transit-oriented-development/ [22. srpnja 2023.]	
Slika 61. Stajalište	31
[Mrežno].Avaliable: https://www.rtd-denver.com/projects/union-station-tod-project [22. srpnja 2023.]	
Slika 62. Denver Union Station	31
[Mrežno].Avaliable: https://www.som.com/projects/denver-union-station-hub-transit-oriented-development/ [22. srpnja 2023.]	