

# PROSTOR

# 20 [2012] 1 [43]

ZNANSTVENI ČASOPIS ZA ARHITEKTURU I URBANIZAM  
A SCHOLARLY JOURNAL OF ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

POSEBNI OTISAK / SEPARAT | OFFPRINT

ZNANSTVENI PRILOZI | SCIENTIFIC PAPERS

198-209 **DAVOR SKEJIĆ**  
**BORIS ANDROIĆ**  
**DUBRAVKO BAČIĆ**

*TENSEGRITY* KONSTRUKCIJE  
INOVATIVNI SUSTAVI LAGANIH KONSTRUKCIJA

PREGLEDNI ZNANSTVENI ČLANAK  
UDK 624:692

*TENSEGRITY* STRUCTURES  
INNOVATIVE LIGHT STRUCTURAL SYSTEMS

SUBJECT REVIEW  
UDC 624:692

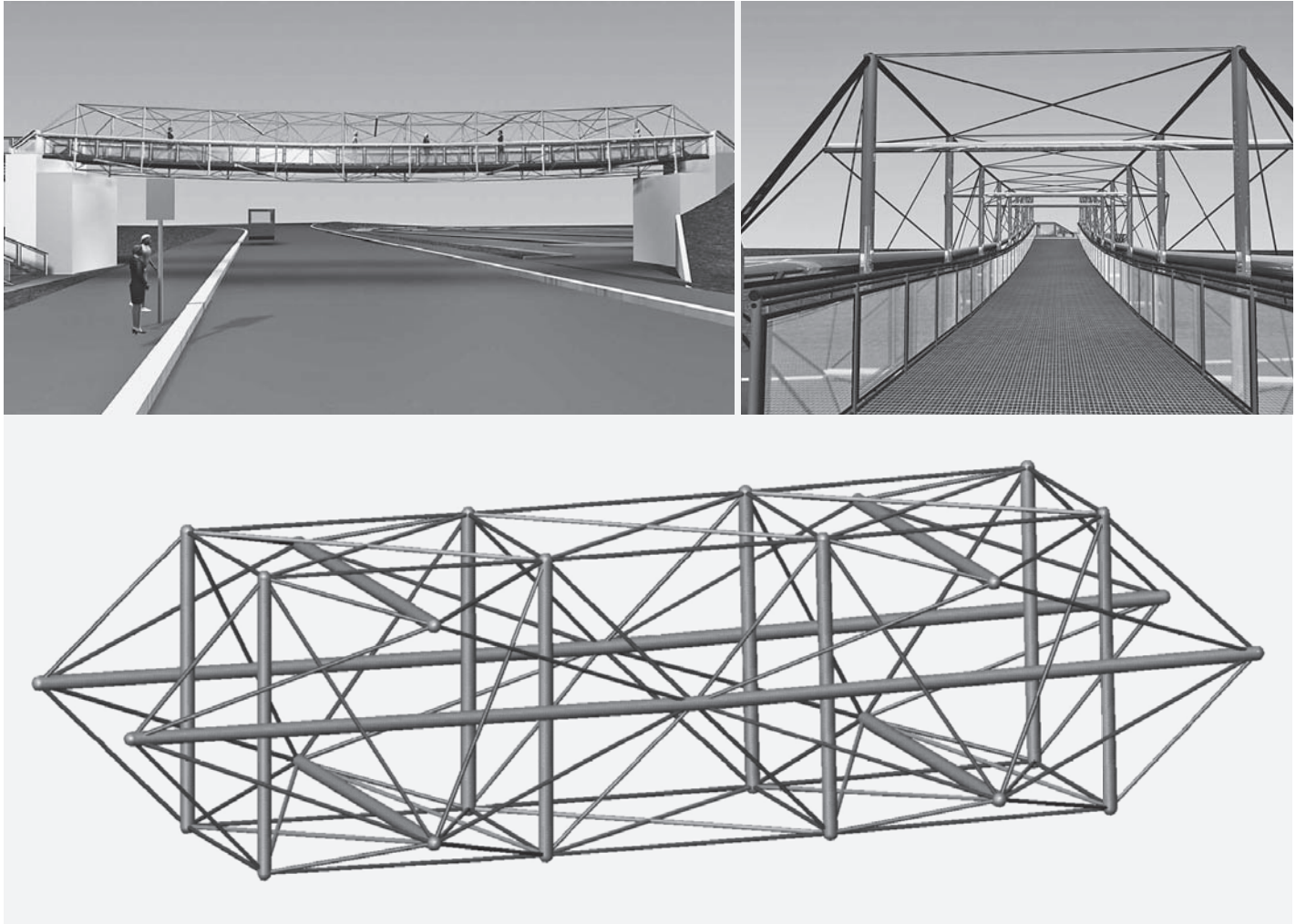
SVEUČILIŠTE  
U ZAGREBU,  
ARHITEKTONSKI  
FAKULTET  
UNIVERSITY  
OF ZAGREB,  
FACULTY  
OF ARCHITECTURE

ISSN 1330-0652  
CODEN PORREV  
UDK | UDC 71/72  
20[2012] 1[43]  
1-218  
1-6 [2012]



# Af





SL. 1. A. MICHELETTI: PROJEKT PJEŠAČKOG MOSTA, RIM, 2005.

FIG. 1. A. MICHELETTI: PEDESTRIAN BRIDGE PROJECT, ROME, 2005.

## DAVOR SKEJIĆ<sup>1</sup>, BORIS ANDROIĆ<sup>2</sup>, DUBRAVKO BAČIĆ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> SVEUČILISTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET  
HR – 10000 ZAGREB, KAČIĆEVA 26

<sup>2</sup> I.A. PROJEKTIRANJE D.O.O.  
HR – 10000 ZAGREB, I. BARUTANSKI BREG 4

<sup>3</sup> SVEUČILISTE U ZAGREBU  
ARHITEKTONSKI FAKULTET  
HR – 10000 ZAGREB, KAČIĆEVA 26

PREGLEDNI ZNAJSTVENI ČLANAK

UDK 624:692

TEHNIČKE ZNAJSTVI / ARHITEKTURA I URBANIZAM

2.01.03. – ARHITEKTONSKE KONSTRUKCIJE, FIZIKA ZGRADE, MATERIJALI  
I TEHNOLOGIJA GRAĐENJA

TEHNIČKE ZNAJSTVI / GRAĐEVINARSTVO

2.05.02. – NOSIVE KONSTRUKCIJE

ČLANAK PRIMLJEN / PRIHVACEN: 24. 4. 2012. / 14. 6. 2012.

<sup>1</sup> UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
HR – 10000 ZAGREB, KAČIĆEVA 26

<sup>2</sup> I.A. PROJEKTIRANJE D.O.O.  
HR – 10000 ZAGREB, I. BARUTANSKI BREG 4

<sup>3</sup> UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF ARCHITECTURE  
HR – 10000 ZAGREB, KAČIĆEVA 26

SUBJECT REVIEW

UDC 624:692

TECHNICAL SCIENCES / ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

2.01.03. – ARCHITECTURAL STRUCTURES, BUILDING PHYSICS, MATERIALS  
AND BUILDING TECHNOLOGY

TECHNICAL SCIENCES / CIVIL ENGINEERING

2.05.02. – STRUCTURAL SYSTEMS

ARTICLE RECEIVED / ACCEPTED: 24. 4. 2012. / 14. 6. 2012.

## TENSEGRITY KONSTRUKCIJE INOVATIVNI SUSTAVI LAGANIH KONSTRUKCIJA

## TENSEGRITY STRUCTURES INNOVATIVE LIGHT STRUCTURAL SYSTEMS

INOVACIJA  
INTEGRALNO NAPETA KONSTRUKCIJA  
IZNALAŽENJE OBLIKA  
SKULPTURA  
TENSEGRITY

INNOVATION  
INTEGRALLY STRAINED STRUCTURE  
FORM-FINDING  
SCULPTURE  
TENSEGRITY

Članak obrađuje posebnu vrstu inovativnih laganih konstrukcija koje se obično nazivaju *tensegrity*. U radu se prikazuje njihov povijesni razvoj, sažetak projektantskih problema, a analizirani su i primjeri izvedenih konstrukcija. Posebnost je tih konstrukcija u tome što od početka projektiranja zahtijevaju suradnju arhitekata i inženjera. Poznavanje projektantskih, a posebno proračunskih načela oblikovanja *tensegrity* konstrukcija, zasigurno će pridonijeti i značajnijoj primjeni ovoga tipa laganih konstrukcija u budućnosti.

This paper presents a special type of innovative light structural systems under the name of *tensegrity*. The paper looks into their history, gives a summary of design issues and analyzes some examples of its practical application. These structures require a close cooperation between an architect and a structural engineer from the very beginning. Knowledge of design and in particular of structural principles will certainly contribute to its wider applicability in the future.

## UVOD

### INTRODUCTION

Posljednjih godina intenzivno se razvijaju lagane konstrukcije različitih vrsta: nategnute konstrukcije od uzadi i tkanine, *tensegrity* konstrukcije, geodetske kupole, napuhane konstrukcije, *tensairty* konstrukcije,<sup>1</sup> 'razgrnate' konstrukcije, šatoraste konstrukcije itd. Neki tipovi laganih konstrukcija poznati su od davnina (satori, pješacki viseći mostovi), dok su se drugi pojavili tek u novije doba. Suvremeni razvoj laganih konstrukcija omogućen je napretkom teorije konstrukcija, razvojem elektroničkih računala i proizvodnjom različitih materijala izvrsnih svojstava od kojih se te konstrukcije izrađuju i kojima se pokrивaju. Najčešće su to nosivi sustavi velikih raspona, a primjenjuju se kao krovne konstrukcije, mostovi ili pročeljne konstrukcije.

*Tensegrity* sustav relativno je nov konstrukcijski sustav koji omogućava stvaranje začudnih, laganih i prilagodljivih struktura, ostavljajući dojam nakupine štapova koji lebde u zraku. Ovi su nosivi sustavi poznati pod različitim nazivima: integralno napeti sustavi, samouravnotežujući sustavi, samonaprežujuće mreže, kritični i prekrokritični sustavi mrežastog oblika (ovisno o raznolikosti pristupa ovoj problematici). Nosiva funkcija ovakvih sustava ostvaruje se vezivanjem konstitutivnih elemenata vlačnim silama u cjelinu. Otuda i naziv *tensegrity* sustavi. Naime izraz *tensegrity* nastao je sažimanjem engleskog izraza *tensional integrity*.

*Tensegrity* konstrukcija izuzetan je primjer konstrukcijske virtuoznosti i domišljatosti, a

prvi se put opredmetila sredinom 20. stoljeća kao skulptorski artefakt umjetnika Kennetha Snelsona.<sup>2</sup> Poslije će ova vrsta konstrukcije postići svjetsku popularnost zahvaljujući ponajprije Snelsonovu učitelju, glasovitome Buckminsteru Fulleru.<sup>3</sup>

Pri projektiranju nosivih sustava velikih raspona jedan je od bitnih ciljeva ušteda na vlastitoj težini. Stoga su razvijeni osebujni nosivi sustavi kod kojih je smanjenje vlastite težine postignuto redukcijom broja tlačnih štapova, a nosiva konstrukcija stabilizirana je uvođenjem sustava samouravnotežujućeg napona ostvarenog pomoću kablova (vlačni elementi) i štapova (tlačni elementi). Takvi se nosivi sustavi mogu definirati kao sustavi kojih je krutost rezultat, odnosno posljedica, samonaprežujućega ravnotežnog stanja između vlačnih kablova i tlačnih elemenata, a neovisna je o vanjskom djelovanju. Samonaprežanje koje ostvaruje njihovu krutost neovisno je o bilo kakvim uređajima kojima se inače postiže uravnoteženje naprežanja. Zbog male vlastite težine (uobičajeno 0,15-0,20 kN/m<sup>2</sup>) samonaprežujuće su konstrukcije pogodne za brzu montažu i demontažu uz minimalan utrošak energije.

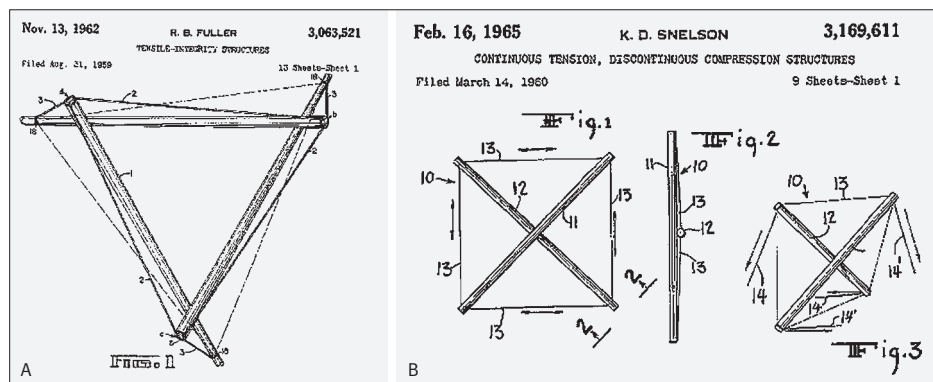
Ovi prostorni nosivi sustavi razvijeni su iz osnovnih modula kojih su sastavni dijelovi kablovi i štapovi. Geometrijski oblik cijeloga prostornog sustava ostvaruje se periodičnom kombinacijom elementarnih modula. Pojedini oblici *tensegrity* konstrukcija podsjećaju na već poznate konstrukcije, rešetke i roštilje, uz drukčiji princip toka sila i prostorne postojanosti. Posljednjih godina izvode se građevine kod kojih je krovna nosiva konstrukcija slična rešetkastomu nosaču (tzv. Geigerove kupole, od kojih najveća dosad izvedena ima raspon 210 m).

Osebujnost *tensegrity* konstrukcija očituje se u složenoj geometriji i funkciji nosivosti, a rezultira specifičnim mehaničkim ponašanjem

<sup>1</sup> *Tensairty*<sup>®</sup> je nov koncept laganih konstrukcija utemeljen na ideji napuhanoga zračnog nosača i dodatnih ukrućenja ili kablova kojima se dobivaju mehaničke (konstrukcijske) prednosti, a to u konačnici rezultira izuzetno malom vlastitom težinom konstrukcije.

<sup>2</sup> Kenneth Snelson, rođen 1927. godine u Pendletonu, Oregon, SAD. Studirao na University of Oregon, Eugene, Or.; Black Mountain College, Black Mountain, N.C.; Chicago Institute of Design, Chicago, IL.; usavršavao se kod Fernanda Legera u Parizu. Izlagao je na gotovo 30-ak samostalnih i sudjelovao na isto toliko grupnih izložbi. Autor je nekoliko stručnih tekstova i patenata te dobitnik brojnih prestižnih nagrada za svoj umjetnički rad. Njegova su djela u kolekcijama nekih od najvažnijih svjetskih muzeja.

<sup>3</sup> R. Buckminster Fuller (1895.-1983.), američki inženjer, arhitekt, dizajner, filozof, izumitelj i pisac. Znameniti vizionar i futurolog, Fuller je autor 30-ak knjiga u kojima je popularizirao svoje izume i ideje, a registrirao je i 28 patenata. Fuller je izumio i razvio mnoge koncepte te pomogao unaprijediti neke već poznate. Iako mnogi njegovi izumi nisu bili prihvaćeni od javnosti ili industrije, procjenjuje se da je do danas izgrađeno više od pola milijuna geodetskih



koje ih razlikuje od uobičajenih prostornih sustava:

- Unosenjem dovoljnog prednapona u tlačnom štapu, predznak sila u štapovima (vlak ili tlak) konstantan je bez obzira na vanjsku akciju koja djeluje u čvorovima ovog sustava.
- Krutost ovakvih konstrukcija raste s vrijednošću prednapreznja tlačnog elementa. Prednapon je ostvaren unutarnjim vlakom tlačnih elemenata i unutarnjim tlakom tlačnih elemenata, a postupak se odvija bez uključivanja ležajeva nosivog sustava.
- Male dimenzije ležajeva, odnosno temelja, posljedica su osnovnog načela *tensegrity* konstrukcija – ujednačavanje unutarnjih sila, pa se i vlačne sile zadržavaju unutar konstrukcije.

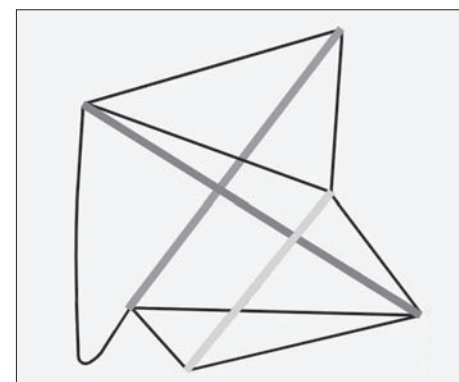
## OD SKULPTURE DO KONSTRUKCIJE FROM SCULPTURE TO STRUCTURE

• **Povijesni razvoj** – Tri se osobe smatraju izumiteljima *tensegrity* sustava: R. Buckminster Fuller (izum patentirao 13. listopada 1962.; Sl. 2.a), David Georges Emmerich (izum patentirao 28. rujna 1964.) i Kenneth D. Snelson (izum patentirao 16. veljače 1965.; Sl. 2.

b). Ipak, Emmerich navodi da je prvi prototip *tensegrity* sustava izgradio Karl loganson<sup>4</sup> još 1920. godine (Sl. 3.).<sup>5</sup> Konstrukcija se zvala *Gleichgewichtkonstruktion*, a sastojala se od tri šipke, sedam uzadi i osam kablova bez vlačne sile, koji su služili za mijenjanje konfiguracije sustava, ali i za održavanje ravnoteže. Zbog nedostatka sile prednapinjanja, koja je jedna od ključnih karakteristika *tensegrity* sustava, ovu konstrukciju ipak se ne može smatrati prvom *tensegrity* konstrukcijom.

Više od 30 godina trajala je rasprava između B. Fullera i K. Snelsona. Karizmatični Fuller bio je arhitekt, inženjer, matematičar, kozmolog, pjesnik i izumitelj, a u ljeto 1948. godine postao je profesor na Black Mountain College (North Carolina, SAD). Snelson je studirao umjetnost na istome učilištu i pohadao Fullerova predavanja o geometrijskim modelima. Pod utjecajem Fullera i ostalih nastavnika Snelson je počeo studirati trodimenzionalne modele i kreirati različite skulpture. Kako je sam poslije izjavio, izradio je nov tip skulpture.<sup>6</sup> Među tim skulptorskim prvijenima nalazila se i prva projektirana *tensegrity* konstrukcija. Kad je Snelson novonastalu strukturu pokazao svome profesoru, Fuller je shvatio da je to odgovor koji je dugo tražio. Poslije je Fuller izjavio: „Vec dvadeset jednu godinu, prije negoli sam upoznao Kennetha Snelsona, proučavao sam *tensegrity* koncept. Unatoč mojim otkrićima i istraživanju kako multidimenzionalne vektorske geometrije, tako i trodimenzionalne *tensegrity* konstrukcije nisam bio sposoban integrirati ih, a kamoli otkriti multidimenzionalnu 4, 5 i 6-osno simetričnu *tensegrity* strukturu.”<sup>7</sup>

Istovremeno i neovisno o prethodnoj dvojici, David Georges Emmerich počeo je proučavati različite tipove konstrukcija, kao što su napregnute prizme i nešto složeniji *tensegrity* sustavi (Sl. 4.).<sup>8</sup> Pretpostavlja se da je bio inspiriran logansonovom skulpturom, a svoje sustave naziva „vlačnim i samonaprežućim konstrukcijama”.<sup>9</sup> Emmerich je patentirao rezultate svojih istraživanja, a njegove konstrukcije bile su jednake onima Fullera i Snelsona.



SL. 2. PATENTI OSNOVNIH MODULA *TENSEGRITY* KONSTRUKCIJA: A – FULLEROV PATENT, B – SNELSONOV PATENT

FIG. 2. PATENTS OF BASIC MODULES OF *TENSEGRITY* STRUCTURES: A – FULLER'S PATENT, B – SNELSON'S PATENT

SL. 3. K. LOGANSON: 'SKULPTURNA KONSTRUKCIJA'  
FIG. 3. K. LOGANSON: "SCULPTURAL STRUCTURE"

SL. 4. D. G. EMMERICH: Z3-1 MAT PRISMATIQUE 4B RACEMIQUE

FIG. 4. D.G. EMMERICH: Z3-1 MAT PRISMATIQUE 4B RACEMIQUE



kupola, od kojih se mnoge koriste. Najpoznatiji je Fullerov projekt *Dymaxion* (kuća i auto).

<sup>4</sup> Karl loganson (u latvijskom obliku također Karlis Johansons, 1890.-1929.), ruski umjetnik latvijskog podrijetla. Od 1914. g. član latvijske umjetničke grupe *Zeleni cvjetici*, a od 1919. boravi u Moskvi gdje se pridružuje konstruktivističkim umjetničkim krugovima. Zalazuci se za prevladavanje suprotnosti između umjetnosti i industrijske proizvodnje, od 1923. do 1926. g. radio je u tvorničkom postrojenju kao voditelj proizvodnje. Svoju 'samostabilizirajuću konstrukciju' prvi je put javno izložio 1922. na 2. izložbi *Društva mladih umjetnika*.

<sup>5</sup> EMMERICH, 1988.

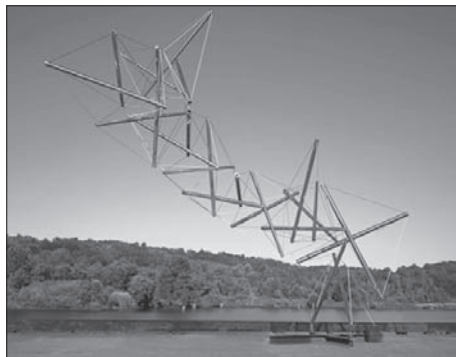
<sup>6</sup> MOTRO, 2003.

<sup>7</sup> Fullerova izjava iz 1961. godine. [JÄUREGUI, 2010: 8]

<sup>8</sup> David Georges Emmerich (1926.-1996.), francuski arhitekt mađarskog podrijetla, također skulptor i pisac. Predavao je na Ecole des Beaux Arts i poslije na Arhitektonskom fakultetu Sveučilišta Paris-La Villette.

<sup>9</sup> VESNA, 2000.





SL. 5. K. SNELSON: „ZMAJ”  
FIG. 5. K. SNELSON: "DRAGON"

U međuvremenu Snelson je nastavio izradivati skulpture, koristeći *tensegrity* konstrukcije kao njihove esencijalne i integralne dijelove (Sl. 5. i 6.). Usredotočio je svoj rad na skulpturalni i estetski aspekt artefakata, izbjegavajući ozbiljniji matematički pristup.

Fuller i Emmerich istraživali su različite moguće tipove *tensegrity* konstrukcija, uglavnom sferne i jednodimenzionalne sustave. Pritom su se koristili modelima i empirijskim istraživanjima. Za razliku od Snelsona, oni su tražili moguće načine primjene ovih sustava u arhitekturi i građevinarstvu. Fuller je nekoliko puta pokušao oblikovati *tensegrity* geodetske kupole, a neke je i patentirao (Sl. 7.). Za njegova života krajnja primjena *tensegrity* konstrukcija nije bila toliko uspješna koliko je očekivao. Tako ni glasovitu futurističku *tensegrity* kupolu koja bi prekrila Manhattan nije nikad uspio realizirati (Sl. 8.).

Fullerov je rad nadahnuo mnoge koji su nastavili istraživati ovo područje i tražiti praktičnu primjenu ovih sustava. Poslije prvih pokušaja izgradnje šatorastih konstrukcija 1960-ih godina (Frei Otto), napregnute konstrukcije postale su popularnije 1970-ih izgradnjom Olimpijskog stadiona u Münchenu. Projektirali su ga Fritz Leonhardt, Frei Otto i Jörg Schlaich 1972. godine. Rene Motro, jedan od najpoznatijih stručnjaka za *tensegrity* konstrukcije, napisao je 1973. godine studiju o mehaničkom ponašanju ovoga tipa konstrukcije pod nazivom *Topologie des structu-*

*res discrètes. Incidence sur leur comportement mécanique. Autotendant icosaedrique.*<sup>10</sup> Studija se temeljila na rezultatima istraživanja provedenog u građevinskom laboratoriju Sveučilišta Montpellier u Francuskoj. Otada su taj laboratorij i radovi njegovih istraživača postali nezaobilazna referenca u području istraživanja *tensegrity* konstrukcija, a broj zainteresiranih istraživača kontinuirano je rastao. Anthony Pugh objavio je 1976. godine knjigu *Introduction to Tensegrity*, zanimljivu ponajviše zbog različitih modela koje obrađuje te strogo provedene klasifikacije i tipologije.<sup>11</sup> Iste je godine Hugh Kenner, zapravo amater u ovome području, objavio svoju knjigu *Geodesic Math and How to Use It* u kojoj je pokazao kako izračunati, do bilo kojega željenog stupnja točnosti, geometrijske detalje (dužine i stupnjeve) pravilnih geodetskih *tensegrity* konstrukcija te kako iskoristiti njihove očite potencijale.<sup>12</sup>

Tijekom 1980-ih Robert Burkhardt započeo je detaljnija istraživanja o geometriji i matematičkom pristupu *tensegrity* konstrukcijama, a u tome mu je pomogao i Fuller. Dvadeset godina kasnije, kao rezultat svojih istraživanja, objavio je knjigu *Practical Guide to Tensegrity Design*.<sup>13</sup>

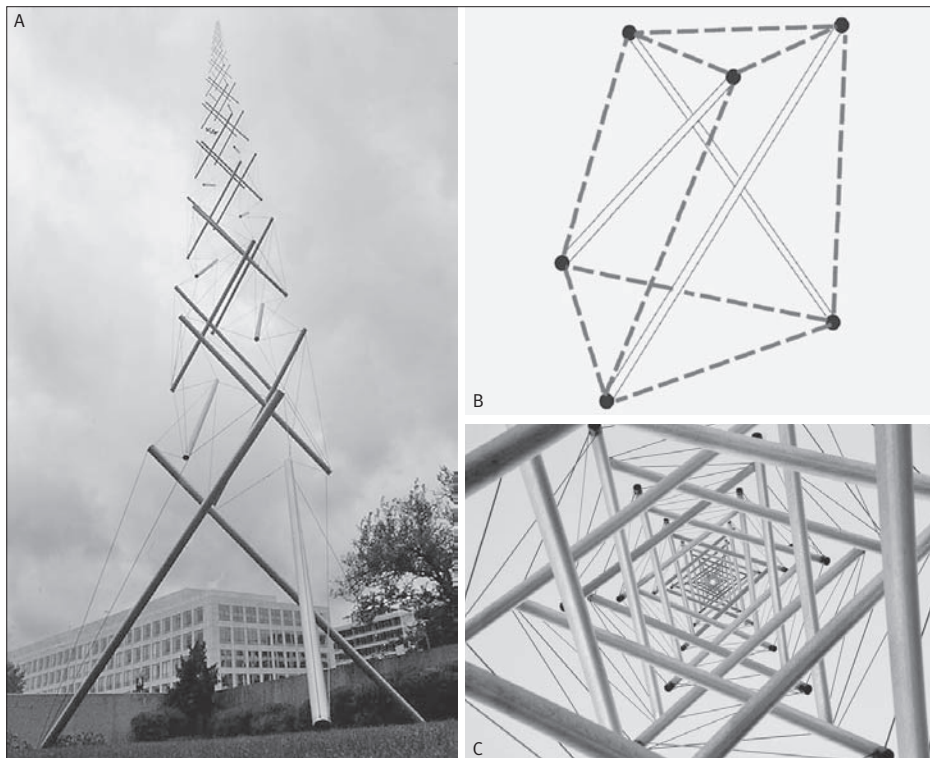
Robert Connelly i Allen Back, obojica matematičari, uspjeli su naći ispravnu trodimenzionalnu generalizaciju za *tensegrity* konstrukcije koristeći se matematičkim alatom teorije grupe i teorije predstavljanja te mogućnostima elektroničkih računala. Pripremili su detaljan katalog postojećih i novih *tensegrity* konstrukcija, s tipovima stabilnosti i simetrije.<sup>14</sup>

Ostali su autori (S. Pellegrino, A. G. Tibert, A. M. Watt, W. O. Williams, D. Williamson, R. E. Skelton, Y. Kono, R. Passera, M. Pedretti itd.) također proučavali matematički (s geometrijskog, topološkog i algebarskog stanovišta) i mehanički pristup *tensegrity* konstrukcijama.

• **Sadašnja razina znanja** – Mnoga istraživanja pridonijela su prevladavanju postojećih zapreka za praktičnu primjenu integralno napetih (*tensegrity*) konstrukcija. Istraživanja usredotočena na multidisciplinarnost problema rezultirala su prilagodljivom tehnologijom za projektiranje i analizu integralno napetih konstrukcija te polučila nekoliko projektantskih inovacija koje se mogu primijeniti i na te konstrukcije. Konkretno, učinjeni su sljedeći razvojni koraci:

– Pronađene su matematičke proračunske tehnike i ostali algoritmi koji su ugrađeni u programske pakete za izračun duljine neopte-

SL. 6. K. SNELSON: *NEEDLE TOWER II* (30×6×6 M):  
A – POGLED, B – OSNOVNI MODUL, C – POGLED ODOZDO  
FIG. 6. K. SNELSON: *NEEDLE TOWER II* (30×6×6 M): A –  
VIEW, B – BASIC MODULE, C – VIEW FROM BELOW



<sup>10</sup> JÁUREGUI, 2010: 13

<sup>11</sup> PUGH, 1976.

<sup>12</sup> KENNER, 1976.

rečenih elemenata integralno napete konstrukcije, za proračun sila prednapinjanja, efekte vanjskih opterećenja i provedbu ostalih potrebnih analiza. U tome kontekstu razvijena je i generalna metoda koja matematički definira problem, osiguravajući maksimalnu moguću fleksibilnost projektiranja. Između ostalog, ta je fleksibilnost omogućila projektiranje konstrukcija vrlo sličnih sferičnim, gdje svi tlačni elementi imaju istu duljinu.

– Razvijena je metoda za projektiranje integralno napetih rešetki u sferične konstrukcije. Ova se metoda temelji na geodetskoj raspodjeli oktaedra. Trokutasti dijelovi oktaedra dijele se na manje trokute na način da se mrežastom podjelom bridova trokuta oktaedra generiraju trokuti. Broj na koji se brid dijeli naziva se frekvencijom dotičnog dijela oktaedra.

– Razvijena je metoda dobivanja kupola ‘izrezivanjem’ sferičnih konstrukcija. Istovremeno razvijene su i metode za ‘izrezivanje’ kupola pri izradi poluljuski i velikih otvora u kupolama.

– Razvijene su metode za izvođenje ravnih, u krug pravilno raspoređenih oslonaca za kupole.

– Topologija rešetki omogućila je maksimaliziranje vlačnih i minimaliziranje tlačnih elemenata po jedinici površine.

– Razvijeni su skup procedura koje su prikladne za komercijalnu upotrebu integralno napetih konstrukcija.

– Razvijene su tehnike za prikazivanje konstrukcija na vrlo sistematičan i inteligentan način.

– Napravljena je preliminarna analiza odgovora takvih konstrukcija na koncentrirana opterećenja.

– Razvijeni su računalni programi za automatsko generiranje i opisivanje integralno napetih konstrukcija vrlo velikih frekvencija.

## PROBLEMI KOD MODELIRANJA TENSEGRITY KONSTRUKCIJA

### PROBLEMS IN TENSEGRITY STRUCTURES MODELING

• **Općenito** – Iako su arhitekti i inženjeri dugo izbjegavali i neopravdano zapostavljali *tensegrity* konstrukcije, one danas ipak postaju priznata konstrukcijska forma. Napretkom tehnologije i teorije integralno napetih konstrukcija omogućena je demistifikacija problema koji prate ove konstrukcijske oblike. Iznalaženje početne forme koja je stabilna i prilikom opterećenja ubrzala je napredak od skulpture do konstrukcije.

Ne ulazeći u proračunske pojedinosti, ovdje ipak želimo ukazati na osnovne teškoće koje se javljaju kod modeliranja *tensegrity* konstrukcija. Modeliranje se uglavnom temelji na tri različita pristupa: preko pomaka, preko sila i preko energije. Cjelokupan matematički aparat koji je nuždan za analizu krutosti i stabilnosti *tensegrity* konstrukcija izuzetno je složen jer je za adekvatno modeliranje potrebno svladati: položaj *tensegrity* konstrukcije u višedimenzionalnom prostoru, matrice krutosti i naprezanja, koncepte samonaprezanja i ispravnog naprezanja te ravnoteže i rastavljanja sila.

Modeliranje *tensegrity* konstrukcija provodi se kroz tri faze:

– Faza I. Iznalaženje oblika – Cilj je iznalaženja oblika da se uz pretpostavljenu geometriju odredi uravnotežena prednaponska geometrija. Problemi su više nego očiti, budući da se radi o izrazitoj nelinearnosti koja uključuje velike deformacije.

– Faza II. Analiza prednaponske geometrije određene u fazi I. – Nakon utvrđivanja ravnoteže neopterećenoga *tensegrity* sustava slijedi analiza vanjskog djelovanja, u sklopu koje treba provjeriti mogućnost pojave mehanizama uslijed vanjskih djelovanja. Općenito, *tensegrity* sustavi mogu biti geometrijski fleksibilni ili kruti. Cilj je postići geometrijski krut sustav, tj. sustav koji nema unutarnji mehanizam pa je podvrgnut samo elastičnim deformacijama.

– Faza III. Dimenzioniranje elemenata – Zadnja faza dimenzioniranja *tensegrity* konstrukcije jest dimenzioniranje komponenata te konačno, ako je potrebno, provjera osjetljivosti konstrukcije na nepravilnosti i netočnosti izvedbe elemenata.

• **Problem iznalaženja oblika** – Traženje oblika kod *tensegrity* konstrukcija najzahtjevniji je zadatak. Postupak obuhvaća određivanje ravnotežnog oblika zadanih naponskih stanja, a koji se rješava jedino pomoću računalnih numeričkih metoda. Potrebno je naglasiti da postoji čitav niz metoda za iznalaženje oblika kojeg je neophodno poznavati kako bi se ispravno modelirala (analizirala i dimenzionirala) *tensegrity* konstrukcija. Pri nepravilno definiranom obliku konstrukcija se ne može uravnotežiti ili se uravnoteži u položaju koji nije prvotno zamislen.

Problem iznalaženja oblika *tensegrity* konstrukcije svodi se na određivanje fizičkog položaja u prostoru, ili nekoliko njih, koji će rezultirati stabilnom strukturom. Nekoliko metoda koje su korištene za rješavanje teškoća iznalaženja oblika navedene su u literaturi.<sup>15</sup> Problem iznalaženja oblika nema konačno rješenje, iako su mnogi autori ispitali dovoljne uvjete. Najuvjerljiviji dovoljan uvjet jest provjera naprezanja drugoga reda. Ova



SL. 7. B. FULLER: MONTREAL BIOSPHERE, PAVILJON SAD-A NA IZLOŽBI EXPO '67

FIG. 7. B. FULLER: MONTREAL BIOSPHERE, THE USA PAVILION AT THE EXPO '67 EXHIBITION

SL. 8. B. FULLER I S. SADAQ: KUPOLA NAD MANHATTANOM, 1960.

FIG. 8. B. FULLER AND S. SADAQ: DOME OVER MANHATTAN, 1960.

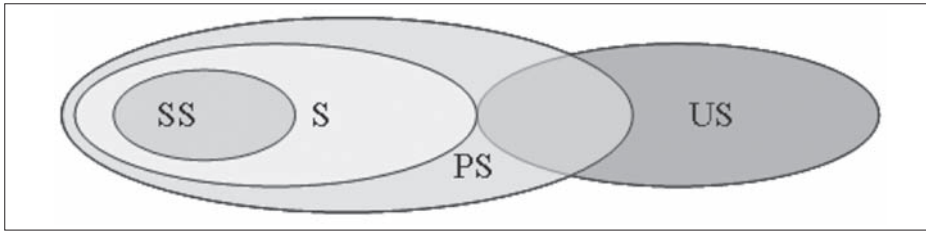


13 BURKHARDT, 1994.

14 CONNELLY, BACK, 1998.

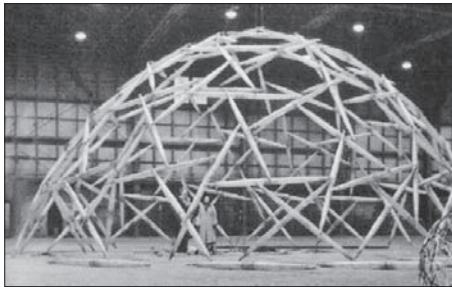
15 TIBERTI, PELLEGRINO, 2003.





SL. 9. ODNOSI IZMEĐU KRITERIJA STABILNOSTI: STABILNOST, STABILNOST OSTVARENA PREDNAPINJANJEM I SUPERSTABILNOST (SS – SUPERSTABILNOST, S – STABILNOST, PS – STABILNOST OSTVARENA PREDNAPINJANJEM, US – NESTABILNOST)

FIG. 9. RELATIONSHIPS BETWEEN STABILITY CRITERIA: STABILITY, STABILITY AS A RESULT OF PRESTRESSING AND HYPERSTABILITY (SS – HYPERSTABILITY, S – STABILITY, PS – STABILITY AS A RESULT OF PRESTRESSING, US – INSTABILITY)



SL. 10. B. FULLER: GEODETSKA TENSEGRITY KUPOLA, 1953.  
FIG. 10. B. FULLER: GEODESIC TENSEGRITY DOME, 1953.

SL. 11. MODEL KVAZITENSEGRITY SFERE,  
PROF. DR.SC. Z. ŽAGAR I POLAZNICI POSLIJEDIPLOMSKOGA DOKTORSKOG STUDIJA „ARHITEKTURA“ ARHITEKTONSKOG FAKULTETA SVEUCILIŠTA U ZAGREBU, 2007.

FIG. 11. MODEL OF A QUASI-TENSEGRITY SPHERE, PROF. Z. ŽAGAR, PH.D., AND THE PH.D. STUDENTS OF THE POST-GRADUATE DOCTORAL PROGRAM IN "ARCHITECTURE", FACULTY OF ARCHITECTURE, UNIVERSITY OF ZAGREB, 2007.



je provjera jača od uvjeta minimuma energije, ali je jednakovrijedna u uobičajenim situacijama. Preciznije rečeno, to nije nuždan uvjet stabilnosti (budući da konstrukcija može biti stabilna i kada uvjet nije zadovoljen), ali je prijeko potreban i dovoljan uvjet da bi konstrukcija imala pozitivnu krutost prvoga reda.

Nažalost, poznati uvjeti stabilnosti, uključujući i test drugoga reda, više su pregledni negoli propisani. Zapravo, oni se jednostavno primjenjuju na testiranje zadanog položaja (oblika) konstrukcije, ali se teško mogu koristiti za otkrivanje točnog ili približno stabilnog oblika. Umjesto toga, Andrea Micheletti i William O. Williams predložili su praktični algoritam za problem iznalaženja oblika koji se temelji na postavljanju sustava diferencijalnih jednadžbi.<sup>16</sup> Ovaj se sustav može riješiti numerički pa se na taj način mogu dobiti familije stabilnih položaja. Putanja rješenja mora započeti u stabilnom položaju; dakle za postupak je neophodno da postoji početna točka koja je, zapravo, stabilna konstrukcija. Metoda koju su predložili Micheletti i Williams ima praktičnu važnost u onim primjenama u kojima se, kod prijelaza jedne konfiguracije u drugu, duljine elemenata stalno mijenjaju. To uključuje naborane, razvijene konstrukcije ili konstrukcije promjenljive geometrije. Hiroshi Furuya i Ariel Hanaor pioniri su analiza i projektiranja *tensegrity* konstrukcija takvih karakteristika.<sup>17</sup>

Sa stanovišta stabilnosti, konstrukcije sa zglobnim spojevima dijele se na rešetke i prednapete konstrukcije, gdje se prednapete konstrukcije dodatno klasificiraju u vlačne konstrukcije i *tensegrity* konstrukcije. Rešetke nemaju nikakvo prednapinjanje pa su stabilne samo ako su statički (kinematički) određene. Za *tensegrity* konstrukcije superstabilnost podrazumijeva stabilnost ostvarenu prednapinjanjem (Sl. 9.). Ako je konstrukcija superstabilna, onda je uvijek stabilna, bez obzira na izbor materijala ili razinu prednapinjanja. Stoga se, kada je god to moguće, nastoji pronaći superstabilna *tensegrity* konstrukcija. Stabilnost ostvarena prednapinjanjem drugi je izbor, i to samo onda kad superstabilnost nije moguća. Ipak, ponekad su poželjne *tensegrity* konstrukcije kod kojih je stabilnost ostvarena prednapinjanjem, budući da su neke od njih više-

stabilne, a to može biti korisno za neke posebne namjene. Vlačne konstrukcije, uključujući mreže od kabela i konstrukcije s vlačnim membranama koje nose samo vlak, jesu superstabilne. No, stabilnost *tensegrity* konstrukcija koje imaju i vlak i tlak u njihovim elementima nije očita te zahtijeva puno napredniji pristup. U ovome se članku ova problematika neće dalje obrazlagati, a za podrobnije informacije upućujemo na relevantnu literaturu.<sup>18</sup>

## PRIMJENA TENSEGRITY KONSTRUKCIJA

### APPLICATION OF TENSEGRITY STRUCTURES

• **Općenito** – U nastavku se prikazuje primjena ovih sustava u stvarnim konstrukcijama. Među najvažnijim, već izgrađenim primjerima postoje i 'stvarne' i 'lažne' *tensegrity* konstrukcije. Ova je podjela donekle kontroverzna tema jer i u skupini 'pravih' *tensegrity* konstrukcija postoje tzv. 'čisti' i 'necisti' plutajući tlačni sustavi, ovisno o postojanju ili nepostojanju kontakta između pojedinih elemenata u tlaku.

Zanimljivo je napomenuti kako neki stručnjaci tvrde da iako je *tensegrity* skulptura fascinantno prostorno istraživanje, to ipak ne znači da ima bilo kakve posebne konstrukcijske vrijednosti.<sup>19</sup> Umjetnik Kenneth Snelson, možda najvažnija osoba u ovoj temi, posve je uvjeren u neizvedivost primjene ovih konstrukcija u bilo kakvu arhitektonsku ili inženjersku svrhu. On se poziva na mišljenje Marija Salvadorija o *tensegrity* sustavu u odnosu na konvencionalne nosače, a potom generalizira ovaj argument i na druge konstrukcije.<sup>20</sup> Snelson kaže: „Moje uvjerenje, utemeljeno na dugogodišnjem iskustvu i izradi beskrajnog broja *tensegrity* konstrukcija svih oblika i veličina, jest da je princip sam po sebi nepraktičan za izgradnju zgrada. Kao što znate, mnogi arhitekti i inženjeri radili su prema tom cilju i dalje to čine. Pedeset godina do sada. Niti jedan nije pokazao da postoji najmanja konstrukcijska prednost upotrebe ovog principa u realnoj gradnji. (...) *Tensegrity* konstrukcije također su vrlo fleksibilne i ja ne znam nijedan primjer gdje su postavljene kako bi se koristile za bilo kakvu praktičnu svrhu.”

Dakako, neke od Fullеровih najava i prijedloga činili su se fantazijama, kao što je primjerice prijedlog „da se Grand Canyon premosti *tensegrity* strukturom” ili da se cijeli grad prekrije geodetskom kupolom. Čak i ako je

<sup>16</sup> MICHELETTI, WILLIAMS, 2007.

<sup>17</sup> FURUYA, 1992.; HANAOR, 1993.

<sup>18</sup> ZHANG, 2007.

<sup>19</sup> SCHODEK, 1993.

<sup>20</sup> MOTRO, 2003.



Snelson donekle bio u pravu, to ne mijenja činjenicu da brojni istraživači rade na ovoj temi i da se u posljednje vrijeme objavljuje mnoštvo publikacija, članaka i radova u raznim časopisima i na konferencijama. Nije nevažno zabilježiti da je model jedne takve konstrukcije napravljen nedavno i u Hrvatskoj. Pod vodstvom prof. dr.sc. Zvonimira Žagara polaznici su kolegija „Nosivi sklopovi budućnosti”, na Doktorskom studiju „Arhitektura” Arhitektonskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, napravili u ljeto 2007. godine model kvazitensegrity sfere (Sl. 11.). „Tensegrity je sada primjenjiv na arhitekturu kao uhodan konstrukcijski sustav, a jednako dobro se može primijeniti na drugim poljima”, zaključio je Mamoru Kawaguchi, predsjednik *Medunarodnog udruženja za ljuske i prostorne konstrukcije* (IASS), u predgovoru Motrove posljednje knjige.<sup>21</sup>

#### • Primjeri izvedenih konstrukcija

– **Kupole** – Prvu takvu kupolu izveo je još 1953. godine Buckminster Fuller (Sl. 10). Prema Hanaoru ovakav je koncept primjenjiv samo na relativno malim rasponima jer se s povećanjem raspona smanjuje zakrivljenost pa će komponente doći u kontakt.<sup>22</sup>

– **Tornjevi i stupovi** – Najzaslužniji za primjenu *tensegrity* sustava u izradi tornjeva jest Kenneth Snelson koji je, tijekom četiri desetljeća, izradio nekoliko važnih primjera: *4-way Tower* (1963.), *Tetra Tower* (1963.-2001.), *Needle Tower* (1968.), *E.C. Column* (1969.-1981.), *Needle Tower II* (1969.; Sl. 12.) i *Penta Tower* (2001.-2003.). Svi su izvedeni pomoću T-prizme kao osnovnog modula.

*Tower of Rostock* (Sl. 13.), visine 62,3 m, još je jedan primjer *tensegrity* tornja, iako ne pripada skupini ‘pravih’ *tensegrity* konstrukcija jer su šipke svih modula u kontaktu. Autor je projekta Mike Schlaich, a toranj je bio zamišljen kao simbol sajma u Rostocku i Međunarodne vrtne izložbe 2003. godine. Osim preuzimanja vlastite težine i vjetra, toranj nije trebao imati dodatnu funkciju nosivosti pa je odlučeno da će se primijeniti sustav plutajućeg tlaka. Prema Schlaichu, toranj čini 6 *simplexa*, svaki visok 8,3 m i sastavljen od triju cijevi ( $\varnothing = 273$  mm,  $t = 12-40$  mm), te šest čeličnih kablova visoke čvrstoće, od kojih su tri horizontalna ( $\varnothing = 30$  i 50 mm), a druga tri čvršća dijagonalna ( $\varnothing = 50$  mm).<sup>23</sup> Konstrukciju je proračunao Arturo Ruiz de Villa koristeći programski paket *Sofistik* i primjenu teorije trećeg reda za velike deformacije. Metodom 3D konačnih elemenata proveden je proračun za vršnu iglu tornja. Ovaj tip

konstrukcije opterećen je samo vjetrom i samonaprezanjem, odnosno stupanj prednapinjanja određuje samo djelovanje vjetra jer je toranj toliko lagan da se njegova težina može zanemariti. Provedenom aerodinamičkom studijom utvrđeno je da prednapon je dijagonalnim kabelima treba iznositi 1100 kN (oko 30% vlačne čvrstoće kablova). Ako bi ta vrijednost bila manja, štapovi bi trebali nositi veće naprezanje, budući da su kruto spojeni, pa bi i deformacije bile veće. Uz prednapon 1100 kN, maksimalan je pomak na vrhu tornja 850 mm (1200 mm na vrhu igle). Toranj je pričvršćen na betonsku stopu stupa ( $\varnothing = 8$  m,  $h = 2$  m) koji osigurava potrebnu težinu kako toranj zbog svoje male težine ne bi ‘odletio u zrak’. Istovremeno je usidren u tlo sa šest stupova  $\varnothing = 500$  mm.

Stupovi *tensegrity* sustava mogu imati široku primjenu, kao npr.:

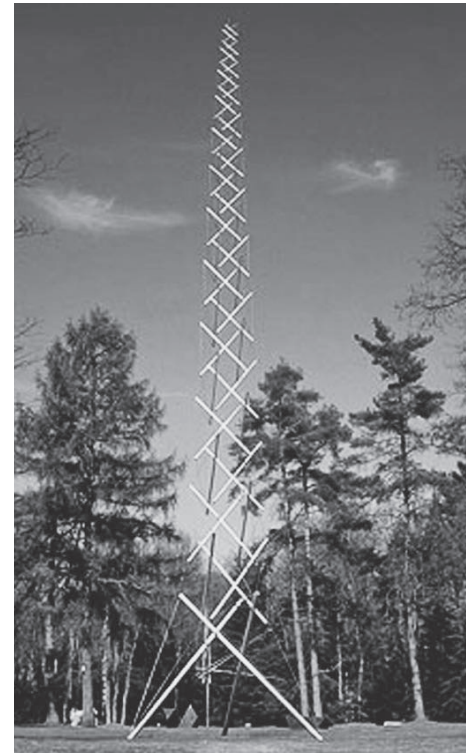
- gromobrani,
- podupirači antena, receptora, radiodasilačja,
- plantaže vjetroelektrana (smanjuju dojam masivnosti, iako bi ovakva primjena zahtijevala provođenje studije utjecaja turbina instaliranih na vrhovima jedne ili grupe *tensegrity* konstrukcija).

– **Krovne konstrukcije** – Stadion La Plata (Argentina), otvoren 2003., djelo je arhitekta Roberta Ferreire (Sl. 14.). Proračun konstrukcije proveli su *Weidlinger Associates*, koji su također radili i na proračunima Snelsonovih skulptura (Sl. 15.) i stadiona *Georgia Dome* u Atlanti.

– **Lukovi, lučne konstrukcije** – Primjena *tensegrity* sustava u izradi lukova još se uvijek istražuje. U tome smislu može se navesti istraživanje koje su proveli S. M. Adriaenssens i M. R. Barnes na području primjene takvih lukova pri nošenju membrana velikih raspona.<sup>24</sup> Svojstva takvog luka vrlo su pogodna za prilagodavanje asimetričnih opterećenja i izbjegavanje koncentracije naprezanja uslijed torzijske slobode luka koji uravnotežuje naprezanja.

– **Satori** – Tipičan su primjer ‘nepravilne’ *tensegrity* konstrukcije. U ovim slučajevima tlačni je element rubni element, a štapovi su u kontaktu. Također, u takvim konstrukcijama ne postoji stanje samouravnoteženja ni prednapona. Arhitekt A. Fujii i inženjer K. Kawaguchi izgradili su u Chibi (Japan) 2001. godine nekoliko ‘pravih’ *tensegrity* konstrukcija kao nosivu strukturu krovne membrane (Sl. 16.).

– **Paviljoni** – *Blur* paviljon koji su za izložbu *Swiss Expo* 2002. na jezeru Neuchatel projektirali američki arhitekti Elisabeth Diller i Ricardo Scofidio (Diller + Scofidio), lagana je *tensegrity* konstrukcija spljoštenoga elipsoidnog oblika, raspona u dužem smjeru 100



SL. 12. K. SNELSON: *NEEDLE TOWER II*, 30×6×6 M, 1969.  
FIG. 12. K. SNELSON: *NEEDLE TOWER II*, 30×6×6 M, 1969.

SL. 13. M. SCHLAICH: *TOWER OF ROSTOCK*, VISINA 62,3 M, 2003.  
FIG. 13. M. SCHLAICH: *TOWER OF ROSTOCK*, HEIGHT 62,3 M, 2003.

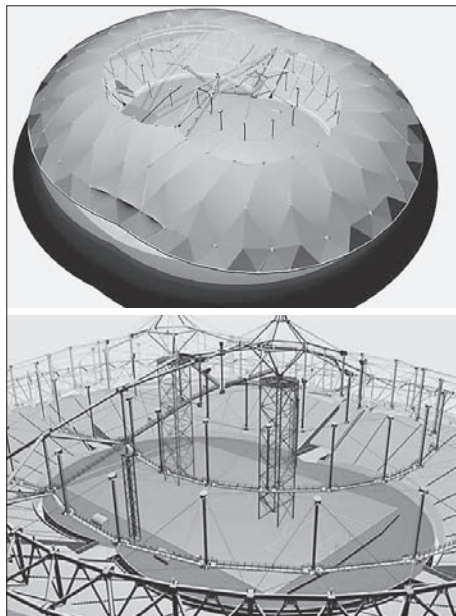


21 MOTRO, 2003.

22 HANAOR, 1987.

23 SCHLAICH, 2003.

24 ADRIAENSSENS, BARNES, 2001.



SL. 14. STADION LA PLATA, ARGENTINA, ARH. R. FERREIRA: MODEL KROVIŠTA

FIG. 14. LA PLATA STADIUM, ARGENTINA, ARCHITECT R. FERREIRA: ROOF STRUCTURE

SL. 15. K. SNELSON: RAINBOW ARCH, 2,1x3,8x1 M, 2001.

FIG. 15. K. SNELSON: RAINBOW ARCH, 2,1x3,8x1 M, 2001.

SL. 16. A. FUJII I K. KAWAGUCHI: TENSEGRITY SATORASTA KONSTRUKCIJA, CHIBA, JAPAN, 2001.

FIG. 16. A. FUJII AND K. KAWAGUCHI: TENSEGRITY TENT-LIKE STRUCTURE, CHIBA, JAPAN, 2001.



m, u kraćem 60 m, visine oko 10 m (Sl. 17.). Radi se o prostornoj mreži elemenata, sastavljenoj od diskontinuiranih tlačnih štapova i kontinuiranih vlačnih kabela koji formiraju stabilne volumene u prostoru. Osnovni konstrukcijski modul jest bipiramidalni sustav sastavljen od dviju piramida koje dijele zajedničku bazu i vertikalni tlačni štap. Od takvih modula sastavljena je središnja horizontalna kvadratična mreža tlačnih štapova s donjim i gornjim sustavom dijagonalnih kabela, a svi su međusobno povezani donjom i gornjom kvadratičnom mrežom horizontalnih vlačnih kabela. Bipiramidalni modul 10x10 m korišten je u središtu, dok su moduli 5x5 m smješteni po obodu.<sup>25</sup> Kruta *tensegrity* konstrukcija konzolno je prepuštena u svim smjerovima od središnjega valjka oslonjenog na prsten nosivih stupova koji se oslanjaju na pilone ispod vode. Konstrukcija je spojena na tri tlačno-vlačna prstena u središnjem valjku. Horizontalna mreža štapova uzrokuje horizontalne sile pritiska na središnji tlačni prsten u skladu s odgovarajućim glavnim stupovima. Nasuprot tome, gornja i donja mreža vlačnih kabela rasteže (uzrokuje vlačne sile) gornji i donji prsten valjka u skladu s odgovarajućim manjim stupovima valjka. Paviljon je bio otvoren za 700 posjetitelja na sat. Projektant je konstrukcije Mauro Pedretti sa suradnicima, iz ureda *Passera & Pedretti*. *Blur*-paviljon izazvao je velik interes stručne javnosti, i to ne samo zbog brojnih kontroverzi vezanih za arhitektonsku koncepciju i izvedbu paviljona već i zbog svoje fascinantne i eterične konstrukcije.

– **Mostovi** – Na konferenciji o pješačkim mostovima 2005. godine Andrea Micheletti predložio je *tensegrity* pješački nadvožnjak raspona 32 m (Sl. 1.).<sup>26</sup> U skladu s modularnim pristupom most je zamišljen kao niz međusobno spojenih 'ekspandiranih oktaedara', od kojih je svaki, sam po sebi, stabilna *tensegrity* konstrukcija.

Jedan od najatraktivnijih i tehnički najambicioznijih projekata mostova posljednjih godina zasigurno je most Kurilpa, izgrađen u Brisbaneu u Australiji (Sl. 18.). Projektirao ga je arhitekt Cox Rayner u suradnji s inženjerima iz Arupa i smatra se prvim izgrađenim *tensegrity* mostom na svijetu. Ali most nije u potpunosti *tensegrity*. Kolnička je ploča kontinuirani element koji prenosi i savijanje i uzdužnu tlačnu silu, a poprečno je ukrućena spregom. Također, postoji nekoliko položaja gdje se tlačni štapovi međusobno spajaju, najočitiije nad pilonima koji podupiru vezu između dvaju tlačnih jarbola i tlačnog štapa kolničke ploče. Zaključno, most je više 'tensegričan' nego što je istinski *tensegrity*.

– **Industrijski dizajn i umjetnost** – Stolice, stolovi, svjetiljke i sl. neki su od primjera atraktivne primjene *tensegrity* konstrukcija u industrijskom dizajnu i primijenjenim umjet-

nostima (Sl. 19.). Svakako treba spomenuti i skulpture, s kojima je, uostalom, sve i počelo. Uz već navedene konstrukte Kennetha Snelsona, čak je i Buckminster Fuller posvetio dio svoga truda primjeni *tensegrity* konstrukcija u umjetnosti.

## PRIJEDLOZI ZA PRIMJENU U BUDUĆNOSTI

### SUGGESTIONS FOR FUTURE APPLICATION

Posve je izgledno da će se rad na istraživanju i primjeni *tensegrity* konstrukcija nastaviti i u budućnosti. Burkhardt sažima neke prednosti *tensegrity* kupola, kao npr. upotreba štapova jednake duljine i jednostavni čvorovi, poboljšana krutost, velika elastičnost, mala težina itd.<sup>27</sup> On predlaže i neka područja primjene: superkonstrukcije, u koje se mogu ugraditi manje konstrukcije (npr. u urbanim područjima, poplavnim područjima ili nepravilnim terenima); zaštitne konstrukcije (npr. kod skladištenja, arheoloških nalazišta, poljoprivrednih površina, električnih ili elektromagnetskih polja); izbjeglički i planinarski zakloni; *Shelter System* konstrukcije; uređaji za kontrolu okoliša, prozvodnju hrane ili transformaciju energije; konstrukcije za zaštitu od zagađenja, letjećih životinja ili drugih objekata; konstrukcije otporne na potrese (zgrade, mostovi, skloništa...); paviljoni za sve vrste javnih događanja (koncerti, izložbe, sajmovi...); zaštita od mikrometeora; sferne superkonstrukcije za svemirske postaje itd.

## ZAKLJUČAK

### CONCLUSION

Čini se da je 'plutajuća kompresija' prisutna u svakome atomu našega svemira. Osim toga, prirodna načela nisu sadržana samo u *bio-tensegrityju*, ili obrnuto, već i kod nekih drugih primjera u povijesti arhitekture. Djela Antonija Gaudija, Freia Otta i Santiaga Calatrave samo su neki od primjera. Frei Otto je, primjerice, za unaprijeđenje svojih projekata koristio konstrukcijska načela već postojeća u prirodi, kao što su: film sapunice, paučina, kralježnica, kap ulja i slično. Inspirirao se biološkim funkcionalizmom kako bi podržao uvjerenje da je mala težina konstrukcije prava mjera njene konstrukcijske učinkovitosti.<sup>28</sup>

Načelno se može reći da većina znanstvenih metoda slijedi niz: istraživanje – razvoj sustava / teorija – njihovo pronalaženje u prirodi. *Tensegrity* nije iznimka. Iskustvo spomenutih arhitekata pokazuje da je možda logičnije slijediti dručkiji smjer: istraživanje u prirodi – pronalaženje sustava / teorija – njihovo razvijanje u drugim područjima.

<sup>25</sup> DILLER, SCOFIDIO, 2002.

<sup>26</sup> MICHELETTI, 2005.



Još 1914. godine u svome Manifestu futurističke arhitekture talijanski arhitekt Antonio Sant'Elia najavljuje novu arhitekturu i njezine odlike: revolucionarnost, elastičnost, laganost, rastezljivost, aktivnost, mobilnost i dinamičnost. Iz današnje perspektive, bliskost futurističkih ideja, arhitektonske avangarde i odlika *tensegrity* konstrukcija posebno je intrigantna. Nedvojbeno je da su za masovnu primjenu *tensegrity* konstrukcija neophodna daljnja istraživanja i naponi, ali je posve jasno da bi *tensegrity* doista mogao biti jedan od konstrukcijskih sustava budućnosti. Važan je korak na tome putu postignut pronalazanjem nekoliko *tensegrity* prototipova koji se mogu primijeniti i koji su se počeli primjenjivati u arhitekturi i građevinarstvu. Prikazani primjeri izvedenih *tensegrity* konstrukcija mogu poslužiti kao potvrda njihove primjenjivosti kod natkrivanja velikih raspona, mostova kracih raspona ili kao potpornjeva laganih infrastrukturnih sustava. Iako su daljnja i detaljnija istraživanja nužna, nesumnjivo je opovrgnuta uvriježena pretpostavka da je *tensegrity* neprimjenjiv konstrukcijski sustav. Značajke koje su omogućile primjenu ovih atraktivnih tipova konstrukcija općenito se mogu navesti kako slijedi:

- U pogledu proračuna, to su vrlo komplicirane konstrukcije. Ali taj je problem riješen primjenom odgovarajućih računalnih programskih paketa koji omogućavaju proračun statičkih modela 'velikih' deformacija.

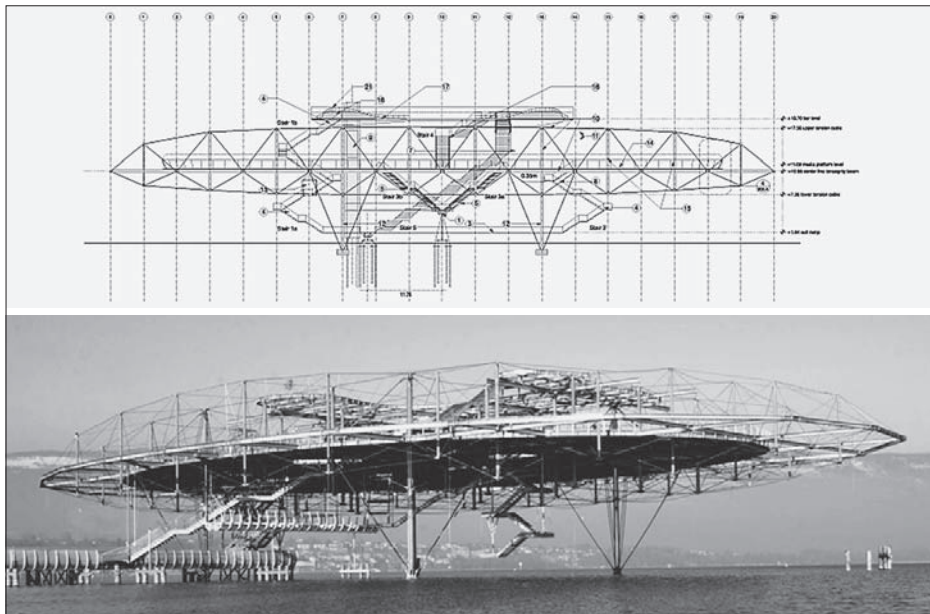
- Postupak iznalaženja oblika konstrukcije prilagođava se projektiranim prostornim zamislima i znanju inženjera. Naime pogrešno odabran početni oblik konstrukcije daje rješenje koje divergira, tj. proračun je nemoguć.

- Budući da se radi o konstrukciji velikih deformacija i, slobodno se može reći, geometrijske neobuzdanosti, potrebno je odabrati takve sekundarne dijelove konstrukcije (pokrov, pročelje, obloge i sl.) da bez oštećenja mogu slijediti te deformacije.

- Geometrijska složenost *tensegrity* konstrukcija zahtijeva iskustvenog projektanta i analizu na 3D modelu.

- Izrada spojnih elemenata (tlak + vlak) je zahtjevana, a ostvaruje se uz tehnički sofisticirane i složene detalje.

U međuvremenu, desetljeće istraživanja, razvoja, projektiranja i primjene rezultiralo je novim tipom prostorne konstrukcije - '*tensegrity* staklene konstrukcije' koja je kombinacija učinkovitosti materijala, uz maksimalnu transparentnost i vizualnu eleganciju. No, kako je trenutačna tehnologija izuzetno osjetljiva na izbor sustava, materijala i načina montaže, samo su predani stručnjaci u stanju uspješno ostvariti takve ciljeve. Interes za



SL 17. DILLER I SCOFIDIO: *BLUR* PAVILJON, NEUCHATEL, ŠVICARSKA, 2002.

FIG. 17. DILLER AND SCOFIDIO: *BLUR* PAVILION, NEUCHATEL, SWITZERLAND, 2002.

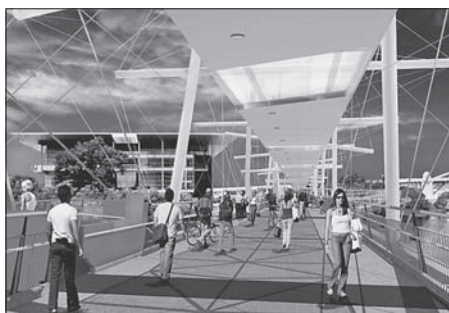
primjenu takvih konstrukcija raste među vodećim *high-tech* i *mild-tech* arhitektima. Njihovi projekti potiču industriju i ambicioznije inženjere da transparentne *tensegrity* konstrukcije, pa i u kombinaciji sa staklom, ne shvataju tek kao pomodni hir, već da ih prihvate kao mogućnost ozbiljnoga graditeljskog napretka. Teorija i praksa oduvijek se međusobno stimuliraju. Naposljetku, u primjeni novih tehnologija kod razmatranja i izgradnje *tensegrity* konstrukcija samo sinergija između arhitekata i inženjera građevinarstva može rezultirati inovativnim ostvarenjima.

SL 18. C. RAYNER I ARUP: MOST KURILPA, BRISBANE, AUSTRALIJA, 2007.-2009.

FIG. 18. C. RAYNER AND ARUP: KURILPA BRIDGE, BRISBANE, AUSTRALIA, 2007-2009.

SL 19. STOL (INTENSIONS DESIGN LTD.) I SVJETILJKA (STUDIO LAGRANJA) OBLIKOVANI KAO *TENSEGRITY* KONSTRUKCIJA

FIG. 19. A TABLE (INTENSIONS DESIGN LTD.) AND A LAMP (STUDIO LAGRANJA) DESIGNED AS *TENSEGRITY* STRUCTURES



27 BURKHARDT, 1999.

28 DREW, 1976.

## LITERATURA

## BIBLIOGRAPHY

1. ADRIAENSSENS, S. M.; BARNES, M. R. (2001.), *Tensegrity Spline Beam and Grid Shell Structures*, „Engineering Structures”, 23 (1): 29-36, New York
2. BURKHARDT, R. (1994.), *A Practical Guide to Tensegrity Design*, vlastita naklada (Robert William Burkhardt, Jr.), Cambridge, MA
3. CONNELLY, R.; BACK, A. (1998.), *Catalogue of Symmetric Tensegrities*, Cornell University, Ithaca
4. DILLER, E.; SCOFIDIO, R. (2002.), *Blur: the making of nothing*, Harry N. Abrams New York / London
5. DREW, P. (1976.), *Frei Otto: Form and structure*, Crosby Lockwood Staples, London
6. EMMERICH, D. G. (1988.), *Structures Tendues et Autotendantes*, Ecole d'Architecture de Paris la Villette, Paris
7. FULLER, B. (1963.), *Ideas and Integrities: A Spontaneous Autobiographical Disclosure*, Collier Books, New York
8. FURUYA, H. (1992.), *Concept of deployable tensegrity structures in space applications*, „International Journal of Space Structures”, 7 (2): 143-151, Brentwood
9. GENGNAGEL, C. (2002.), *Arbeitsblätter 'Tensegrity'*, Fakultät für Architektur, Technische Universität München, München
10. HANAOR, A. (1987.), *Preliminary Investigation of Double-Layer Tensegrities*, u: *Proceedings of International Conference on the Design and Construction of Non-conventional Structures*, Vol.2, [ur. TOPPING, H. V.], Civil-Comp Press., Edinburgh
11. HANAOR, A. (1993.), *Double-layer tensegrity grids as deployable structures*, „International Journal of Space Structures”, 8 (1-2): 135-143, Brentwood
12. JÁUREGUI, V. G. (2010.), *Tensegrity Structures and their Application to Architecture*, PubliCan, Ediciones de la Universidad de Cantabria, Cantabria
13. KENNER, H. (1976.), *Geodesic Math and How to Use It*, University of California Press, Berkeley
14. MICHELETTI, A. (2005.), *Modular Tensegrity Structures, the TorVergata Footbridge*, Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Footbridges, Venecija
15. MICHELETTI, A.; WILLIAMS, W. O. (2007.), *A marching procedure for form-finding for tensegrity structures*, „Journal of mechanics of materials and structures”, 2 (5): 857-882, Berkeley CA
16. MOTRO, R. (2003.), *Tensegrity: Structural Systems for the Future*, Kogan Page Science, London
17. PUGH, A. (1976.), *An Introduction to Tensegrity*, University of California Press, Berkeley
18. SCHLAICH, M. (2003.), *Der Messeturm in Rostock – ein Tensegrityrekord*, „Stahlbau”, 72 (10): 697-701, Berlin
19. SCHODEK, D. L. (1993.), *Structure in Sculpture*, MIT Press, Cambridge, MA
20. TIBERT, A. G.; PELLEGRINO, S. (2003.), *Review of form-finding methods for tensegrity structures*, „International Journal of Space Structures”, 18 (4): 209-223, Brentwood
21. VESNA, V. (2000.), *Networked Public Spaces: An Investigation into Virtual Embodiment*, disertacija, University of Wales College, Newport
22. ZHANG, J. (2007.), *Structural morphology and stability of tensegrity structures*, disertacija, Kyoto University, Kyoto
23. \*\*\* (2003.), *Energy Time Line – Year 1800 to 1899*, California Energy Commission (CAC), California

## IZVORI

## SOURCES

## IZVORI ILUSTRACIJA

## ILLUSTRATION SOURCES

- SL. 1. MICHELETTI, 2005.
- SL. 2. JÁUREGUI, 2010.
- SL. 3. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/Karl\\_loganson\\_structure.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/Karl_loganson_structure.jpg) [20.4.2012.]
- SL. 4. EMMERICH, 1988.
- SL. 5. [www.kennethnelson.net](http://www.kennethnelson.net) [20.4.2012.]
- SL. 6. [www.kennethnelson.net](http://www.kennethnelson.net) [20.4.2012.]
- SL. 7. [www.greatbuildings.com/buildings/US\\_Pavilion\\_at\\_Expo\\_67.html](http://www.greatbuildings.com/buildings/US_Pavilion_at_Expo_67.html)
- SL. 8. FULLER, 1963.
- SL. 9. ZHANG, 2007.
- SL. 10. GENGNAGEL, 2002.
- SL. 11. Arhiva prof. dr.sc. Zvonimira Žagara
- SL. 12. <http://kennethnelson.net/1970/needle-to-wool-ii/> [20.4.2012.]
- SL. 13. SCHLAICH, 2003.
- SL. 14. <http://tensegritywiki.blogspot.com/2010/09/octet-ring-supports-3-layer-tensegrity.html> [20.4.2012.]
- SL. 15. <http://kennethnelson.net/2010/rainbow-arch/> [20.4.2012.]
- SL. 16. ZHANG, 2007.
- SL. 17. DILLER, SCOFIDIO, 2002.
- SL. 18. [www.arup.com/Projects/Kurilpa\\_Bridge.aspx](http://www.arup.com/Projects/Kurilpa_Bridge.aspx) [20.4.2012.]
- SL. 19. [www.furnifurnish.com/furniture/bucky-lamp-pendant-light-for-pallucco-by-lagranjade-sign/](http://www.furnifurnish.com/furniture/bucky-lamp-pendant-light-for-pallucco-by-lagranjade-sign/) [20.4.2012.]; [www.intensiondesigns.com/gallery.html](http://www.intensiondesigns.com/gallery.html) [20.4.2012.]



## SAŽETAK

## SUMMARY

## TENSEGRITY STRUCTURES

### INNOVATIVE LIGHT STRUCTURAL SYSTEMS

*Tensegrity* system is a relatively new structural system suitable for the design of light and adaptable structures which create the impression of a bunch of rods floating in the air. These structural systems are known under various names depending on a particular approach: integrally strained systems, self-stabilizing systems, self-straining networks, critical and overcritical network systems. The structural function of such systems results from linking their constituent elements by means of tensile forces into an integral whole. This principle lies behind their name *tensegrity* (*tensional integrity*).

One of the main objectives in the design of wide span structural systems is to reduce their own weight as much as possible. Therefore ingenious structural systems have been invented. Their reduced weight results from a reduced number of rods in compression. Thus the stability of the system is achieved by introducing self-balancing strain created by cables (elements in tension) and rods (elements in compression). These systems can therefore be defined as systems whose rigidity results from a self-straining balanced state between tensile cables and compressive elements independently of any outside activity. Self-straining that is responsible for their rigidity is independent of any devices that usually help to achieve a balanced state of straining.

The geometric form of the spatial system is created by a periodic combination of basic modules whose integral parts are cables and rods. Some forms of

*tensegrity* structures are reminiscent of the already familiar structures, trusses and beam-and-stringer grids but with a different flow of forces and spatial stability. The originality of *tensegrity* structures lies in its complex geometry and structural function resulting in a specific mechanic behaviour differing from the conventional spatial systems.

Three historical figures are usually considered as the inventors of *tensegrity* structures: R. Buckminster Fuller, David Georges Emmerich and Kenneth D. Snelson. Fuller's work has stimulated many researchers who have been exploring this field and searching for practical application of these systems. The first attempts at constructing tent-like structures in the 1960s (Frei Otto) were followed by a period (1970s) in which strained structures gained popularity especially after the Olympic stadium in Munich had been built up.

Numerous research projects have contributed substantially to eliminate the obstacles to practical application of *tensegrity* structures. Researches focused on multi-disciplinary aspect of the issue have resulted in an adjustable technology for design and analysis of integrally strained structures and have developed successful design innovations applicable to *tensegrity* structures.

Despite the fact that *tensegrity* structures have for a long time been avoided and unjustly neglected within the fields of architecture and structural engineering, they have recently, however, become an accepted structural form. Advanced technology and a developing theory of integrally strained

structures have helped to eliminate prejudices about these forms of structures. Finding an initial form that is stable even when stressed has certainly speeded up the evolution from sculpture to structure.

Modeling is mainly based on three different approaches: by displacement, by forces and by energy. The mathematical tools necessary for the analysis of rigidity and stability of *tensegrity* structures is extremely complex since an appropriate modeling requires mastery and control of the following: the position of a *tensegrity* structure in multi-dimensional space, rigidity and straining matrices, the concepts of self-straining and proper straining, the balance and disassembly of forces.

The examples of the already built *tensegrity* structures range from domes, towers, roof and arch structures, tents, pavilions, and bridges to artistic and everyday objects (furniture). It is certain that researches on *tensegrity* structures will continue into the future. The examples shown here confirm their applicability when covering large spans, bridges with short spans or as supports of lightweight infrastructural systems. Although further and more thorough researches are needed, it is quite clear that a deeply rooted assumption about the inapplicability of *tensegrity* structures is nowadays successfully refuted. However, successful application of new technologies to *tensegrity* structures requires close cooperation between architects and structural engineers as an essential prerequisite for future creative and innovative solutions.

**DAVOR SKEJIĆ**  
**BORIS ANDROIĆ**  
**DUBRAVKO BAČIĆ**

## BIOGRAFIJE

## BIOGRAPHIES

Dr.sc. **DAVOR SKEJIĆ**, docent na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, Katedra za metalne konstrukcije. Znanstveni je savjetnik i ovlašten projektant.

Dr.sc. **BORIS ANDROIĆ**, redoviti profesor na Građevinskom fakultetu u Zagrebu do 2009. Ovlašteni je revident za čelične i spregnute konstrukcije.

Mr.sc. **DUBRAVKO BAČIĆ**, predavač na Arhitektonskom fakultetu u Zagrebu. Diplomirao je na Arhitektonskom fakultetu u Zagrebu, a magistrirao na Harvard University [GSD].

**DAVOR SKEJIĆ**, Ph.D., Assist. Professor, research consultant and licensed designer, Faculty of Civil Engineering in Zagreb, Department of Steel Structures.

**BORIS ANDROIĆ**, Ph.D. Full Professor, Faculty of Civil Engineering in Zagreb until 2009. Licensed revisor for steel and composite structures.

**DUBRAVKO BAČIĆ**, M.Sc., lecturer, Faculty of Architecture in Zagreb. He graduated from the Faculty of Architecture in Zagreb and received his master degree at Harvard University (GSD).



