

768502

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TENSEGRITY SİSTEMLER**

Mimar Kürşad KAYA

FBE Mimarlık Anabilim Dalı Yapı Programında  
Hazırlanan

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Görün ARUN

*Prof. Langiz Bayülgen*

*Prof. A. Zafer ÖZTÜRK*

Prof. A. Zafer ÖZTÜRK

*Prof. A. Zafer ÖZTÜRK*

**İSTANBUL, 2005**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTMA LİSTESİ .....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Problem.....	1
1.2 Amaç.....	1
1.3 Kapsam .....	1
1.4 Yöntem .....	1
2. TENSEGRITY SİSTEMLER.....	3
2.1 Tensegrity Sistemlerin Tanımı .....	3
2.2 Tensegrity Sistemlerin Tarihsel Gelişimi .....	5
2.3 Tensegrity Sistemlerin Temel Kavramları .....	11
2.3.1 Bağlı Strüktür .....	11
2.3.2 Tensegrity Hücrelerin Geometrisi ve Sağlamlığı (Rijitlik) .....	13
2.3.3 Tensegrity sistemlerin kendi iç gerilmesi ile oluşan rijitlik ve mekanizması .....	16
3. ÇEŞİTLEMELER VE SINIFLANDIRMALAR.....	20
3.1 Sınıflandırma Ölçütleri .....	20
3.2 Temel ve Küresel Tensegrity Hücreler.....	22
3.2.1 Küresel Hücreler.....	22
3.2.1.1 Eşkenar Dörtgen Birleşimler ve Prizmatik Hücreler .....	22
3.2.1.2 Döngüsel (Devirsel) Birleşimler ve çok yüzlü hücreler .....	29
3.2.1.3 “Z” tipi (zig-zag) Birleşimli Tensegrity Sistemler .....	34
3.3 Hücrelerin Birleşimleri ve Çift Tabakalı Tensegrity Sistemler.....	36
4. TENSEGRITY SİSTEMLERDE FORM BULMA YÖNTEMLERİ.....	46
4.1 Form Kontrolü Yöntemi .....	46
4.2 Kuvvet kontrolü yöntemi.....	47
4.2.1 Kuvvet yoğunluğu metodu .....	50
4.3 Tensegrity Sistemlerde İç Gerilme Dengesi Ve Mekanizmanın Form Bulma Çalışmalarına Etkisi.....	54

5.	HAREKETLİ, KATLANABİLİR TENSEGRİTY SİSTEMLER .....	57
6.	MEVCUT VE GELİŞMEKTE OLAN TENSEGRİTY SİSTEMLER .....	64
7.	SONUÇ.....	71
KAYNAKLAR.....		73
EKLER.....		75
Ek 1 Keneth Snelson'un Çalışmaları.....		76
Ek 2 D.G.Emmerich'in Çalışmaları .....		80
Ek 3 "Atlanta Georgia Dome" Stadyumu Tensegrity Çatı Strüktürü .....		83
Ek 4 Mekanizma Tekniği ve Kinematik.....		93
ÖZGEÇMİŞ.....		94



## SİMGE LİSTESİ

$c$	Kablo sayısı
$c_{i-j}$	Kablo uzunluğu
$d_i$	Düğüm noktaları
$d_{i-j}$	Düğüm noktaları arası uzunluk
$t$	Çubuk sayısı
$t_{i-j}$	Çubuk uzunluğu
$n$	Düğüm noktası sayısı
$m$	Hücre yüzü sayısı
$F$	Mekanizma serbestlik derecesi
$N_t$	Çubuk iç gerilmesi
$N_c$	Kablo iç gerilmesi
$[A]$	Denge Matrisi
$\{t\}$	İç gerilme vektörü
$r$	Kablo ve çubuk uzunluğu oranı
$q$	Kuvvet yoğunluğu katsayısı
$T_j$	Eksenel kuvvet
$L_j$	Eleman uzunluğu
$X_i$	"i" noktası koordinatı
$f_{ix}$	Dış yüklerin bileşkesi

## **KISALTMA LİSTESİ**

ABD Amerika Birleşik Devletleri  
IGA Uluslar Arası Rostok Bahçe Fuarı



## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	K.Snelson'un heykeli "Needle Tower" (IASS,Sayı:43).....	3
Şekil 2.2	Basit tensegrity sistem ve temel denge.....	4
Şekil 2.3	Moleküler birleşimler (Motro,2003).....	4
Şekil 2.4	Tensegrity hücre .....	5
Şekil 2.5	K.İoganson'un heykeli (Motro, 2003).....	5
Şekil 2.6	R.B.Fuller'in yaptığı tensegrity strüktür (Sadao,S.1995).....	6
Şekil 2.7	R.B.Fuller'in "Naguchi Garden" müzesindeki "Bucky" adlı heykeli (Sadao, 1995).....	6
Şekil 2.8	R.B.Fuller'in aldığı patent (Sadao, IASS-Vol:11-1996) .....	7
Şekil 2.9	D.G.Emmerich'in yaptığı (başarısız) denemeler (Emmerich, 1995).....	7
Şekil 2.10	D.G.Emmerich'in 1959 yılının sonlarına doğru geliştirdiği (başarılı) sistem (IASS,Sayı:11,1996).....	8
Şekil 2.11	D.G.Emmerich'in aldığı patent. (Motro, 2003).....	8
Şekil 2.12	K.Snelson'un aldığı patent (Motro, 2003).....	9
Şekil 2.13	R.B.Fuller'in tasarladığı "Aspention Dome" (Çizim:A.B.D.Patent Dairesi) ...	10
Şekil 2.14	D.Geiger'in tasarladığı kubbe (Çizim:Geiger Mühendislik).....	10
Şekil 2.15	"Geiger Kubbesi" detay, 1988 Seoul (Fotoğraf: Geiger Mühendislik).....	11
Şekil 2.16	Üçgen prizma geometrisi kullanılarak yapılan strüktür.....	11
Şekil 2.17	30° çevrilerek oluşturulan "prizmatik tensegrity hücre" .....	12
Şekil 2.18	Grafik yöntemi ile çizilmiş prizmatik üç çubuklu tensegrity hücre (Kalın çizgiler basınç çubuklarını, ince çizgiler çekme kablolarını, kırmızı noktalar düğüm noktalarını ifade etmektedir.) .....	13
Şekil 2.19	Balonun içinde oluşan kuvvetler .....	13
Şekil 2.20	Tensegrity sistemler.....	14
Şekil 2.21	"Çift Tabakalı Tensegrity Sistemler" in oluşum şeması.....	15
Şekil 2.22	"Çift Tabakalı Tensegrity Sistem" ( <a href="http://www.rwgrayprojects.com">http://www.rwgrayprojects.com</a> ).....	16
Şekil 2.23	Eksenel iç gerilme dengesi .....	18
Şekil 2.24	İki boyutlu sistemde "İç gerilme" ile oluşan denge.....	18
Şekil 2.25	Sekiz yüzlü geometride oluşan iç gerilmeler .....	19
Şekil 3.1	Tensegrity sistemlerde bağıl strüktür ve temel denge grafiği.....	20
Şekil 3.2	Altı çubuklu "Küresel Tensegrity Hücre" .....	22
Şekil 3.3	Eşkenar dörtgen izdüşüm oluşturan birleşim.....	23
Şekil 3.4	Çevirme açısı $\alpha = 30^\circ$ .....	23
Şekil 3.5	a) Üçgen prizma b) Kare prizma .....	23
Şekil 3.6	"Simplex" hücrelerin plan izdüşümü.....	24
Şekil 3.7	Sekiz yüzlü geometri ve eşkenar dörtgen birleşim (Motro, 2003) .....	25
Şekil 3.8	Tensegrity sistemde baklava biçimli birleşim (Robert,1990).....	25
Şekil 3.9	Prizmatik hücrelerin geometrik değerler grafiği (Hanaor,1990).....	26
Şekil 3.10	Saat yönü tersine çevrilmiş dört temel "Prizmatik Tensegrity" .....	27
Şekil 3.11	Genleşmiş Sekiz yüzlü (Morto,R.2003) .....	27
Şekil 3.12	Köşegenlerden kesilerek ayrılan yüzeyler (Motro,R.2003).....	28
Şekil 3.13	"Döngüsel Birleşim" ve "Birleşim açılımı" .....	29
Şekil 3.14	Sekiz yüzlü döngüsel tensegrity sistem .....	30
Şekil 3.15	Tensegrity sekiz yüzlü oluşumları (Robert, 1996) .....	30
Şekil 3.16	Döngüsel Birleşimli Tensegrity Sistemler.....	31
Şekil 3.17	a) sekiz yüzlü b) bölünmüş sekiz yüzlü.....	32
Şekil 3.18	a) Genleşmiş sekiz yüzlü b) Düğüm noktaların çok yüzlü geometrinin merkezine uzaklığı.....	33
Şekil 3.19	Bölünme katsayısı.....	33

Şekil 3.20	Kablo ve çubukların jeodezik ızgara üzerindeki dağılımı .....	34
Şekil 3.21	Z tipi birleşim prensibi.....	34
Şekil 3.22	Zig-zag birleşimler.....	34
Şekil 3.23	Jeodezik zig-zag örgü modülü .....	35
Şekil 3.24	İki farklı altıgen örgü .....	35
Şekil 3.25	Zig-zag birleşimli jeodezik tensegrity küre .....	35
Şekil 3.26	R.B.Fuller'in yaptığı ilk tensegrity kolon modeli.....	36
Şekil 3.27	a) Tensegrity kolon b) pozitif ve negatif tensegrity hücre.....	37
Şekil 3.28	R.B.Fuller'in tensegrity kolonları birleştirerek yaptığı farklı bir strüktür tasarımı .....	37
Şekil 3.29	İgne kulesi (Needle tower) (Motro, 2003) .....	38
Şekil 3.30	Tensegrity "Torus" .....	38
Şekil 3.31	Altı genişmiş sekiz yüzlü (octahedron) tensegrity hücreden oluşmuş yay strüktür .....	39
Şekil 3.32	Düğüm-kablo birleşimi ile oluşmuş çift tabakalı tensegrity sistem.....	39
Şekil 3.33	Çift tabakalı tensegrity birleşim tipleri (Tip1a-b, tip 2) .....	40
Şekil 3.34	Modüler çift tabakalı tensegrity ızgara tipleri (Tip1a-b, tip 2).....	41
Şekil 3.35	Dokuz adet "Dört-çubuk Temel Tensegrity Hücre"den oluşmuş Çift Tabakalı Tensegrity Sistem .....	42
Şekil 3.36	Dokuz adet "Dört-çubuk Temel Tensegrity Hücre"den oluşmuş Çift Tabakalı Tensegrity Sistemin "Aksonometrik" Perspektifi .....	42
Şekil 3.37	Çift Tabakalı Tensegrity Izgara Prensibi kullanılarak yapılmış Model (Motro,2003).....	43
Şekil 3.38	dört çubuklu tensegrity hücrede 1.tip modifikasyon (6. ve 8. düğüm noktalarının konumları yer değiştirmiştir.).....	43
Şekil 3.39	dört çubuklu tensegrity hücrede 2.tip modifikasyon (6. ve 8. düğüm noktalarının konumları yer değiştirmiştir.).....	44
Şekil 3.40	2.tip modifikasyon tensegrity hücre kullanılarak yapılan tek eğrilikli çift tabakalı tensegrity strüktür (Motro, 2003).....	44
Şekil 3.41	"Çift Eğrilikli Çift Tabakalı Tensegrity" strüktür (Motro, 2003).....	45
Şekil 4.1	"Genleşmiş sekiz yüzlü" tensegrity sistemde temel denge (Motro, 2003) .....	47
Şekil 4.2	"saat yönü" ve "saat yönü tersi" çevrilmiş sistem (Motro, 2003) .....	49
Şekil 4.3	Kesik Dörtüzlü.....	50
Şekil 4.4	Kuralsız Triplex Tensegrity (Motro.R. 2003).....	53
Şekil 4.5	Düzensiz Triplex Tensegrity (Motro, 2003) .....	53
Şekil 4.6	"Üç Çubuklu Triplex" tensegrity sistem.....	55
Şekil 4.7	Sonsuz küçük mekanizma (Motro,R. 2003) .....	56
Şekil 4.8	Uygulanan ön germe kuvveti (Motro,R. 2003) .....	56
Şekil 4.9	Uygulanan basınç kuvveti (Motro,R. 2003) .....	56
Şekil 5.1	Çeşitli tensegrity sütunlar (Furuya,H. 1990) .....	58
Şekil 5.2	Katlanabilir tensegrity sütun (Furuya, 1990).....	58
Şekil 5.3	Üçgen prizma tensegrity hücrenin analizi .....	59
Şekil 5.4	Yanal kabloların sabit tutulması yöntemi (Furuya, 1990) .....	60
Şekil 5.5	Tensegrity strüktürün hareket sırası (Furuya, 1990).....	61
Şekil 5.6	a) Sarmal strüktür b) Zig-zag Strüktür (Furuya, 1990).....	61
Şekil 5.7	Hareketli sarmal tensegrity strüktür modeli (Furuya, 1990) .....	62
Şekil 5.8	Çift tabakalı tensegrity strüktürün hareket yönü (Motro, 2003).....	62
Şekil 5.9	Çift tabakalı tensegrity strüktürün hareket yönüne göre oluşan zincir (Motro, 2003) .....	63
Şekil 6.1	Farklı düğüm noktaları ile oluşturulmuş tensegrity ızgara (Motro, 2003) .....	65
Şekil 6.2	R.B.Fuller'in tasarladığı "Tensegrity Kubbe" .....	65

Şekil 6.3	D.Geiger'in tasarladığı "Tensegrity Kubbe" .....	66
Şekil 6.4	Hiper Tensegrity Kubbe .....	66
Şekil 6.5	"Hiper Tensegrity Kubbe" planı ve kesiti .....	67
Şekil 6.6	Rostok Tensegrity Kulesi .....	68
Şekil 6.7	La Plata Stadyum .....	68
Şekil 6.8	Tensegrity Kemer ve Membran Sistem .....	69
Şekil 6.9	R.B.Fullerin Tasarımları: Tensegrity kule, Jeodezik kubbe .....	69
Şekil 6.10	Tensegrity Mobilya .....	70



## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1	Basit tensegrity sistemde elemanların listesi (Üçgen Prizma).....	21
Çizelge 3.2	Simplex tensegrity sistemler (Rombik birleşim) (Motro, 2003) .....	28
Çizelge 4.1	Uzaysal ağ görünümlü sistemlerin sınıflandırılması .....	55



## ÖNSÖZ

Mimarlık Yüksek Lisans araştırma çalışmamız için seçtiğimiz "Tensegrity Sistemler", gelecekte birçok alanda kullanılacak, günümüzde örneği az bulunan, uzaysal yapım teknolojilerinde yeni bir çağ açacak niteliği olduğunu düşündüğümüz ve üzerine yenilikler ekleyebileceğimiz bir yapı sistemidir.

"Tensegrity Sistemler" in araştırılması ile elde edilecek yeni yapım teknolojilerinin, ülkemizde ve dünyada ki yapı sektörü, uzay araştırmaları gibi alanlarda, sistemin hafif, geniş açıklık geçebilme özelliklerinden dolayı kullanımı çok faydalı olacaktır.

Çalışmayı hazırlarken, tensegrity sistemler ile ilgili çalışmaların azlığı, Türkçe kaynak olmaması, sistemin temel prensiplerinin kavranması, sistemin tasarımının tamamen bilgisayar ortamında gerçekleştirilebiliyor olması karşılaştığımız güçlüklerdi.

Tezimi oluşturmamdaki bu süreçte, danışmanlığı ve yapıcı eleştirileri için öncelikle Sayın Prof. Dr. Görün Arun'a ve her zaman bana destek olan Sevgili Aileme teşekkür ederim.



## ÖZET

Uygarlıklar ve kültürler geliştikçe teknoloji de gelişmektedir. Teknolojinin gelişmesi, toplumların sosyal ve kültürel yaşamının her alanını etkilemiştir. Bu etkileşimle birlikte yoğun nüfuslu toplumlar, belki içgüdüsel tutkularını tatmin etmek, belki doğal ihtiyacını karşılamak amacı ile ileri teknoloji kullanarak büyük açıklıklar geçen binalar ve gökyüzüne uzanan gökdelenler inşaa etmeye başlamıştır.

Gelişen teknoloji ile birlikte ortaya çıkan uzaysal yapım teknikleri, insanlığın eski tarihlerde hayal bile edemediği seviyelere ulaşmıştır.

Tensegrity sistemler, henüz gelişmekte olan uzaysal, kablo ağı görünümünde ileri teknoloji gerektiren sistemlerdir.

1948 yılında Bilim adamı R.B.Fuller tarafından bahsedilen “Tensional İntegrity”, gelecek yapım sistemlerine yön verecek önerilerde bulunmuştur. Çubuklar ve kabloların tutarlı bir geometri ile oluşturduğu, doğru tasarlanmış ve hassas statik hesapları yapılmış tensegrity sistemler, geniş açıklık geçebilen yapım sistemlerindendir.

Tensegrity sistemlerin karmaşık yapısı ve mekanizması, ancak bilgisayar yazılımları ile çözümlenmektedir. Geleneksel hesaplama yöntemleri ile sistemin mekanizmasını çözmek çok güçtür. Günümüz teknolojisi ile tensegrity sistemlerin gerek işleyiş mekanizması gerek strüktür tasarımı çalışmaları çok rahatlıkla yapılabilmektedir.

“Tensegrity”, bazı bilim adamları tarafından bir yaşam felsefesi olarak kabul edilir. Tensegrity felsefesinin en önemli prensibi “denge” dir. Tensegrity felsefesinin kabul ettiği bu dengenin tüm evrende ve dünyada var olduğu iddia edilmektedir.

Tensegrity sistemlerin inşaat sektöründeki ve uzay teknolojisi alanındaki yerinin ne olacağını belirlemek için bu sistemlerin işleyiş mekanizmasının ve oluşum prensiplerinin çok iyi kavranması gerekir. Bu çalışmada, tensegrity sistemlerin tarihi, tanımları, temel kavramları ve sınıflandırılması gibi başlıca konular incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Tensegrity, iç gerilme, denge, uzaysal sistemler, ağı görünümlü sistemler

## ABSTRACT

Development of the civilization and culture influence the technology in the course of time. With this influence, civilizations have built wide-open spaced structures to satisfy both their instinctive nature and their necessity and constructed wide spread and highrise buildings.

The construction techniques of spatial structures have developed to inconceivable levels that mankind ever imagine.

Tensegrity structures, that are still under development, are spatial and hi-tech systems. In 1948, "Tensional Integrity" mentioned by R.B.Fuller, have opened a new way to future construction systems. Tensegrity systems made of struts and cables and are designed with careful statical and mecanical methods, are systems that can span wide areas.

Computer softwares are used to analyse the complicated configuration and mechanism of tensegrity structures. Traditional methods can no longer help in analysing this kind of systems. With todays computer softwares, it is possible to solve the mecanism of tensegrity structures.

Some scientists express that tensegrity is a philosophy of the natural life. "Equilibrium" is the most important philosophy of tensegrity systems. It is expressed that all universe has equilibrium in a circle of life.

To design a space with hi-tech tensegrity structures, principles of the self-stressed equilibrium, and mecanism has to be well understood. In this study, the history of tensegrity systems, fundamental concepts and typology criterias are examined.

**Keywords:** Tensegrity, self-stressed equilibrium, spatial structures, cable structures, hi-tech systems

## 1. GİRİŞ

### 1.1 Problem

Günümüzde kullanılan bina yapım teknolojilerinin, yapım sürecinde ve bina kullanım aşamasında çözülmesi gereken yüksek maliyet, uzun tasarım süreci, yapım süreci ve strüktür ağırlığı gibi sorunları vardır. Son yıllarda geliştirilen asma-germe, uzay kafes, şişme yapı gibi sistemler, bu sorunlara belli sınırlar doğrultusunda çözüm getirmektedir. Yapım sistemlerinin sorunlarını en aza indirecek yeni yapım sistemleri araştırılması ve geliştirilmesi gereklidir.

Tensegrity sistemler, henüz gelişmekte olan, uzaysal ağ görünümlü, geniş açıklık geçebilen hafif strüktürlerdir. Tesadüf eseri ortaya çıkmış bu sistemin tanınması, temel prensiplerinin kavranması ve bina yapım teknolojisinde kullanılabilirliğinin araştırılması gerekmektedir.

### 1.2 Amaç

Bu çalışmada amaç; tensegrity sistemlerin tanıtılması, sınıflandırılması ve var olan örneklerin incelenmesi ile mevcut yapım teknolojilerinin sorunlarını giderecek, daha geniş açıklıklar geçebilen, rijit, hafif ve kontrol edilebilir hareket mekanizması olan “yeni uzaysal bina yapım teknolojileri” elde edilebileceğinin araştırılmasıdır.

### 1.3 Kapsam

Tensegrity sistemlerin tanıtılmasında; sistemi oluşturan en küçük birimin ve temel prensiplerin incelenmesi doğrultusunda yapılan sınıflandırma, en küçük hücrelerin birleştirilmesiyle elde edilen yeni taşıyıcı sistemleri, bu taşıyıcı sistemlerin yapı ve yapı elemanları oluşturması ve mevcut sistemlerin incelenmesi, bu çalışmanın kapsamını oluşturmaktadır.

### 1.4 Yöntem

Çalışma, kaynak taraması yapılarak tensegrity sistemlerin ortaya çıkış sebepleri, tarihi, temel prensipleri öncelikle incelenmiştir. Tensegrity sistemlerin en önemli olgusu “denge prensibi” üzerinde durulmuştur. Temel prensiplerle oluşturan en küçük birim “Tensegrity Simplex” ile, bu birimlerden oluşan yeni sistemlerin tanımlanması ve sınıflandırması yapılmıştır.

Tensegrity sistemlerin tasarımı için gerekli olan form bulma yöntemleri araştırılmıştır. Form bulma yöntemleriyle ortaya çıkan yeni sistemlerin sınıflandırması yapılmıştır.

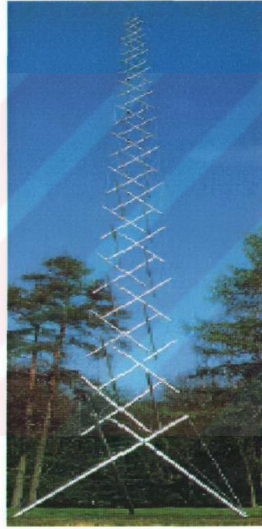
Hareketi kontrol edilebilir mekanizması olan tensegrity sistemler ve deney uygulama projeleri incelenmiştir. Mevcut tensegrity sistemler incelenerek, çalışma sonlandırılmıştır.



## 2. TENSEGRITY SİSTEMLER

### 2.1 Tensegrity Sistemlerin Tanımı

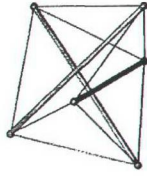
1940'lı yıllarda, Bilim Adamı R.B.Fuller'in üzerinde çalışmaya başladığı tensegrity sistemler, R.B.Fuller'in araştırmalarını yakından takip eden Kenneth Snelson adlı bir heykeltıraş öğrencisinin, çubuklar ve kablolar ile yaptığı heykelden ortaya çıkmıştır. K.Snelson, çubuklar ile kabloları farklı açılarda birbirlerine bağlayarak ayakta ve dengede duran bir yapı tasarlamıştır (Şekil 2.1). R.B.Fuller sistemin, yapı strüktürü oluşturabileceğini fark etmiş ve üzerinde yoğun çalışmalar başlatmıştır.



Şekil 2.1 K.Snelson'un heykeli "Needle Tower" (IASS,Sayı:43)

"Tensegrity" sözcüğü, "tension" ve "integrity" sözcüklerinin birleşiminden oluşur. "tension" çekme gerilmesini "integrity" de bütünlüğü ifade eder. Tensegrity, çekmeye çalışan elemanlar ile basınca çalışan elemanların oluşturduğu bir "Gerilmeler bütünlüğü" sistemidir.

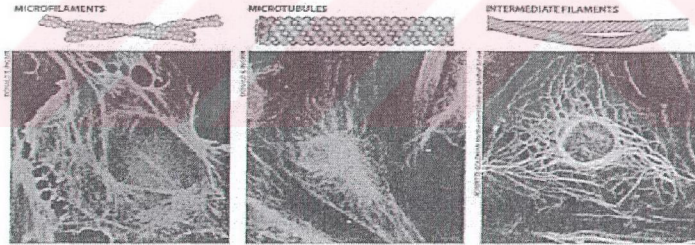
Araştırmalar sonucunda tensegrity sistemler için "Çekme gerilmelerinin sürekliliği ile basınç gerilmelerinin süreksizliği sonucu oluşan, uzayda dengeye sahip sistemlerdir." tanımı yapılmıştır. Tüm evrende bir denge sistemi hakimdir. Tensegrity olgusunun da en önemli özelliği denge prensibidir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Basit tensegrity sistem ve temel denge

Bazı bilim adamları tensegrity sistemlerin, birçok doğal ve doğaya özgü oluşumun bir parçasını ifade ettiğini öne sürmüştür. Örnek olarak; yaşayan organizmaların hücresel yapısı tensegrity prensibine uymaktadır. Hücrelerin birleşimleri jeodezik formları, jeodezik formlar da tensegrity sistemleri oluşturur. Bu moleküler birleşimler çok sağlam ve esnek yapıya sahiptir (Şekil 2.3).

Tensegrity olgusunun getirdiği dengeler birliğine, insan anatomisinde de rastlanmaktadır. İnsan iskeletinde, kasların oluşturduğu sürekli çekme kuvveti ile basınç elemanı olarak davranan kemiklerin süresiz birleşimleri tensegrity sistemleri oluşturur.



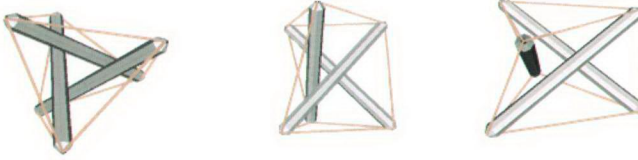
Şekil 2.3 Moleküler birleşimler (Motro,2003)

Tensegrity sistemler uzaysal sistemlerdir. Çubuklar ve kabloların belli açılarla birleşimleri, kablo ağı görünümünde sistemler oluşturur.

Tensegrity sistemler asma-germe ve şişme (pnömatik) sistemlerle bazı benzer özellik gösterir.

Tensegrity sistemlerde, kabloların oluşturduğu sürekli çekme gerilmesinin etkisi altında, birbirleri ile kesişmeyen ve sistem içinde süresizliği olan çubuklar, sistemde bir "iç gerilme dengesi" oluşturur.

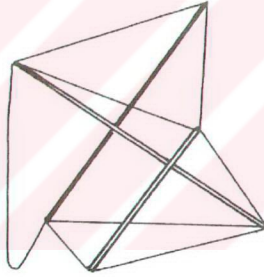
Tensegrity sistemler, sınıflandırma ve form bulma yöntemleri ile geliştirilmiştir. Ortaya çıkan en basit tensegrity sisteme “Tensegrity hücre” denir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Tensegrity hücre

## 2.2 Tensegrity Sistemlerin Tarihsel Gelişimi

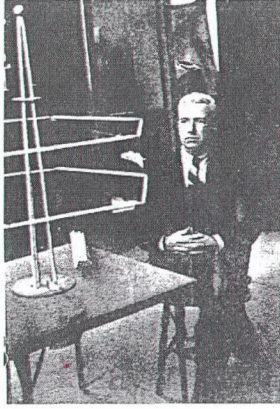
Tensegrity prensibine yakın bilinen ilk çalışma Rus sanatçı Karl İoganson'un 1920 yılında yaptığı “Heykel Strüktür” adlı eseridir. Bu çalışması ile ilgili patent almadığı için bilimsel kayıtlara geçmemiştir (Şekil 2.5).



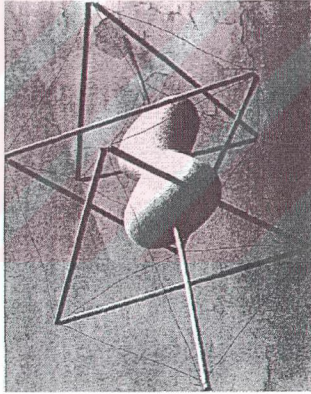
Şekil 2.5 K.İoganson'un heykeli (Motro, 2003)

“Tensegrity” sistemlerin isim babası olan bilim adamı R.B.Fuller, “Tensional Integrity” (Gerilmeler Bütünlüğü) üzerine uzun çalışmalar yapmıştır.

R.B.Fuller 1927 yılında, bir direğe asılmış çift kablo çember ile dengede duran bir strüktür tasarlamıştır (Şekil 2.6). Bu tasarımı, tensegrity sistemlerin temel prensiplerini ortaya koyan ilk çalışmasıdır. 1943 yılında yaptığı diğer bir çalışma ise strüktürel bütünlük ilkesini yansıtmaktadır (Şekil 2.7).



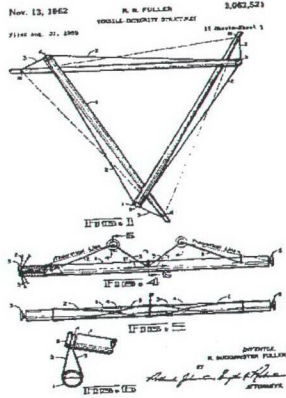
Şekil 2.6 R.B.Fuller'in yaptığı tensegrity strüktür (Sadao,S.1995)



Şekil 2.7 R.B.Fuller'in "Naguchi Garden" müzesindeki "Bucky" adlı heykeli (Sadao, 1995).

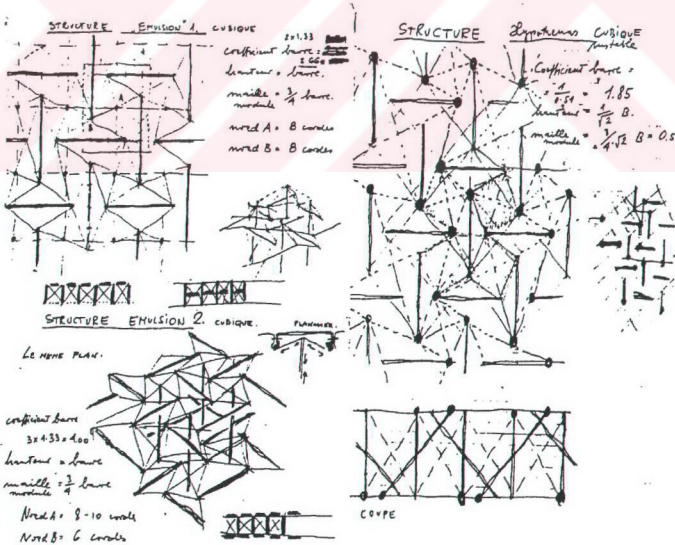
R.B.Fuller, ilk tescilli projesini 1959'da geliştirmiş; 1962 yılında patentini almıştır (Şekil 2.8).

R.B.Fuller, tensegrity sistemleri için "Gerilim okyanusu içindeki basınç adaları" tanımlamasını yapmıştır.

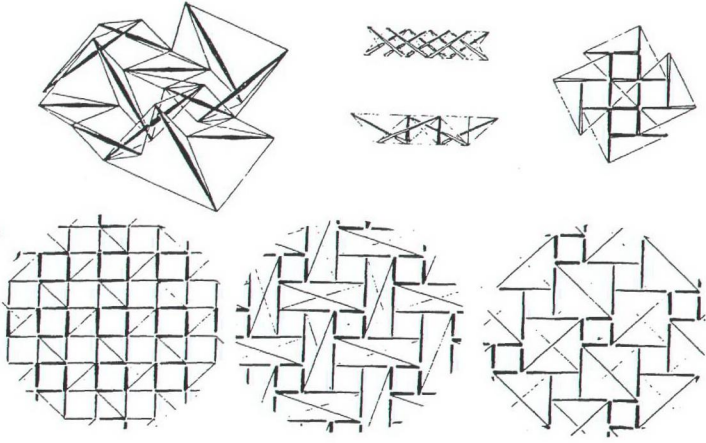


Şekil 2.8 R.B.Fuller'in aldığı patent (Sadao, IASS-Vol:11-1996)

1960 yılında bilim adamı D.G.Emmerich, tensegrity prensibine benzeyen çalışmalar yapmıştır. Fakat yaptığı model, bugünün tensegrity prensibine uymamaktadır (Şekil 2.9). İki yıl sonra, çubuklar ve kabloların bir bütün oluşturarak, kendi kendine dengede duran bir sistem elde etmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.9 D.G.Emmerich'in yaptığı (başarısız) denemeler (Emmerich, 1995)



Şekil 2.10 D.G.Emmerich'in 1959 yılının sonlarına doğru geliştirdiği (başarılı) sistem (IASS,Sayı:11,1996)

D.G.Emmerich, tensegrity prensibi ile ilgili çalışmasının ilk patentini 1963 yılında almıştır (Şekil 2.11). D.G.Emmerich, yaptığı bu modellerle, otomatik germe; başka bir deyişle sistemin kendi kendini germe durumunu ortaya koymuştur. Sistemin bu davranışına Fransızca "Autotendants" tanımlanmıştır.

<b>BREVET D'INVENTION</b>	
MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE	P.Y. n° 931.099
SERVICE	N° 1.377.290
de la PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE	Classification internationale : E 04 b
Construction de réseaux autotendants.	
M. DAVID GEORGES EMMERICH résidant en France (Seine).	
Demandé le 10 avril 1963, à 15 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup> , à Paris.	
Delivré par arrêté du 28 septembre 1964.	
(Bulletin officiel de la Propriété industrielle, n° 45 de 1964.)	
(Brevet d'invention dont la délivrance a été ajournée en exécution de l'article 11, § 7, de la loi du 5 juillet 1844 modifiée par la loi du 7 avril 1902.)	

N° 1.377.290

M. Emmerich

Pl. unique

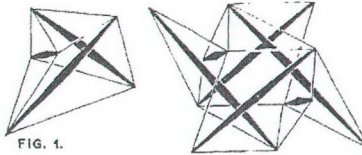
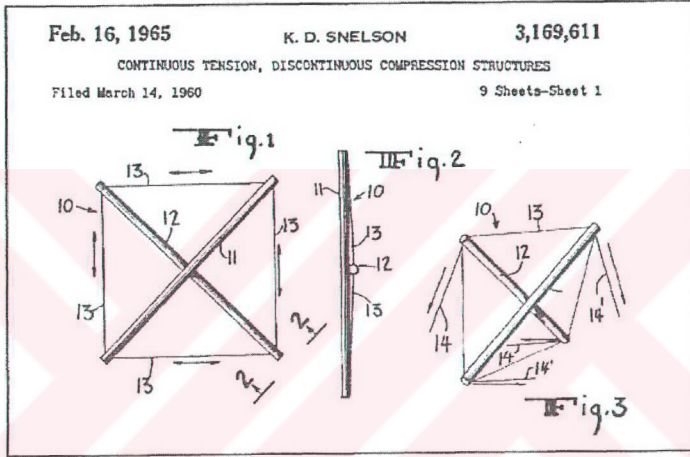


FIG. 1.

Şekil 2.11 D.G.Emmerich'in aldığı patent. (Motro, 2003)

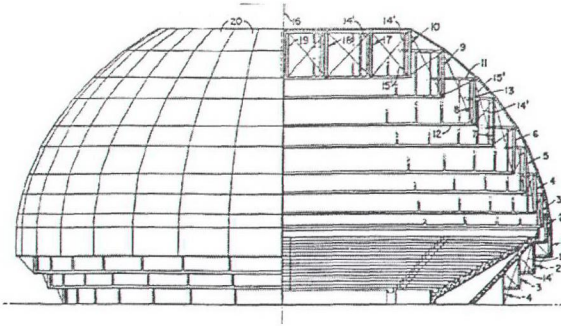
R.B.Fuller'in çalışmalarını yakından takip eden heykeltıraş öğrencisi Kenneth Snelson, bu prensiplerle 1948 de üç küçük model heykel yaparak R.B. Fuller'e danışmıştır. Bu çalışmalar sistemlerin denge şartlarını araştırmaya yöneliktir. K.Snelson, R.B.Fuller ile birlikte sistemi geliştirerek 1965 yılında tensegrity sistemlerin temel prensiplerini açıklayan ilk patenti almıştır (Şekil 2.12). Tensegrity Sistemlerin temel prensiplerinin daha iyi kavranması için K.Snelson'un Fuller'e sunduğu çalışmaların incelenmesi gerekir. K.Snelson'un çalışmaları Ek 1'de verilmiştir.



Şekil 2.12 K.Snelson'un aldığı patent (Motro, 2003)

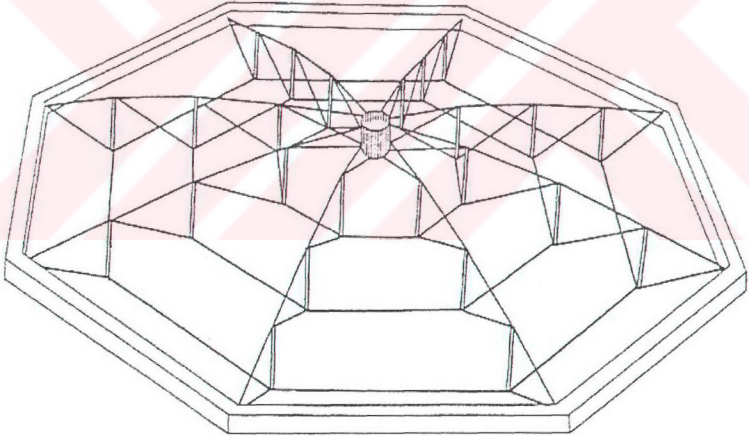
K.Snelson'un patentinin başlığı "Sürekli çekme gerilimi ile süreksiz basınç gerilmesi altındaki yapılar"dır. Tensegrity sistemlerin temel prensiplerini açıklayan bu tanımlama ile Heykeltıraş K.Snelson Tensegrity sistemleri keşfeden kişi olarak bilim tarihine geçmiştir.

Tensegrity sistemlerin yapı strüktürü olarak kullanımının ilk deneme projesi R.B.Fuller tarafından gerçekleştirilmiştir. "Aspension Dome" adını verdiği bu proje, çekme kabloları ve basınç çubukların oluşturduğu basınç halkalarının birleşiminden meydana gelen kubbeden oluşmuştur (Şekil 2.13).

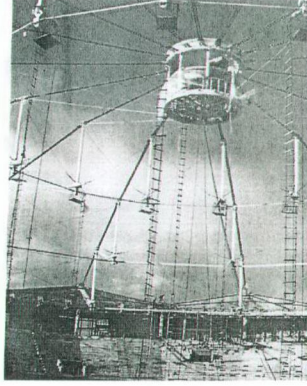


Şekil 2.13 R.B.Fuller'in tasarladığı "Aspention Dome" (Çizim:A.B.D.Patent Dairesi)

Tensegrity prensiplerini içeren ilk proje, Mühendis D.Geiger tarafından uygulanmıştır. 1988 yılında Seul olimpiyatları için tasarladığı stadyum çatısını oluşturan tensegrity kubbe, 1989'da tamamlanarak hizmete girmiştir. (Şekil 2.14-2.15).



Şekil 2.14 D.Geiger'in tasarladığı kubbe (Çizim:Geiger Mühendislik)



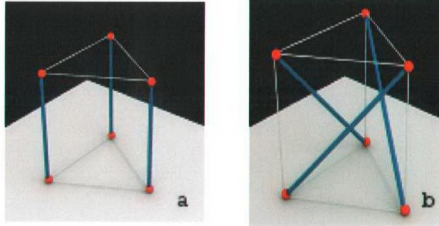
Şekil 2.15 “Geiger Kubbesi” detay, 1988 Seoul (Fotoğraf: Geiger Mühendislik)

### 2.3 Tensegrity Sistemlerin Temel Kavramları

#### 2.3.1 Bağlı Strüktür

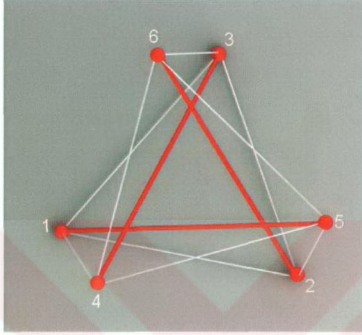
Tensegrity sistemler, birbirlerine bağlı birçok kablo ve çubuğun birleşimi sonucu ortaya çıkan ağ biçiminde strüktür oluşturur. Buna “Bağlı Strüktür” denir.

İlk bağlı strüktür, form bulma yöntemleri sonucu ortaya çıkmıştır. Sistemi oluşturmak için kullanılan geometri üçgen prizmadır. Prizmanın kenarlarını basınç çubukları, alt ve üst tabanı çekme kabloları oluşturmaktadır. Oluşan bu strüktür stabil değildir. Çubuklar ve kablolarda kuvvet iletimi olmadığı için tensegrity prensiplerine uymamaktadır. (Şekil 2.16a). Çubuklar üçgen prizmanın yan yüzeyleri üzerinde belli açı yaparak çapraz konumlandırılırsa çubuklar ve kablolarda kuvvet iletimi oluşmaktadır. Fakat bu sistem stabil olmayıp, dengede durmamaktadır (Şekil 2.16b).

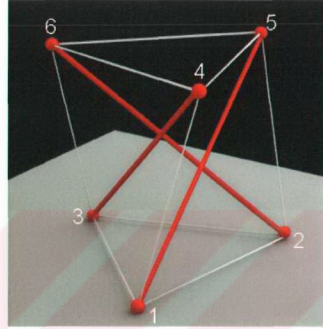


Şekil 2.16 Üçgen prizma geometrisi kullanılarak yapılan strüktür.

Tensegrity prensibine uyan strüktür, prizmanın ağırlık merkezinden geçen aks çevresinde saat yönünde veya saat yönünün tersine, prizmanın herhangi bir üçgen yüzeyinin sabit tutularak en az 30° çevrilmesi ile oluşturulur (Şekil 2.17). Buna “Basit tensegrity hücre” (Simplex) denir. Birbirini kesmeyen basınç çubukları, çekme kablolarının oluşturduğu iç gerilme sayesinde rijit ve dengededir. Bu sağlam denge, hücrelerin tutarlı bir geometri oluşturmasına bağlıdır.



a) Plan izdüşümü

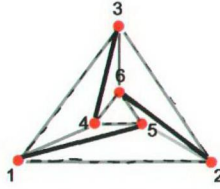


b) Perspektif

Şekil 2.17 30° çevrilerek oluşturulan “prizmatik tensegrity hücre”

Bağıl strüktürde kablo sayısı “ $c$ ”, kablo uzunlukları “ $c_{i,j}$ ”, düğüm noktaları “ $d_1, d_2, d_3, \dots, d_i$ ”, düğüm noktaları arasındaki uzaklık “ $d_{i,j}$ ”, çubuk sayısı “ $t$ ”, çubuk uzunlukları “ $t_{1-2}, t_{2-3}, t_{3-4}, \dots, t_{i-j}$ ” ve düğüm noktası sayısı “ $n$ ” olarak ifade edilir. Tensegrity sistemler en az üç çekme kablosu ve bir basınç çubuğunun düğüm noktalarında birleşmesi ile oluşur. Çubuk ve düğüm noktaları sayısı tensegrity sistemleri karakterize eder. Bu sistemler uzaysal olduğuna göre üç çubuklu basit tensegrity hücrenin düğüm noktası sayısı  $n=2xt=2x3=6$ , kablo sayısı  $c=3xt=3x3=9$  dur.

Sistem içindeki elemanların sürekliliği ve süreksizliği ilkelerini, bağıl strüktür kavramını daha rahat algılamak için düşey izdüşümde çubuklar kesişmeyecek şekilde grafikleyen “Düzlem Grafik Teoremi” yöntemi ile düğüm noktaları arasındaki ilişki açıklanır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 Grafik yöntemi ile çizilmiş prizmatik üç çubuklu tensegrity hücre (Kalın çizgiler basınç çubuklarını, ince çizgiler çekme kablolarını, kırmızı noktalar düğüm noktalarını ifade etmektedir.)

### 2.3.2 Tensegrity Hücrelerin Geometrisi ve Sağlamlığı (Rijitlik)

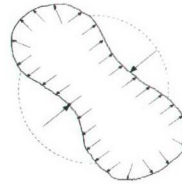
Uzaysal kablo ağı görünümündeki tensegrity sistemler,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  düzleminde ifade edilir. Rijit tensegrity sistemlerin geometrilerini araştırmak için üç boyutlu ortamda "Form bulma" yöntemleri uygulanarak sistemin mekanizması araştırılır.

Balon örneği, tensegrity sistemlerinin geometrisi ve denge prensipleri arasındaki ilişkiyi basitçe göstermektedir. Balona şeklini veren, içerdeki havanın oluşturduğu itme ile balonun membran yapısıdır. Vektörel kuvvetler dağınık etki etmekte ve sistem, iç basıncın dış basınca eşit olması ile dengede durur. Balon deforme olmadan ya da patlamadan sabitliğini korur. Balonun membran yapısı tek tabakalı ve küresel bir form oluşturur. Burada hava, basınç elemanı, balonun membran yapısı da çekme elemanı olarak davranır (Şekil 2.19a).

Balonda oluşan iç ve dış kuvvetler homojen dağılım göstermez ise tutarsız formlar oluşur. Bunlara "tanımsız" ya da "sonsuz" formlar denir (Şekil 2.19b).



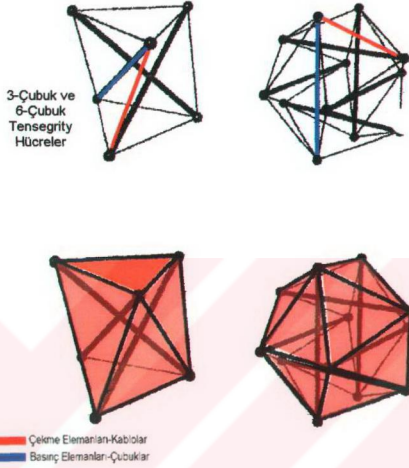
a)



b)

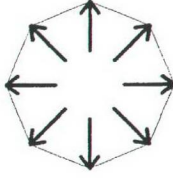
Şekil 2.19 Balonun içinde oluşan kuvvetler

Tensegrity sistemler, form bulma çalışmaları ve sınıflandırma ölçütlerine göre incelendiğinde, çubuk ve kabloların sistemdeki birleşim şekilleri sistemin geometrisini belirler. Çubuk sayısı arttıkça tensegrity sistemlerin oluşturduğu çok yüzlü geometri, düğüm noktalarının oluşturduğu üç boyutlu yüzey, küresel form meydana getirir (Şekil 2.20).

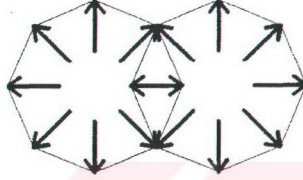


Şekil 2.20 Tensegrity sistemler

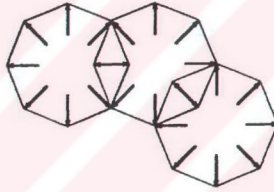
Tek tabakalı tensegrity hücrelerin birbirleri ile birleşmesi sonucu “Çift tabakalı tensegrity sistemler” oluşur. (Şekil 2.21). Grafiklerde gözlendiği gibi tensegrity sistemler, iç kuvvetlerin oluşturduğu basınç etkisi ile “şişme” (Pnömatik) yapılara, çekme kabloların oluşturduğu germe kuvvetlerinin etkisi ile “asma-germe” yapılara benzer özellik göstermektedir. Grafikte kalın çizgili oklar basınç elemanlarını, ince çizgi ile gösterilen dış çerper de çekme elemanlarını ifade etmektedir. (Şekil 2.21).



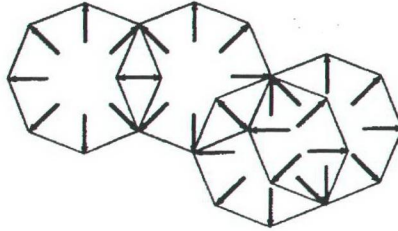
Tek Tabakalı Hücre



Çift Tabakalı Tensegrity Sistem



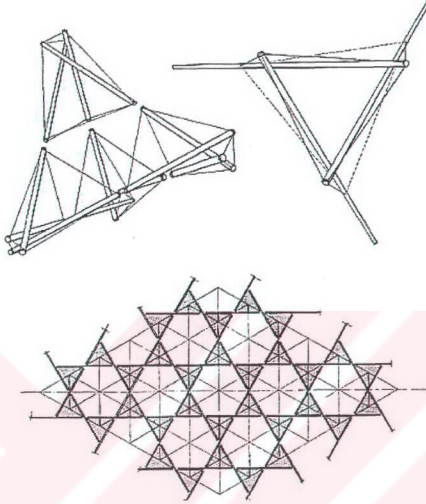
Tek Eğrilikli Çift Tabakalı Tensegrity Sistem



Çift Eğrilikli Tensegrity Sistem

Şekil 2.21 "Çift Tabakalı Tensegrity Sistemler" in oluşum şeması

Tensegrity sistemlerin strüktür tasarımında, şişme, uzay kafes ve asma-germe sistemlerle benzer özellik gösterdiğinin bilinmesi birçok morfolojik ve teknolojik yeni sistemlerin ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 “Çift Tabakalı Tensegrity Sistem” (<http://www.rwgrayprojects.com>)

### 2.3.3 Tensegrity sistemlerin kendi iç gerilmesi ile oluşan rijitlik ve mekanizması

Cisimler, hareketi doğuran kuvvetler etkisi altında yer değiştirir. Çok küçük yer değiştirmeler ihmal edilebilir. Bu cisimlere “katı cisimler” denir. Fakat tensegrity sistemlerde, küçük şekil değiştirmeler sistem içinde büyük deformasyonlara yol açtığı için ihmal edilemez. İhmal edildiği durumda statik ve mekanik belirsizlik ortaya çıkar. Statik belirsizliği önlemek için sisteme ön germe kuvvetleri uygulamak gerekir.

Tensegrity sistemlerin bileşenleri arasında kuvvet iletimi söz konusudur. Kuvvet iletimi sonucunda, cisimlerin oluşturduğu mekanizmanın çözümü için “Kinematik” analiz yapmak gerekir. Kinematik, sisteme etkien dış kuvvetleri düşünmeksizin, bileşenlerin yer değiştirme geometrilerinin incelenmesidir.

Doğru tasarlanmamış tensegrity sistemler, kinematik açıdan belirsizdir. Kinematik analiz yapmak için sistemdeki tüm elemanların boyutları ve tüm düğüm noktalarının yer değişimi, çok küçük dahi olsa, biliniyor olması gerekir. Tensegrity sistemlerde bileşenlerin boyutları,

form bulma yöntemleri ile sonradan elde edilen değerler olduğu ve sistem içinde farklılıklar gösterebileceği için kinematik analizi ve çözümünü geleneksel metotlarla yapmak çok zordur.

Kinematik açıdan incelenen bir mekanizmanın, tüm elemanlarının konumunu ya da herhangi bir noktasının yerini belirlemek için gerekli bağımsız değişken olan “mekanizmanın serbestlik derecesi”nin değeri (F) biliniyorsa, mekanizma kinematik olarak belirlidir ve;

- Serbestlik derecesi  $F=1$  olan mekanizmalar
- Serbestlik derecesi birden büyük olan, ancak kontrol edilen parametre sayısının mekanik serbestlik derecesine eşit olduğu mekanizmalar

olarak tanımlanabilir.

Belirlenmiş olan parametre sayısının serbestlik derecesinden az olduğu durumlarda mekanizma kinematik olarak belirsizdir. Bu durumda mekanizmada bulunan elemanların hareketi sadece kinematik olarak değil, etki eden dış kuvvetler ve sistem dinamiği ile belirlenir. Kinematik diyagramda mekanizmanın hareketi açıkça izlenebilmelidir. Geometrik yapısı tanımsız (belirsiz) sistemler *kinematik* olarak belirsizdir.

Tensegrity sistemler uzaysal olduğu için bazı noktadaki elemanların konumu belirlense bile diğer noktadaki elemanların konumlarının geometrik bağlantılar ile saptanması çok zordur. Bu tip sistemlerin çözümü için bilgisayar destekli çalışmalar yapılması gerekir.

Kinematik zincirler, serbestlik derecelerine göre  $F \geq 1$  ise hareketli,  $F < 1$  ise kilitlenmiş fakat statik olarak belirsiz,  $F=0$  ise kilitlenmiş zincir statik olarak belirli bir yapıyı temsil eder. Eğer  $F = -1$  gibi değerlerde ise kinematik zincir statik olarak belirsizdir (Akçalı, 2002). Mekanizma tekniği ve kinematik ile ilgili detaylı bilgi Ek 4’te verilmiştir.

Rijit tensegrity sistemlerin, çubuklar ve kablolar arasında oluşan iç gerilme kuvvetleri ile dengede olmaları gerekir. Sistem mekanizmasının statik belirli olma zorunluğu vardır ( $F=0$ ).

Sistemin iç gerilmeler ile dengede durması, kablo “ $c_{i-j}$ ” ve çubuk “ $t_{i-j}$ ” uzunluklarının araştırılmasına bağlıdır. Kablo uzunluğu çubuk uzunluğundan fazlaysa ( $c_{i-j} > t_{i-j}$ ), kabloda gerilme yoktur, şekli belirsizdir.  $c_{i-j} = t_{i-j}$  ise, kabloda gerilme yoktur ve şekli doğrusaldır. Bu sistem geçersiz bir iç gerilme dengesi oluşturur.  $c_{i-j} < t_{i-j}$  ise kablo ve çubuklarda basit eksenel çekme ve basınç gerilmeleri oluşur.

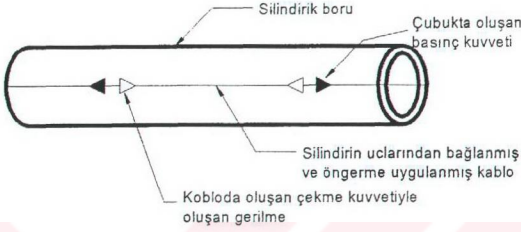
Tüm sistemin dengesi, iç gerilmeler olan  $N_t$  ve  $N_c$  ‘nin kesin değerlerinin eşitliğine bağlıdır. Sistem, iç gerilmeler sayesinde dengededir (Şekil 2.23).

Kablo ve çubuk uzunlukları oranı  $r = t_{i,j}/c_{i,j}$  sistemi karakterize eder:

Eğer  $r < 1$  ise oluşan şekil tanımsızdır (Kinematik olarak belirsiz.).

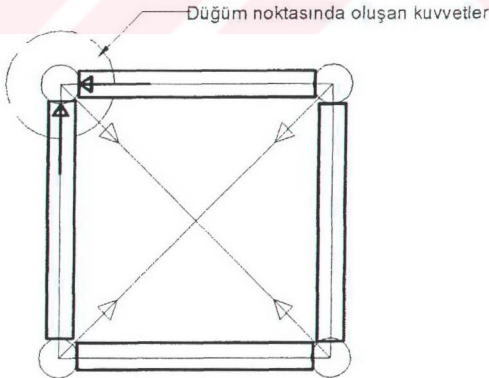
Eğer  $r = 1$  ise şekil tanımlı fakat geçersiz bir iç gerilme dengesi oluşur.

Eğer  $r > 1$  ise şekil tanımlı ve iç kuvvetleri sayesinde dengededir.



Şekil 2.23 Eksenal iç kuvvet dengesi

Eş uzunlukta dört basınç çubuğu ve iki çekme kablosuyla oluşturulmuş basit bir sistem ele alındığında “ $r$ ” oranının araştırılması gerekmektedir. Sistemde kabloların uzunlukları çubuklardan fazlaysa, sistem şekilsiz ve kinematik olarak belirsizdir. Ayrıca sistem dengede değildir. Çubukların uzunluğu kablolardan fazlaysa sistemde çekme ve basınç kuvvetleri oluşur ve sistem dengededir (Şekil 2.24). Kablolarda oluşan kuvvet değeri çubuklarda oluşan kuvvet değerinden daha büyüktür.



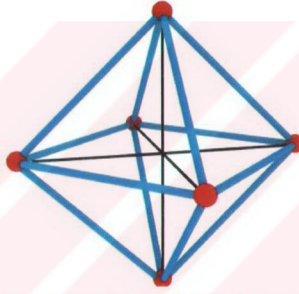
Şekil 2.24 İki boyutlu sistemde “İç gerilme” ile oluşan denge

Tensegrity sistemlerin denge eşitliği:

$$[A] \cdot \{t\} = \{0\} \quad (2.1)$$

Burada  $[A]$ , sistemin geometrik parametrelerine bağlı denge matrisi,  $\{t\}$  ise i gerilme vektörünü ifade etmektedir. Dış kuvvetlerin etkisi düşünölmeksizin, sistem içindeki vektörel kuvvetlerin bileşkesi sıfır değerini alıyorsa sistem dengededir.

Uzaysal sistemlerin denge şartını en iyi örnekleen geometri sekiz yüzlüdür (şekil 2.25). şekilde görölen sekiz yüzlü geometri bir tensegrity sistem değildir fakat üçüncü boyutta i gerilme dengesini en iyi örnekleen sistemdir. Çubukların keşiştiği noktaya etkiyen yükler çubuklar doğrultusunda bileşenlere ayırdığı için sistem sağlam ve dengededir.



şekil 2.25 Sekiz yüzlü geometride oluşan iç gerilmeler

### 3. ÇEŞİTLEMELER VE SINIFLANDIRMALAR

Tensegrity sistemlerin uzaysal sistemler olması, ağ görünümünde bir yapı oluşturması, asma-germe ve şişme sistemlerle benzer özellikler göstermesi, bu sistemlerin geliştirilmesinde en önemli etkidir.

Tensegrity sistemlerin sınıflandırılması için basit tensegrity hücreler ve bu hücrelerin birleşimlerinin incelenmesi gerekir.

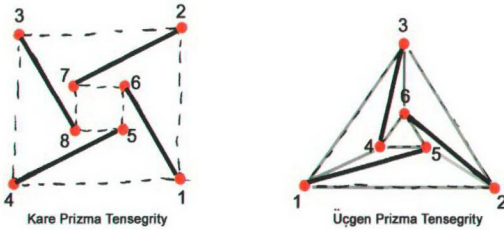
#### 3.1 Sınıflandırma Ölçütleri

Tensegrity sistemleri sınıflandırmak ve çeşitli formlar üretmek için sistemin temel özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bunlardan en önemlisi sistemdeki iç gerilme ile oluşan dengedir. Tensegrity sınıflandırma ölçütlerine uygun sistemlerde çubuklar birbirleri ile kesişmemelidir.

Diğer bir önemli sınıflandırma ölçütü, sistemdeki kablo (c), çubuk (t) ve düğüm noktası (n) sayısıdır. Bu değerler tensegrity hücreleri karakterize eder ve aynı zamanda form bulma çalışmalarında önemli rol oynamaktadır.

Sınıflandırma ölçütlerinde, tensegrity sistemlerin “bağıl strüktür” kavramının korunması gerekir. Herhangi bir elemanın eksilmesi, yerinin değişmesi veya uzunluk değerlerinin değişmesi sistemin bozulmasına neden olur. Bağıl strüktürde tüm elemanların başlangıç ve bitiş noktalarının parametrik değerlerinin bilinmesi gerekir.

Grafik teoremi yöntemi, tensegrity sistemlerin sınıflandırılmasında kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle, sistem içindeki elemanların birleşimleri doğrultusunda oluşan kuvvet iletimi gözlemlenir. Çekme ve basınç elemanları tespit edilir. Düğüm noktalarındaki kuvvet bileşikleri belirlenir. Dengeye duran sistemin geometrisi tanımlanır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Tensegrity sistemlerde bağıl strüktür ve temel denge grafiği

Çizelge 3.1 Basit tensegrity sistemde elemanların listesi (Üçgen Prizma)

Elemanlar	Kuvvet Tipi	Baş. Noktası	Bitiş Noktası
1	Basınç	1	5
2	Basınç	2	6
3	Basınç	3	4
4	Çekme	1	2
5	Çekme	2	3
6	Çekme	3	1
7	Çekme	1	4
8	Çekme	2	5
9	Çekme	3	6
10	Çekme	6	4
11	Çekme	4	5
12	Çekme	5	6

Sistemdeki düğüm noktalarının konumu, kablo ve çubuk uzunlukları,  $x_i, y_i, z_i$  koordinat sistemi ile tanımlanır.

Tensegrity sistemlerin geometrik tanımları iki önemli etmene bağlıdır:

- Sistem içindeki elemanların tümü aynı boyuttaysa, geometri çubuk ve kablo oranına bağlıdır. Bu sistemlere “düzgün” ya da “mono-parametrik” sistemler denir.
- Sistem içinde elemanlar birbirlerinden farklı boyutlardaysa, bu sistemlere “multi-parametrik” sistemler denir. Sistemin geometrisi tanımsız olabilir ve çubuk-kablo oranına bağlıdır.

Tensegrity sistemlerle, sonsuz geometrik formlar oluşturabildiği için, sınıflandırma çalışmalarında geometrisi tanımlı formlar kullanılması gerekir. Tensegrity hücrelerin küresel form oluşturduğu düşünülerek ilk olarak çok yüzlü (Polyhedra) geometriler ele alınmıştır.

Tensegrity sistemleri tanımlamak için gerekirse isimlendirme ve kodlama yöntemi uygulanır.

Kodlama ölçütleri şunlara bağlıdır:

- Düğüm noktası sayısı için “n”
- Çubukları sayısı için “ç”
- Kabloları sayısı için “k”
- Düzgün sistemler için “D”, değişken sistemler için “De”
- Küreye yakın geometri oluşturan sistemler için “KS”

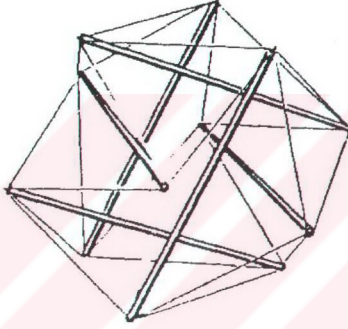
Semboller kullanılmaktadır. Örnek olarak, altı düğüm noktalı, 3 çubuklu, 9 kablolu, düzgün ve küresel basit tensegrity sistemin kod ismi “n6-ç3-k9-D-KS” dir.

### 3.2 Temel ve Küresel Tensegrity Hücreler

“Temel hücre” kavramı, maddenin atom yapısına çok benzer. Küresel formu ve bölünemez yapısı ile tek tabakalı bir sistem oluşturur.

#### 3.2.1 Küresel Hücreler

Küresel tensegrity hücrelerin sınıflandırılması, sistemi oluşturan kablolarla bağlıdır. Kablolar genellikle hücrenin dış çeperinde bulunur ve küresel geometri oluşturur. Basınç çubukları kablo kümesinin içinde yer alır. Bu hücelere “Küresel Hücreler” denir (Şekil 3.2).



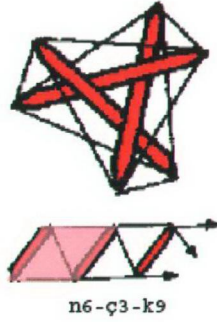
Şekil 3.2 Altı çubuklu “Küresel Tensegrity Hücre”

Küresel tensegrity hücreler elemanların birleşim konfigürasyonlarına göre üç bölümde incelenir:

- Eşkenar dörtgen birleşimler - prizmatik (simplex) hücreler.
- Döngüsel (devirsel) birleşimler - çok yüzlü hücreler.
- Z tipi (zig-zag) birleşimler - çok yüzlü hücreler.

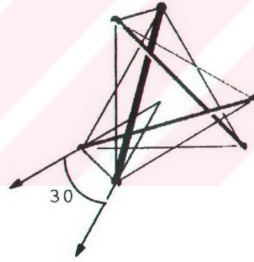
##### 3.2.1.1 Eşkenar Dörtgen Birleşimler ve Prizmatik Hücreler

Prizmatik hücreler, kenarlarını kabloların oluşturduğu prizmaların yanal yüzeylerine diyagonal yerleştirilen basınç çubukları ile oluşturulan sistemin merkez aksı çevresinde saat yönü veya saat yönü tersi çevrilmesi ile elde edilir. Sistemde çubuklarla kabloların birleşiminin açılımı eşkenar dörtgen veya baklava biçiminde izdüşüm oluşturur. Bu sistem “tensegrity hücreler”in en basit ve temel yapısıdır (Şekil 3.3 ).

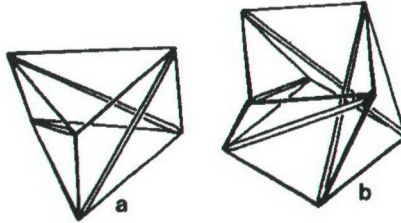


Şekil 3.3 Eşkenar dörtgen izdüşüm oluşturan birleşim

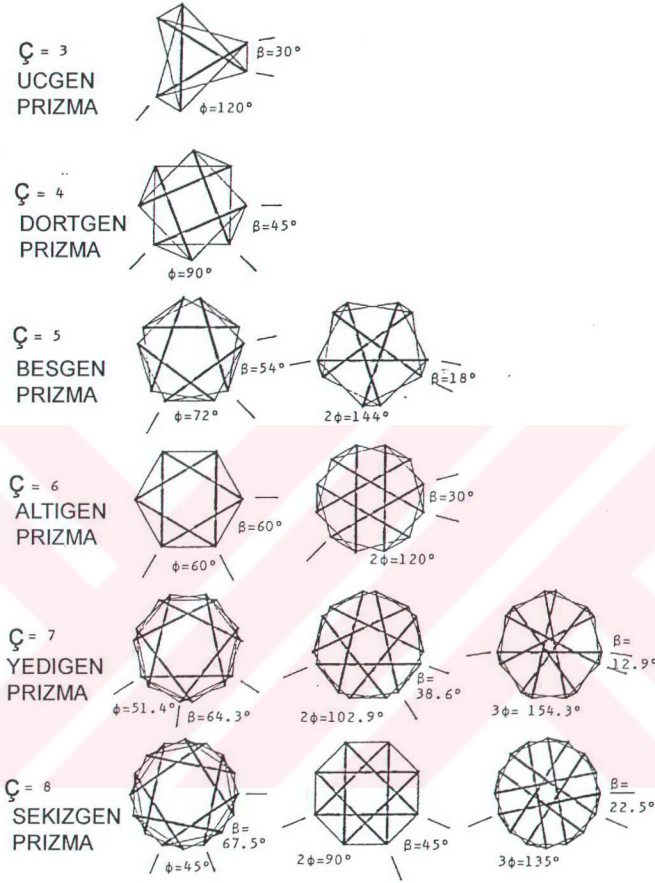
Çevirme açısı ( $\alpha$ ), form bulma yöntemleri sonucu ortaya çıkmıştır (Şekil 3.4). Sistemdeki otomatik germeyi sağlayan en küçük çevirme açısı  $30^\circ$  dir. Bu sisteme temel denge, düzgün hücre, çevrilmiş hücre..v.b. farklı isimler de verilmiştir (Şekil 3.5). Çubuk sayılarına göre “simplex” hücreler çeşitlilik gösterir (Şekil 3.6).



Şekil 3.4 Çevirme açısı  $\alpha = 30^\circ$

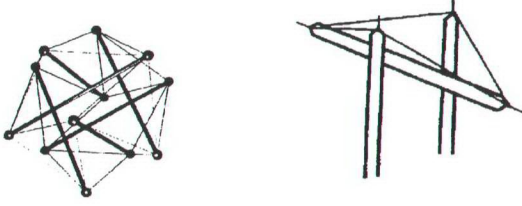


Şekil 3.5 a) Üçgen prizma b) Kare prizma

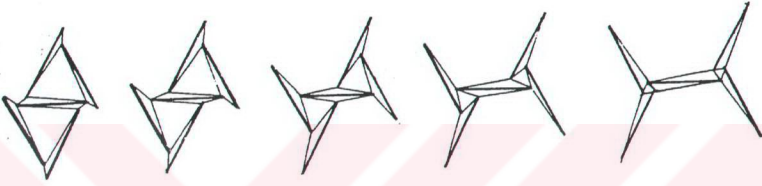


Şekil 3.6 "Simplex" hücrelerin plan izdüşümü

Eşkenar dörtgen birleşim (Rombik), prizmatik tensegrity sistemlerin temelini oluşturur. Prizmatik tensegrity hücreleri çubuk sayıları karakterize eder. Sistemin "çubuk-kablo" açılımı yapıldığında çubukların birbirlerine paralel olduğu görülür (Şekil 3.7). Temel denge prensibinin geçerli olması için, birbirlerine paralel olan iki çubuk arasındaki mesafenin, "çubuk uzunluğu/2" değerini alması gerekir.

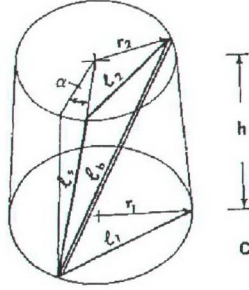


Şekil 3.7 Sekiz yüzlü geometri ve eşkenar dörtgen birleşim (Motro, 2003)



Şekil 3.8 Tensegrity sistemde baklava biçimli birleşim (Robert,1990)

Prizmatik hücreler “m” yüzlü birçok “çok yüzlü”den meydana gelebilir. Sistemde bir germe kuvveti oluşana kadar ya çubukların boyu uzatılır ya da kabloların boyu kısaltılır. Bu da sistemde bir ön germe oluşturur (Şekil 3.8).



Şekil 3.9 Prizmatik hücrelerin geometrik değerler grafiği (Hanaor,1990)

Çubukların uzunlukları  $L_b$ , kenar kabloların uzunlukları  $L_s$ , prizmanın alt ve üst tabanında bulunan kablo uzunlukları  $L_1$  ve  $L_2$ , sistemin tasarım parametrelerini oluşturur.

Polygonun yüz sayısı, tabanların yarı çapları " $r_1$ " ve " $r_2$ ", prizmanın yüksekliği " $h$ " olarak ifade edilirse, elemanların boyutları aşağıdaki formüller ile elde edilir (Şekil 3.9) (Motro, 2003):

$$L_b = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \cos(2\pi + \alpha) + h^2} \quad (3.1)$$

$$L_s = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2 \cdot r_1 \cdot r_2 \cdot \cos \alpha + h^2} \quad (3.2)$$

$$L_1 = 2r_1 \cdot \sin(\pi/n) \quad (3.3)$$

$$L_2 = 2r_2 \cdot \sin(\pi/n) \quad (3.4)$$

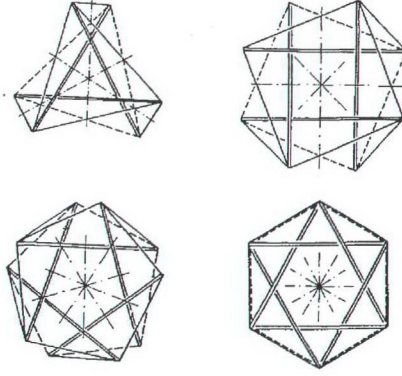
$L_s$  için  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $L_b$  parametreleri kullanılarak:

$$L_s = \sqrt{L_b^2 + 2r_1 \cdot r_2 \cdot [\cos(2\pi/n + \alpha) - \cos(\alpha)]} \quad (3.5)$$

$$\alpha \text{ değeri için: } \alpha = \pi/2 - \pi/n = \pi(n-2)/2n(\text{rad}) \quad (3.6)$$

yazılabilir.

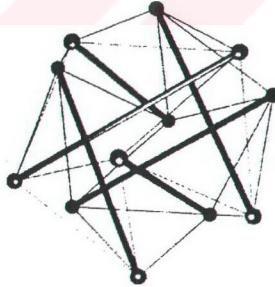
Dört önemli poligon için gerekli  $\alpha$  açıları; üçgen prizma için  $\alpha = 30^\circ$ , kare prizma için  $\alpha = 45^\circ$ , beşgen prizma için  $\alpha = 54^\circ$ , altıgen prizma için  $\alpha = 60^\circ$  dir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Saat yönü tersine çevrilmiş dört temel “Prizmatik Tensegrity”

Çevirme açısı ( $\alpha$ ), sistemin geometrisini ortaya çıkarır.  $\alpha$  açısı, sistemde gerilen kablo uzunluklarının en küçük değer aldığı durumda ölçülür. Kullanılan bu yöntemler sadece prizmatik oluşumlar için değil, aynı zamanda kesik piramit geometrili sistemlerde de kullanılır.

Diğer bir önemli tensegrity sistem de iki simplex'in bir araya gelmesi ile oluşur. Tek tabakalı olan simplex'lerin birleşimi, “çift tabakalı” tensegrity sistemleri meydana getirir. Bu birleşimlerde ekstra kablolar kullanılır (Şekil 3.11).

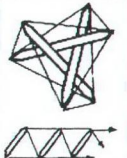
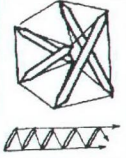
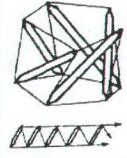
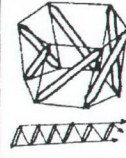

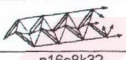
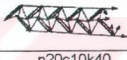
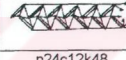






Şekil 3.11 Genleşmiş Sekiz yüzlü (Morto,R.2003)

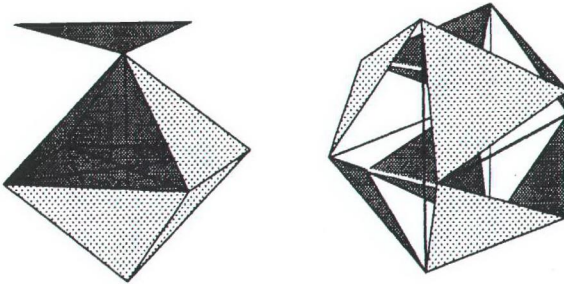
Örn: Altı çubuklu tek tabakalı tensegrity sistemde kablo sayısı on sekizdir. Bu sistemin kod ismi “n12ç6k18D”dir (Çizelge 2.2). Altı çubuklu çift tabakalı tensegrity sistemde yirmi dört adet kablo vardır (sisteme fazladan altı adet kablo eklenmiştir). Bu sistemin kod ismi

“n12ç6k24-D-KS”dir. Böylece yirmi yüzlü, çok yüzlü geometrik form meydana gelir. Yirmi yüzlüyü oluşturan dış yüzeyler her zaman birbirlerine benzer özellik göstermeyebilir. Fakat oluşan bu sistem düzgün yirmi yüzlüdür.

Çizelge 3.2 Simplex tensegrity sistemler (Rombik birleşim) (Motro, 2003)

			
n6c3k9	n8c4k12	n10c5k15	n12c6k18
TEK SIRALI TENSEGRİTY SİSTEMLER			
			
n12c6k24	n18c8k32	n20c10k40	n24c12k48
CİFT SIRALI TENSEGRİTY SİSTEMLER			
			
n18c9k36	n24c12k48	n30c15k60	n36c18k72
ÇOK SIRALI TENSEGRİTY SİSTEMLER			

Düğü yirmi yüzlü geometriyi elde etmenin diğer bir yöntemi ise, sekiz yüzlü geometrinin köşegenlerinden keserek genişletilmesidir. Meydana gelen sisteme “Genleşmiş sekiz yüzlü” denir (Şekil 3.12).

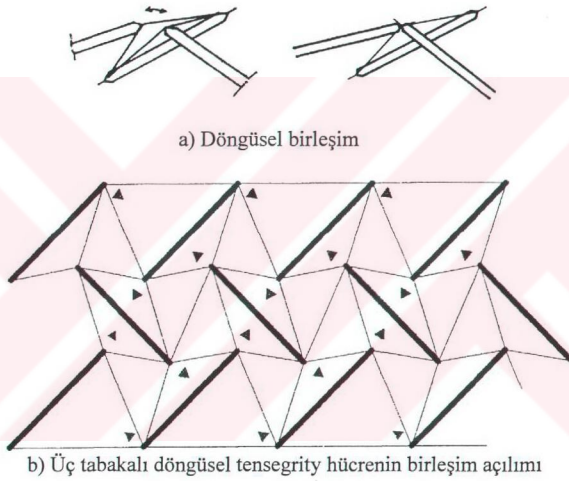


Şekil 3.12 Köşegenlerden kesilerek ayrılan yüzeyler (Motro,R.2003)

### 3.2.1.2 Döngüsel (Devirsel) Birleşimler ve çok yüzlü hücreler

Döngüsel hücreler, “rombik” birleşimler ile oluşmuş tensegrity hücrelerin, bu yapısını kaybederek denge döngüsü içinde, çubuk uçlarının bir noktada birleşmesi ile meydana gelen sistemlerdir. Basınç elemanlarının sistem içindeki yapısı değişerek, kabloların oluşturduğu sürekliliğin farklı bir döngüsel birleşim meydana getirir.

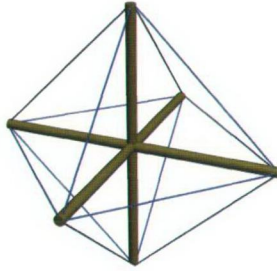
Düğüm noktalarında çubukların birleşimi, tensegrity sistemlerin temel özelliği ile çelişmekte gibi görünse de, birleşen Çubuklar tek bir basınç elemanı olarak çalışır. Kablo sayısı yarıya düşer. Fakat sistem içindeki iç gerilme dengesi korunur (Şekil 3.13)



Şekil 3.13 “Döngüsel Birleşim” ve “Birleşim açılımı”

Tensegrity hücrelerin, denge şartını sağlaması için, bilinen düzgün çok yüzlü geometrilerin araştırılması gerekir. Bunlardan en önemlisi basit sekiz yüzlüdür. Basit sekiz yüzlü, küresel tensegrity sistemlerin temel geometrisidir.

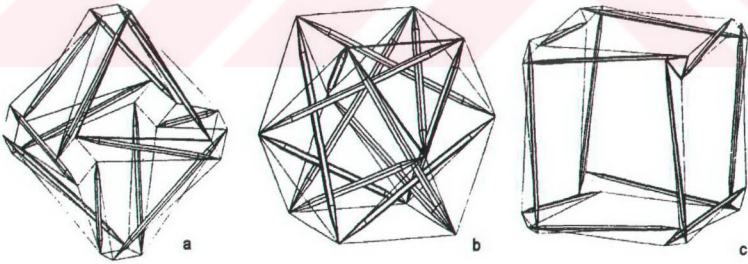
Basınç çubukları, basit sekiz yüzlü geometrinin içinde birbirleri ile kesişir durumda çapraz olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.14). Çekme kabloları da geometrinin kenarlarını oluşturur. Gerilmiş kablo kümesi içinde yer alan çubukların sıkışması sonucu oluşan iç gerilme, sistemde temel dengeyi meydana getirir.



Şekil 3.14 Sekiz yüzlü döngüsel tensegrity sistem

Basit sekiz yüzlü geometri, “rombik” döngüsel sistemlerin ortaya çıkmasına yardımcı olmuştur. Bu sistemlerden ilki “kübik sekiz yüzlü”dür (Cuboctahedron). Kübik sekiz yüzlü içinde dört adet basınç çubukları bileşkesi bulunur. Çekme gerilmesini meydana getiren yirmi dört kablo, geometrinin kenar çizgileridir.

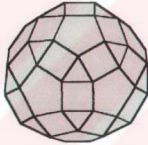
En basit döngüsel hücre, üç tabakalı, tabakaların her biri dört basınç çubuğu içeren sistemden oluşur. Form bulma çalışmaları sonucu ortaya çıkan bu geometri “Kübik sekiz yüzlü”dür (cuboctahedron). Çubuklar, önceki tensegrity hücrelerdeki gibi tek değildir, sistem içinde dört adet üçgen şeklindedir ve bu üçgen bir basınç elemanı olarak davranır (Şekil 3.15b).



Şekil 3.15 Tensegrity sekiz yüzlü oluşumları (Robert, 1996)



a) octahedron (sekizyuzlu)

b) cuboctahedron  
(kubiksekizyuzlu)c) icosidodecahedron  
(yirmiyuzlu)d) Rhombicuboctahedron  
(Rombikkubiksekizyuzlu)e) Snubcube  
(Geniskubiksekizyuzlu)f) Small rhombicuboctahedron  
(Kubikrombiksekizyuzlu)g) Snubicosahedron  
(Genisyirmiyuzlu)

Şekil 3.16 Döngüsel Birleşimli Tensegrity Sistemler

Kübik sekiz yüzlü (Şekil 3.16 b) ve yirmi yüzlü (Şekil 3.16 c) geometriler, temel dengeye sahip, düzgün döngüsel tensegrity sistemlerdir. Çok yüzlü geometrilerin çeşitlenmeleri yapıldığında kübik, yarı-düzgün veya düzgün olmayan çok yüzlü döngüsel tensegrity sistemler elde edilebilir. Döngüsel birleşimle oluşmuş tensegrity sistemler için temel olarak kullanılan çok yüzlü geometriler octahedron (Sekiz yüzlü-6 çubuklu), cuboctahedron (kübik sekiz yüzlü-12 çubuklu), icosidodecahedron (yirmi yüzlü-30 çubuklu) dur.

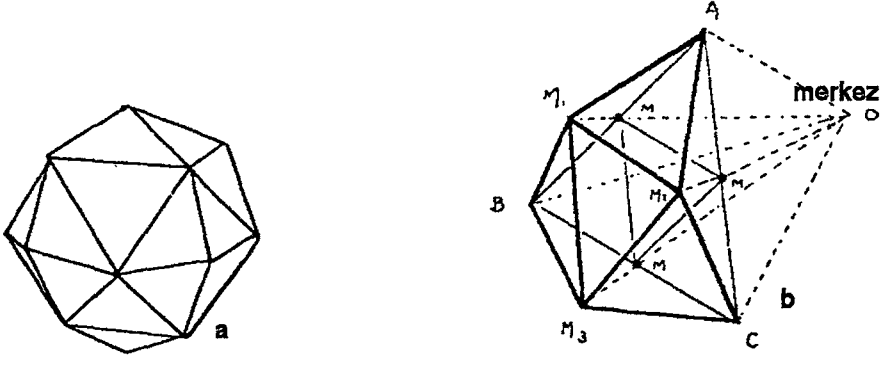
Rombik kübik sekiz yüzlü (Şekil 3.16 d-e) ve rombic yirmi yüzlü (Şekil 3.16 f-g) gibi geometriler kullanılarak türetilen tensegrity sistemlerde temel dengeyi sağlamak için oluşturulan döngü, çok yüzlü geometrinin yüzeylerinde deformasyona neden olur. Bu sistemler, deformasyon sonucu, ilk geometriden farklı bir forma ulaşır (Şekil 3.16 d-e, 3.16 f-g). Bu sistemlerin denge şartı araştırıldığında, tasarımda kullanılan küçük rombic kübik sekiz yüzlü, sistemin dengede durmasını sağlayan geniş kübik sekiz yüzlüye dönüşür. Döngüsel birleşimle oluşan küçük rombic yirmi yüzlü geometri, geniş yirmi yüzlüye dönüşür. Bu dönüşümlerde oluşan deformasyonu önlemek ve ilk geometriyi korumak için, sistemi stabilize eden tamamlayıcı kablolar eklenebilir.



Şekil 3.17 a) sekiz yüzlü b) bölünmüş sekiz yüzlü

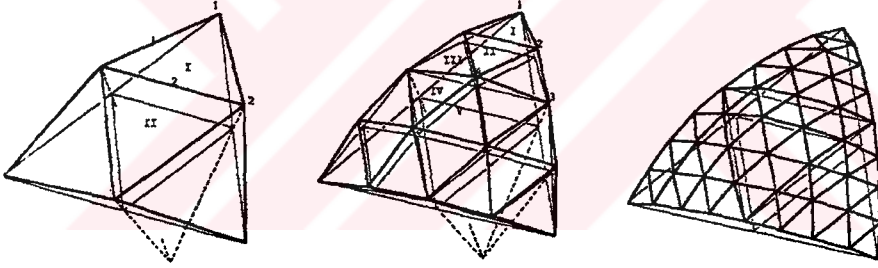
Çok yüzlü geometrilerin üçgen veya dörtgen yüzeylerinin sistematik bölünerek sayısının artırılması ile “jeodezik” formlar elde edilir (Şekil 3.17). R.B.Fuller, bu yöntemi kullanarak döngüsel birleşimle oluşturulmuş jeodezik tensegrity kubbeler tasarlamıştır. Tensegrity kubbe tasarımını geliştirmek için düzgün sekiz yüzlü gibi, basit çok yüzlü geometrileri kullanmıştır.

Düzgün sekiz yüzlü geometrinin sekiz eşit üçgen yüzü vardır. Üçgen yüzlerin kenarlarının orta noktalarından geçirilen doğrularla yüzeyler dört eşit üçgen parçaya bölünmüş olur. Otuziki küçük üçgen yüzeyden meydana gelen geometri, tensegrity hücrelerde ifade edildiği gibi küresel değildir. Bunun nedeni, uç noktaların ve kenarların orta noktalarının, sekiz yüzlü geometrinin merkez noktasına olan farklı uzaklıklarıdır (Şekil 3.18). Merkezin uç noktalara olan uzaklığı “ $r_1$ ”,  $r_1=1$  değerini alırsa merkezin kenar orta noktalarına olan uzaklığı, “ $r_2$ ”=0.7071 olur. Geometrinin küresel olması için  $r_1=r_2=1$  değerini alması gerekir. Bölünmüş sekiz yüzlü geometrinin tüm noktalarının merkeze olan uzaklığı eşitlendiğinde düzgün küresel sekiz yüzlü elde edilmiş olur.



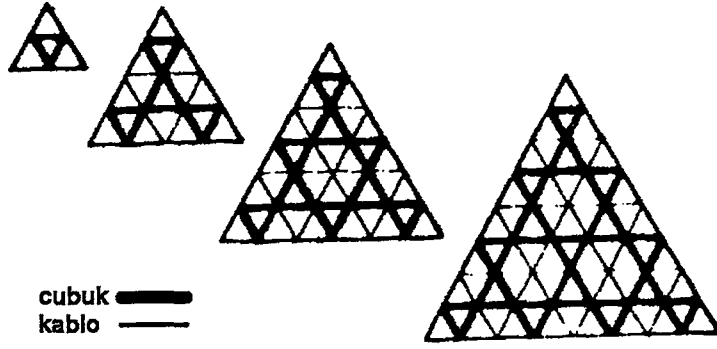
Şekil 3.18 a) Genleşmiş sekiz yüzlü b) Düğüm noktalarının çok yüzlü geometrinin merkezine uzaklığı

Yüzeyler, belli bir katsayı ile bölünmeye devam edilirse daha hassas küresel formlar elde edilir (Şekil 3.19). Bu bölme katsayısına “Bölme frekansı” denir, ve “ $v$ ” ile ifade edilir. Sekiz yüzlü geometrinin her kenarını iki eşit parçaya bölerek elde edilen otuz iki üçgen yüzeyden meydana gelen geometriye “iki frekanslı sekiz yüzlü” denir. Bölme frekansı artırılarak farklı jeodezik formlar elde edilebilir.



Şekil 3.19 Bölünme katsayısı

Jeodezik tensegrity kubbelerde üçgen yüzeyleri meydana getiren tensegrity hücreler, döngüsel birleşimle meydana gelmiş tensegrity sistemlerdir (Şekil 3.20). Kablo ve çubuk dağılımı bir modüler ızgara oluşturur . Her düğüm noktasında dört bağlantı elemanı birleşir.

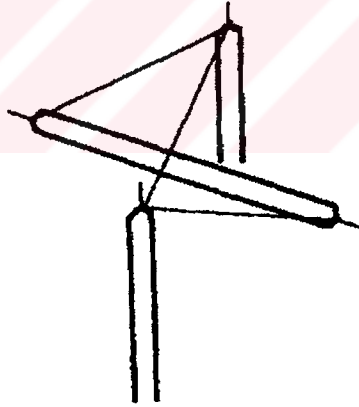


Şekil 3.20 Kablo ve çubukların jeodezik ızgara üzerindeki dağılımı

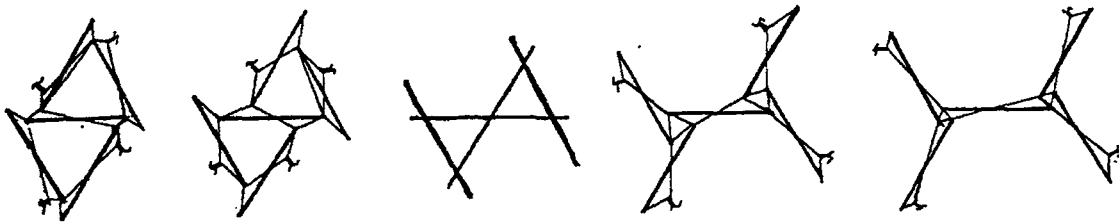
### 3.2.1.3 “Z” tipi (zig-zag) Birleşimli Tensegrity Sistemler

Döngüsel birleşimle oluşmuş tensegrity sistemlerde çubuklar düğüm noktalarında birleşmektedir. Zig-zag birleşimde döngüyü korumak için, birbirlerinden ayrı duran çubuklar arsına z şeklini çizen kablo birleşimi uygulanır (Şekil 3.21).

Zig-Zag birleşimle oluşmuş tensegrity sistemlerin en önemli özelliği, düğüm noktalarında en fazla üç çekme kablosu bulunmasıdır (Şekil 3.22).

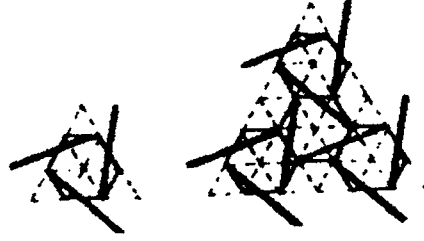


Şekil 3.21 Z tipi birleşim prensibi

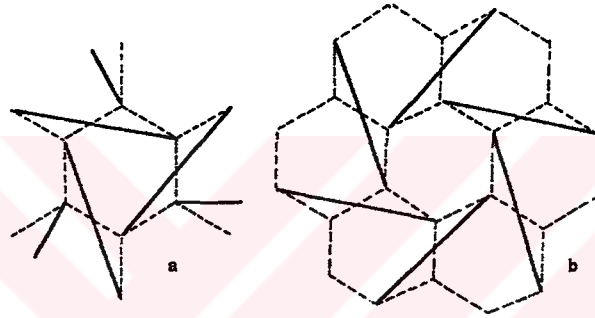


Şekil 3.22 Zig-zag birleşimler

Z birleşimli çok yüzlü tensegrity sistemlerin oluşumunda modüler örgü düzeni elde edilir. Her bir örgü birimi üç ana birleşim noktasından meydana gelir (Şekil 3.23). Birleşimler altıgen izdüşüm içinde yer alır. Şekil 3.24'de görüldüğü gibi iki farklı şekilde birleşim oluşabilir.

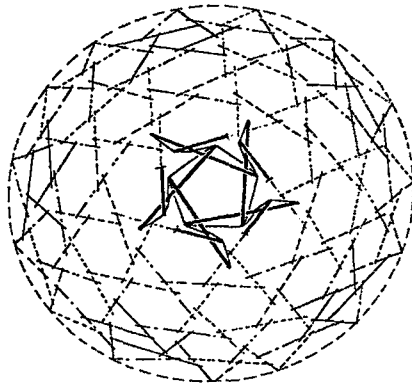


Şekil 3.23 Jeodezik zig-zag örgü modülü



Şekil 3.24 İki farklı altıgen örgü

Bu modüler örgü, düzgün çok yüzlü geometrilerin yüz sayısı çoğaltılarak elde edilen jeodezik tensegrity sistemleri meydana getirir (Şekil 3.25). Birleşim özelliği nedeni ile jeodezik geometrinin bölünme frekans katsayısı üçün katlarıdır.



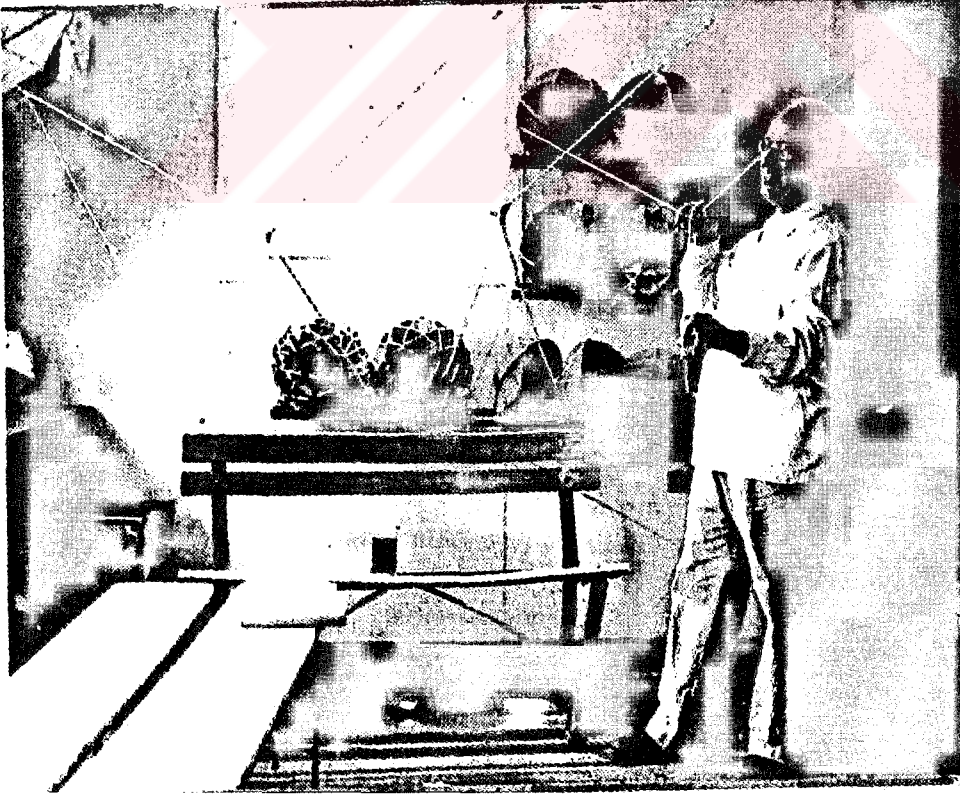
Şekil 3.25 Zig-zag birleşimli jeodezik tensegrity küre

### 3.3 Hücrelerin Birleşimleri ve Çift Tabakalı Tensegrity Sistemler

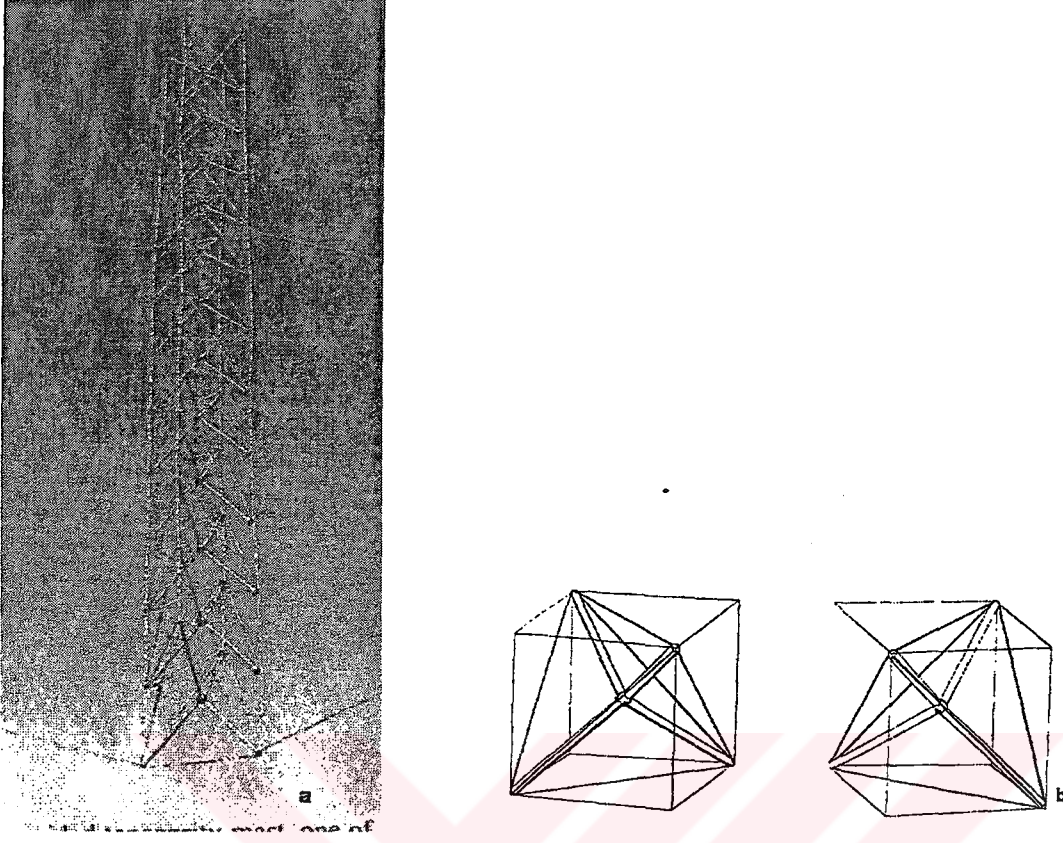
Kompleks tensegrity sistemler, basit tensegrity hücrelerin tanımlanmış prensipler doğrultusunda birleştirilmesi ile ortaya çıkar. Hücrelerin birleşimlerinde sistemdeki temel denge konumu korunmalıdır.

Basit hücreler ile oluşturulmuş kompleks tensegrity birleşimler, sistemdeki kablo ve çubuklar aynı uzunluktaysa “düzgün”, farklı uzunluktaysa “dağınık” birleşimlerdir. Her iki koşulda oluşan sistem, tek tabakalı basit hücrelerin bir araya gelmesi ile oluşturulan “Çift Tabakalı Tensegrity Sistemler”dir.

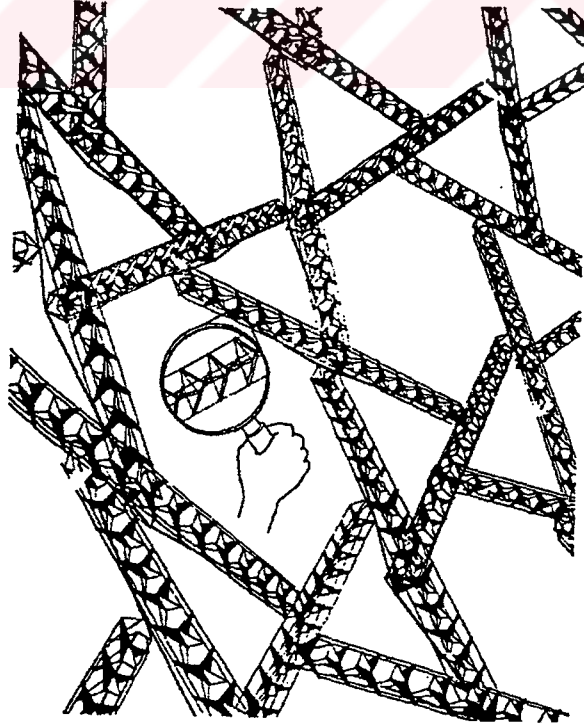
Hücrelerin birleştirilmesi ile ilgili ilk teoriyi R.B.Fuller öne sürmüştür. Sanat öğrencisi K.Snelson’un yardımı ile 1949 da bir tensegrity kolon modeli yapmıştır (Şekil 3.26). R.B.Fuller bu çalışmasında pozitif ve negatif tensegrity hücre adını verdiği iki stabil model yapmış, kare prizma sınırları içerisinde ters-simetrik duran “V” şeklindeki basınç çubuklarını kablolarla bağlayarak sistemin dengede durmasını sağlamıştır. Pozitif ve negatif hücreleri üst üste birbirlerine bağlayarak tek doğrultulu tensegrity kolon elde etmiş (Şekil 3.27), bu tek doğrultulu elemanlarla farklı strüktür tasarımları yapmıştır (Şekil 3.28).



Şekil 3.26 R.B.Fuller’in yaptığı ilk tensegrity kolon modeli

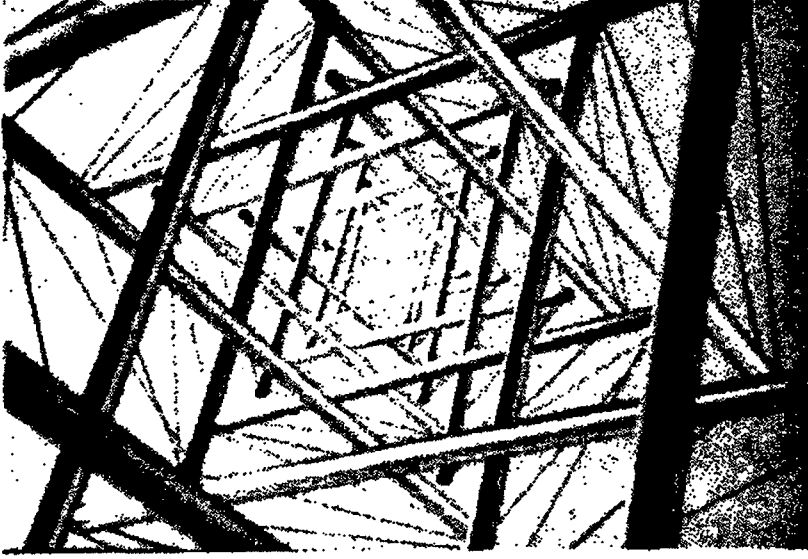


Şekil 3.27 a) Tensegrity kolon b) pozitif ve negatif tensegrity hücre



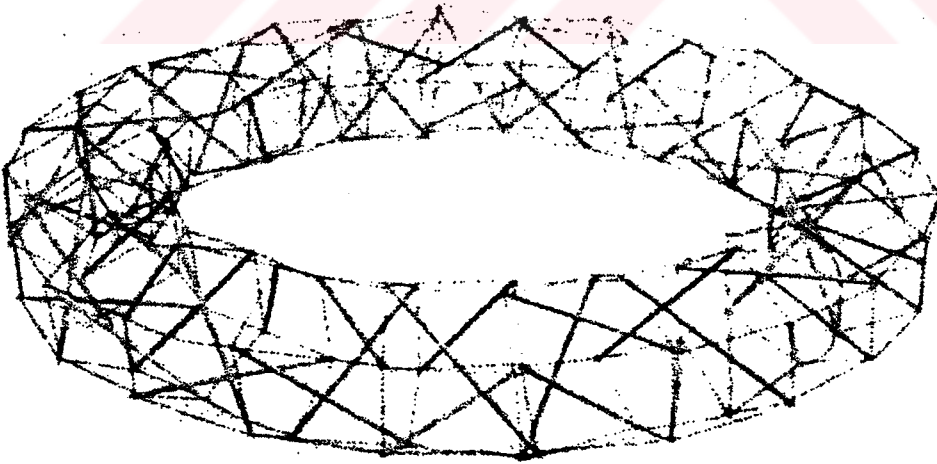
Şekil 3.28 R.B.Fuller'in tensegrity kolonları birleştirerek yaptığı farklı bir strüktür tasarımı

K.Snelson, R.B.Fuller'in çalışmasından sonra tek doğrultulu (Doğrusal) tensegrity strüktürlere örnek "İğne kulesi" adlı ünlü çalışmasını tasarlamıştır (Şekil 3.29).

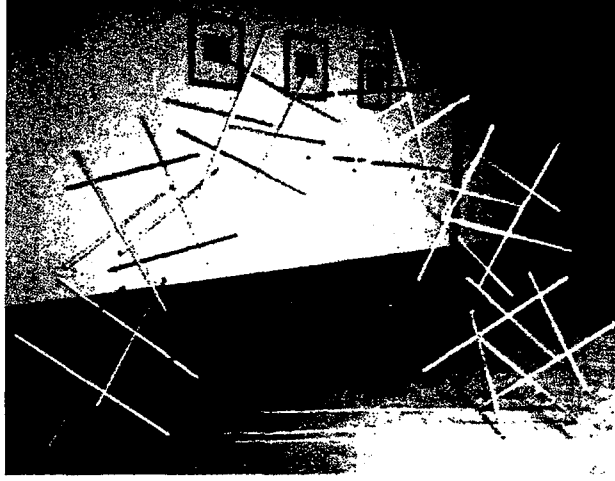


Şekil 3.29 İğne kulesi (Needle tower) (Motro, 2003)

Bilim adamı D.G.Emmerich'in iki öğrencisi, eğrisel doğrultulu tensegrity strüktür geliştirmiştir. Geliştirilen bu strüktürler "torus" (Şekil 3.30), "yay" (Şekil 3.31), "kemer" şeklinde olup, simplex hücrelerin birleşiminden oluşturulmuştur.

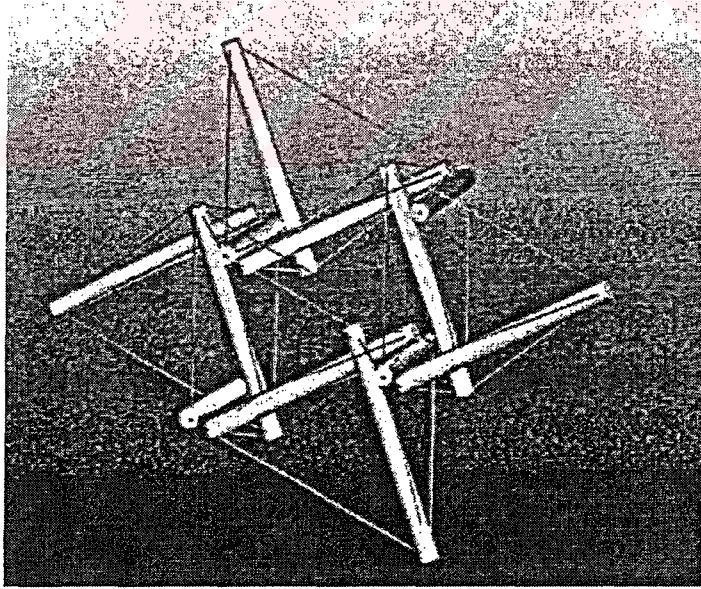


Şekil 3.30 Tensegrity "Torus"



Şekil 3.31 Altı genişmiş sekiz yüzlü (octahedron) tensegrity hücreden oluşmuş yay strüktür

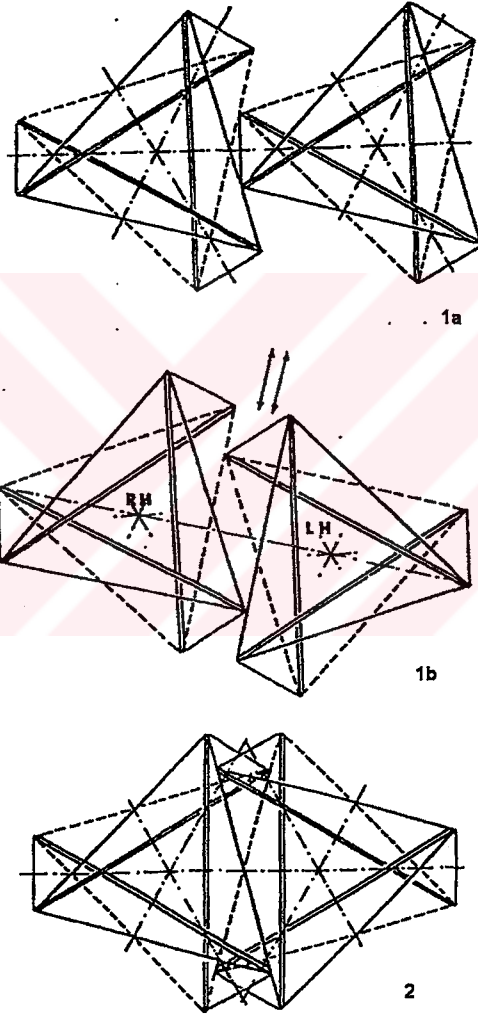
Hücrelerin birleşiminde “düğüm-düğüm”, “düğüm-kablo”, “kablo-kablo” bağı gibi birçok yöntem kullanılır. Düğüm-düğüm bağı birleşimlerinde, çubuklar birleştiği için tam tensegrity prensibi kaybolur. Bunu önlemek için birbirine bağlanacak iki hücrenin, ortak yakın düğüm noktalarına fazladan kablolar eklenerek düğüm-kablo bağı yapılı (Şekil 3.32).



Şekil 3.32 Düğüm-kablo birleşimi ile oluşmuş çift tabakalı tensegrity sistem

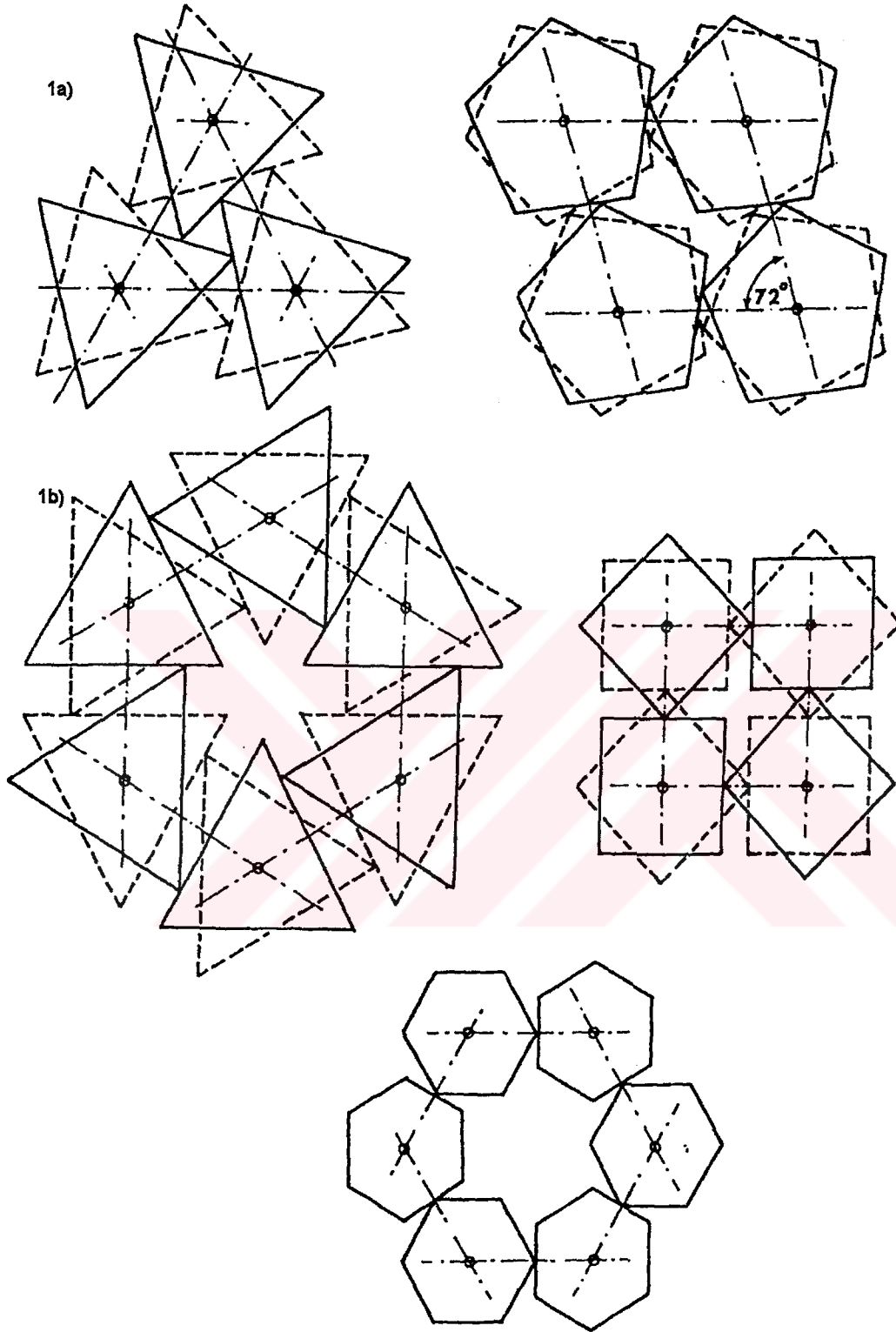
Temel tensegrity hücrelerin yatay düzlemde birleştirilmesi ile “Düzlem Çift Tabakalı Tensegrity Sistemler” meydana gelir. Temel birleşimler, tensegrity prizmalar ve ya piramitler ile yapılır. İki çeşit birleşim yöntemi vardır (Şekil 3.33).

- Birleşen hücreler sadece düğüm noktalarını paylaşır. Hücreler uç noktalarda birleşir. İzdüşümleri birbirleri ile kesişmez.
- Hücrelerin izdüşümleri birbirleri ile kesişir. Birleşen hücreler, birbirlerinin kablolarını paylaşır.



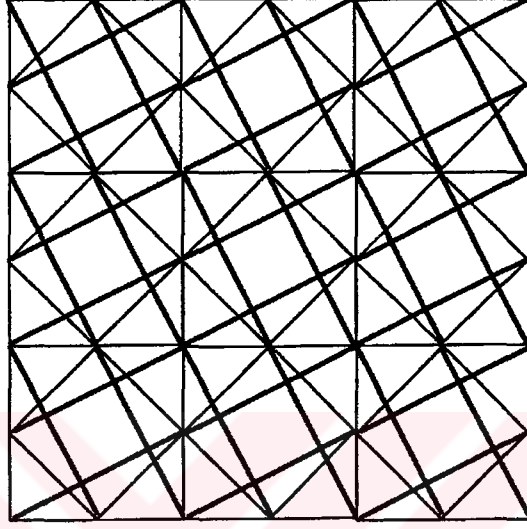
Şekil 3.33 Çift tabakalı tensegrity birleşim tipleri (Tip1a-b, tip 2)

Çift tabakalı tensegrity sistemlerin geometrisi, temel denge şartına ve hücrelerin kapalı modüler ızgara oluşturmasına bağlıdır. Modüler çift tabakalı tensegrity ızgaralar, birleşim yöntemlerine ve sistemi oluşturan çokgenlere göre çeşitlilik gösterir (Şekil 3.34).

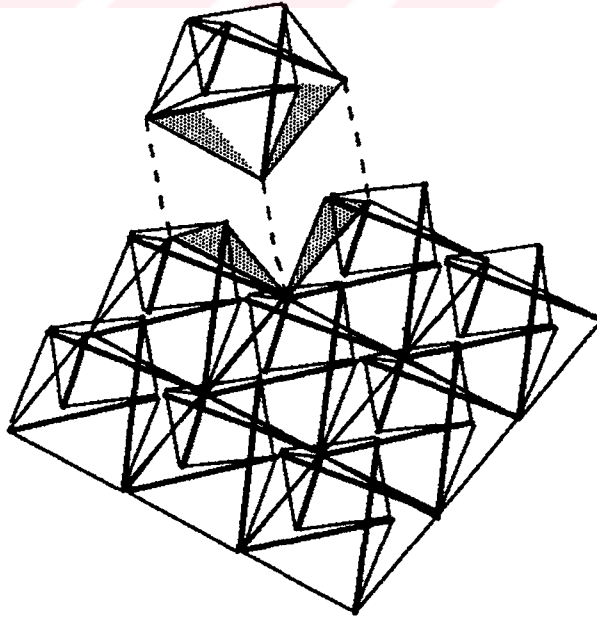


Şekil 3.34 Modüler çift tabakalı tensegrity ızgara tipleri (Tip1a-b, tip 2)

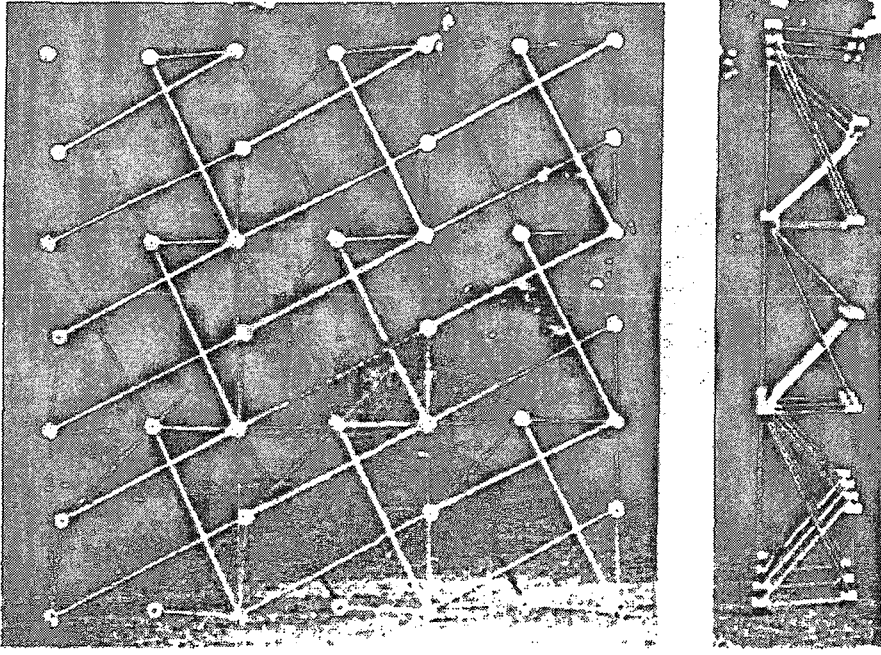
Düğüm-düğüm bağı birleşimi ile, tensegrity temel prensiplerini bozmayan sistemler elde etmek mümkündür. R.B.Fuller ve K.Snelson'un tensegrity kolon çalışmalarındaki gibi basınç elemanlarının farklı birleşimi, sistemde süreksizliği olan tek bir elemanmış gibi davranarak, fazladan eklenmiş kabloların oluşturduğu süreklilik ile denge oluşturan bir sistem meydana getirir (Şekil 3.35-37).



Şekil 3.35 Dokuz adet “Dört-çubuk Temel Tensegrity Hücre”den oluşmuş Çift Tabakalı Tensegrity Sistem

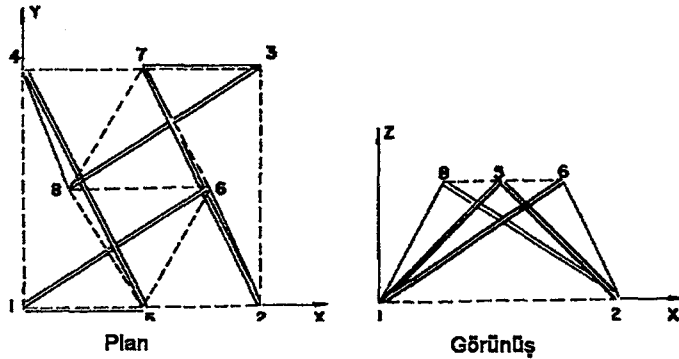


Şekil 3.36 Dokuz adet “Dört-çubuk Temel Tensegrity Hücre”den oluşmuş Çift Tabakalı Tensegrity Sistemin “Aksonometrik” Perspektifi

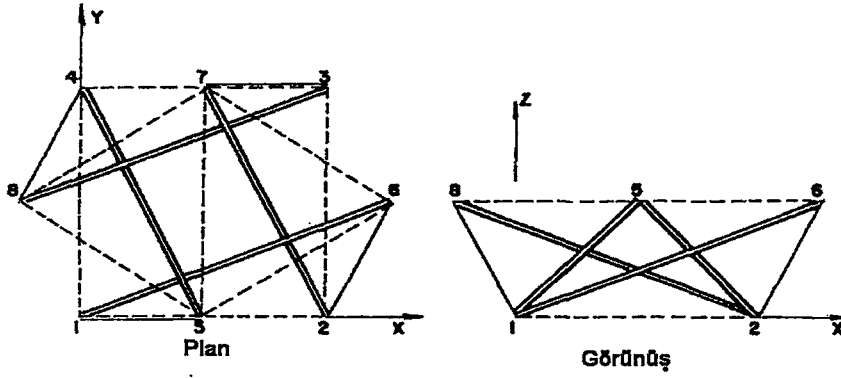


Şekil 3.37 Çift Tabakalı Tensegrity Izgara Prensibi kullanılarak yapılmış Model  
(Motro,2003).

Tensegrity prensiplerini kullanarak, hiçbir ilave kablo veya bağlantı elemanı gerekmeksizin, tek eğrilikli ve çift eğrilikli çift tabakalı tensegrity sistemler elde edilir. Bunu gerçekleştirmek için temel hücrelerin düğüm noktalarının konumları üzerinde değişiklik yapılmalıdır (Şekil 3.38-3.39).

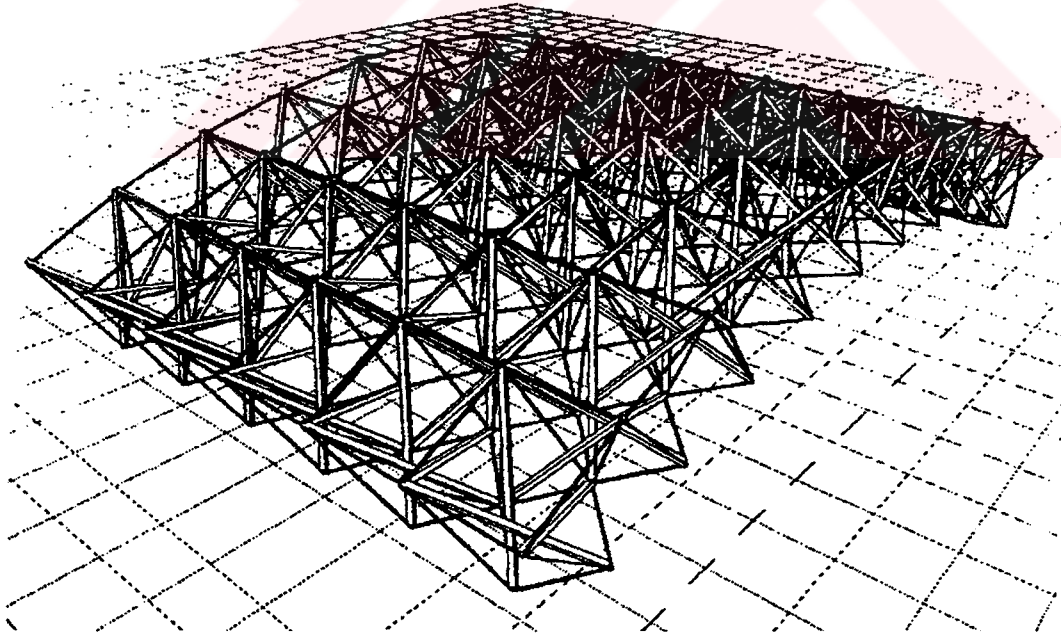


Şekil 3.38 dört çubuklu tensegrity hücrede 1.tip modifikasyon (6. ve 8. düğüm noktalarının konumları yer değiştirmiştir.)



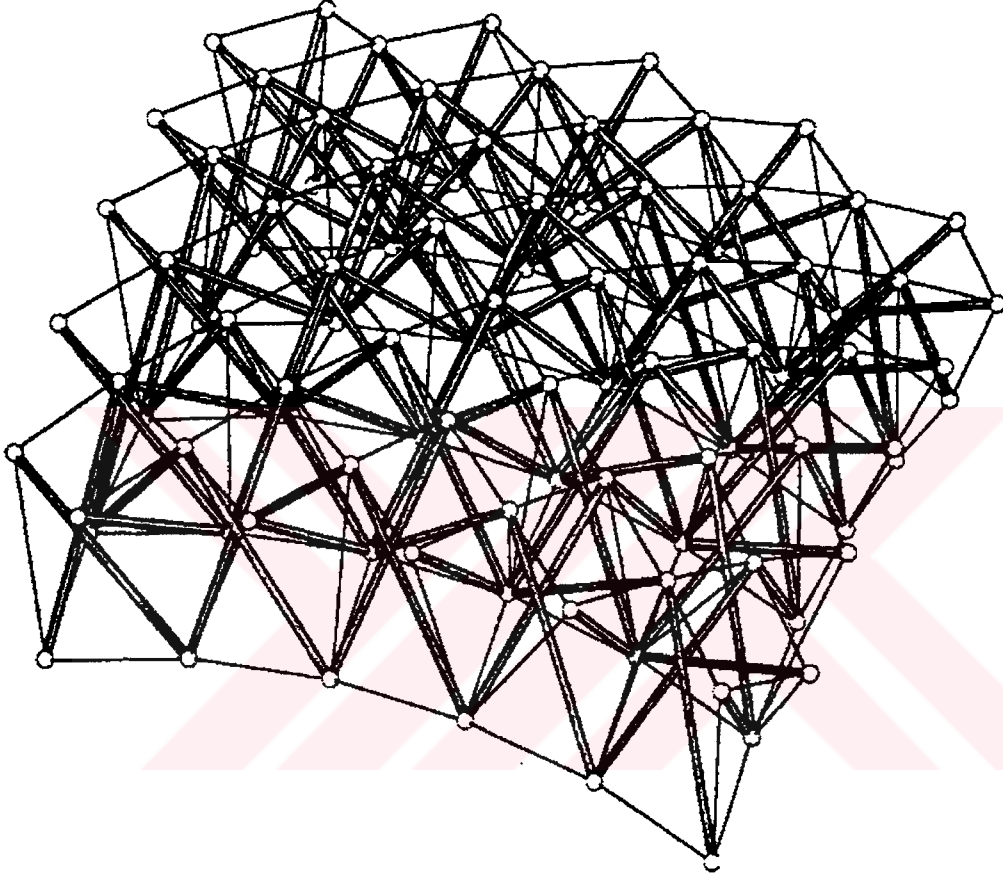
Şekil 3.39 dört çubuklu tensegrity hücrede 2.tip modifikasyon (6. ve 8. düğüm noktalarının konumları yer değiştirmiştir.)

Seçilen düğüm noktaları yer değiştirilerek elde edilen sağlam yeni tensegrity hücre, düğüm-düğüm bağı yapılarak tek eğrilikli, çift tabakalı tensegrity strüktür meydana getirir (Şekil 3.40).



Şekil 3.40 2.tip modifikasyon tensegrity hücre kullanılarak yapılan tek eğrilikli çift tabakalı tensegrity strüktür (Motro, 2003)

Aynı çift tabakalı tensegrity modül ızgarası kullanılarak, matematiksel hesaplamaları yapıldıktan sonra çift eğrilikli sistemler de elde edilir. Oluşacak strüktürün şekli, düğüm noktaları arasındaki mesafe, kablo ve çubukların uzunlukları ile doğru orantılıdır. Matematiksel hesaplar yapılarak istenilen doğrultuda çift eğrilikli çift tabakalı tensegrity strüktürler oluşturulabilir (Şekil 3.41).



Şekil 3.41 “Çift Eğrilikli Çift Tabakalı Tensegrity” yapı (Motro, 2003)

#### 4. TENSEGRİTY SİSTEMLERDE FORM BULMA YÖNTEMLERİ

Tensegrity sistemlerde form bulma yöntemlerini geliştirmek için birçok teorik model yapılmıştır. Yapılan modeller, tensegrity sistemlerin mekanizmasını anlamak ve sistemin denge şartını araştırmak için tasarlanmıştır.

Tensegrity sistem mekanizmasının çözümü, sistemin üzerine hiçbir yük etkisi olmadığı durumdaki denge hali ve sistem üzerine etki eden yükler doğrultusunda oluşan deformasyona bağlıdır.

Tensegrity sistemler, statik ve dinamik açıdan belirli olmalıdır. Statik ve dinamik açıdan belirli olamayan sistemlerde, geometri ve kuvvet parametreleri de belirsizdir.

Tensegrity sistemlerin oluşumu, tesadüfi değerlere dayanmaz. Sistemdeki elemanların boyutları, geometrinin oluşumu ve kinematik değerler kesin hesaplar sonucu ortaya çıkar. Bu önemli parametrelerin elde edilmesi için tensegrity sistemlerde form bulma ve temel denge durumu gibi etkilerin çözülmesi gerekir.

Form bulma yöntemleri, öncelikle sistem geometrisinin tanımlanmasına bağlıdır. Tasarlanacak sistemin geometrisi belirlendikten sonra, sisteme etkiyen kuvvetler ve kuvvet iletimi ile oluşan mekanizma araştırılır.

Form bulma yöntemleri için iki önemli metot geliştirilmiştir:

- Form kontrolü (Deneme-yanılma) yöntemi
- Kuvvet kontrolü yöntemidir.

##### 4.1 Form Kontrolü Yöntemi

Bu konuyla ilgili ilk önemli çalışma, Heykeltıraş K.Snelson tarafından yapılmıştır. Hiçbir ölçüte dayanmadan tamamen deneme-yanılma yöntemi ile oluşturduğu üç model, çok etkili sonuçlara ulaşmasını sağlamıştır. K.Snelson'un çalışmaları Ek 1'de verilmiştir.

K.Snelson'un çalışmaları sistemin denge konumunu, dengeyi oluşturan germe ve öngerme kuvvetlerini araştırmaya yöneliktir.

Bilim Adamı D.G.Emmerich'in tensegrity sistemlere yaklaşımı daha çok geometrik ölçütlere dayanır. Çok büyük modeller yaparak önemli prensiplere ulaşmıştır. Yaptığı ilk modeller, temel denge prensiplerini ve sistemin iç gerilme dengesini tam olarak yansıtmamaktadır.

Daha sonraki araştırmalarında ‘‘Otomatik germe’’ ismini verdiği, tensegrity sistemlerin temel prensibini açıklayan başarlı modeller yapmıştır.

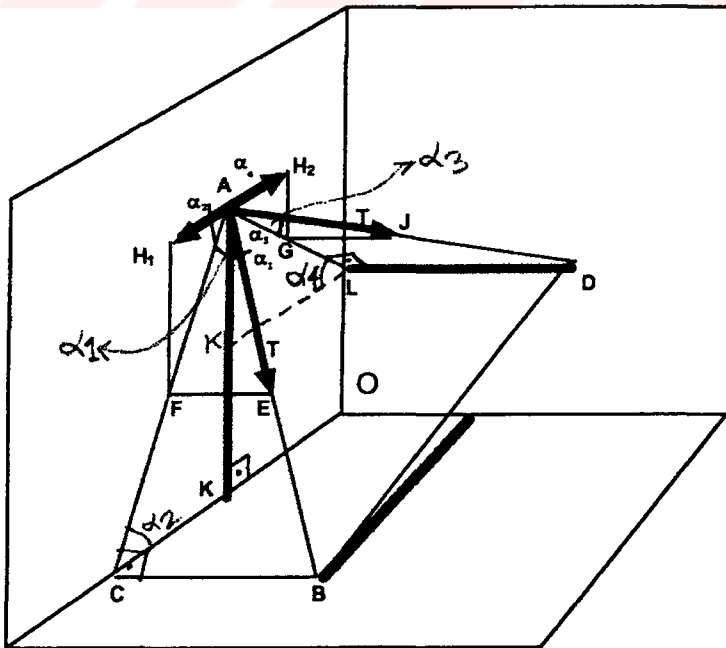
D.G.Emmerich, çok yüzlü geometri kullanarak form bulma yöntemleri geliştirmiştir. Bu sistemlere ‘‘Tensypolyhedra’’ (Tensi çok yüzlü) adı verilmiştir. D.G.Emmerich’in alışmaları Ek 2’de verilmiştir.

#### 4.2 Kuvvet kontrolü yöntemi

Tensegrity sistemlerin tasarımı, sisteme etkiyen yükler doğrultusunda oluşan form ve germe kuvvetlerinin kavranmasına bağlıdır. Basit tensegrity sistemler için analitik metotlar kullanmak yeterli olurken, daha karmaşık sistemler için nümerik metotlar kullanmak gereklidir.

Genelde kullanılan sistemler, düzgün tensegrity strktrlerdir. Bu strüktürlerin formu çubuk/kablo uzunlukları oranına bağlıdır.

Tensegrity sistemler, yapısındaki vektörel kuvvetlerin bileşkesi sıfır değerini aldığı için dengededir. Denge olan sistemler statik açıdan belirlidir. Tensegrity sistemlerin statik açıdan belirli olması ile oluşan temel denge, altı ubuklu basit tensegrity hücrenin (genleşmiş sekiz yüzlü) kuvvet bileşkeleri açısından incelenmesi ile örneklendirilebilir (şekil 4.1):



şekil 4.1 ‘‘Genleşmiş sekiz yüzlü’’ tensegrity sistemde temel denge (Motro, 2003)

A noktası, sistemin dengede olan düğüm noktasını ifade eder. Düğüm noktası, bir basınç çubuğu ve dört çekme kablosu etkisi altındadır. “T” vektörleri çekme kablolarıdır (Şekil 4.1). Sistem simetrik olduğu için A noktasının denge konumunu koruyan,  $H_1$  ve  $H_2$  yatay vektörel kuvvetler ortaya çıkar. Denge şartını sağlayan denklemler (Motro, 2003):

$$H_1 = H_2 \quad (4.1)$$

$$H_1 = T \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 \quad (4.2)$$

$$H_2 = T \cdot \cos \alpha_3 \cdot \cos \alpha_4 \quad (4.3)$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{AC}{AB} \quad , \quad \cos \alpha_2 = \frac{CK}{AC} \quad (4.4)$$

$$H_1 = \frac{CK}{AB} \cdot T \quad (4.5)$$

$$\cos \alpha_3 = \frac{AL}{AD} \quad , \quad \cos \alpha_4 = \frac{KO}{AL} \quad (4.6)$$

$$H_2 = \frac{KO}{AD} \cdot T \quad (4.7)$$

$$H_1 = H_2 \quad \rightarrow \quad \frac{CK}{AB} = \frac{KO}{AD} \quad (4.8)$$

Sistem düzgün tensegrity olduğu için:

$$AB = AD = c_{i-j} \quad (4.9)$$

$$CK = KO \quad \rightarrow \quad \frac{t_{i-j}}{4} = \frac{d_{\varphi}}{2} \quad (d_{\varphi}: \text{iki çubuk arasındaki uzunluk}) \quad (4.10)$$

$$t_{i-j} = 2 \cdot d_{\varphi} \quad \text{elde edilir.} \quad (4.11)$$

$$\frac{t_{i-j}}{c_{i-j}} \approx 1.63 \quad \text{olarak elde edilir.} \quad (4.12)$$

İç gerilme dengesi aynı zamanda  $B_{\text{çubuk}} \approx 2.45 \cdot \varphi_{\text{kablo}}$  dur ( $B_{\text{çubuk}}$ : çubuktaki basınç gerilmesi,  $\varphi_{\text{kablo}}$ : kablodaki çekme gerilmesi). (4.13)

Tensegrity sistemlerin kinematik açıdan da incelenmesi gerekir. Basit üç çubuklu üçgen prizma tensegrity örnek alınarak incelendiğinde, dönme açısına ( $\theta$ ) bağlı kalınarak kullanılan çubuk/kablo oranı:

$$r = \frac{\xi}{k} = \left[ 1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.14)$$

Çubuk/kablo oranının en yüksek değeri aldığı düşünülürse:

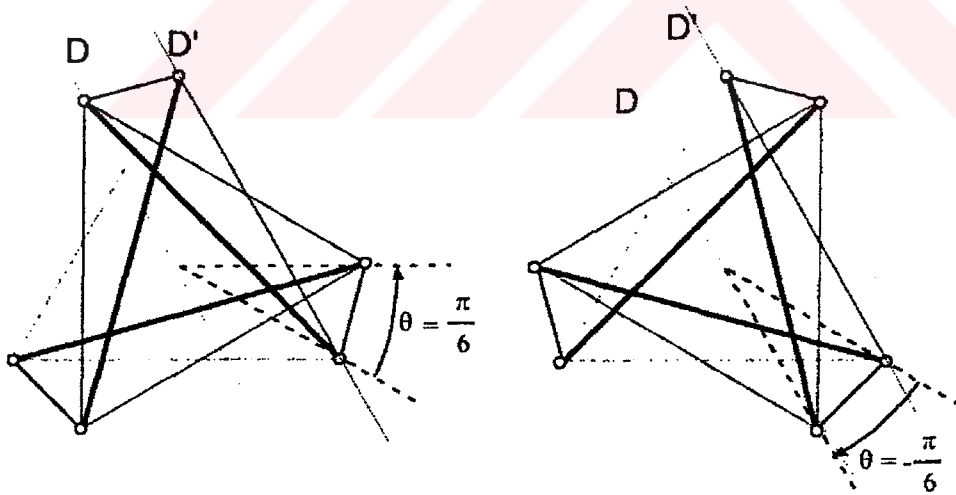
$$\frac{d(r)}{d\theta} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \cdot \left[ 1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.15)$$

Denklem sonucunda dönme açısının iki değeri elde edilir:

$$\theta = \pm \cdot \frac{\pi}{6} \quad (4.16)$$

Elde edilen bu sistem dönme açısının çevirme yönüne göre iki farklı isim alır (Şekil 4.2):

- Saat yönü (Clockwise)
- Saat yönü tersi (Anti-clockwise)



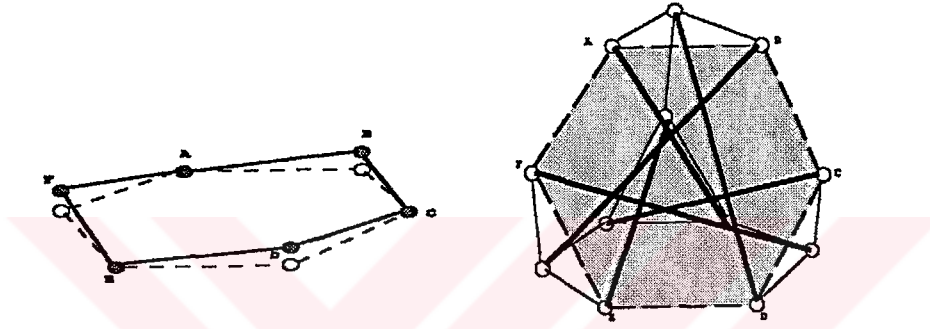
Şekil 4.2 “saat yönü” ve “saat yönü tersi” çevrilmiş sistem (Motro, 2003)

p-yüzlü tensegrity sistemler için dönme açısı:

$$\theta = \pm \cdot \frac{\pi \cdot (p-2)}{2 \cdot p} \text{ Denklemi yazılabilir.} \quad (4.17)$$

Düzgün tensegrity sistemlerin, form bulma yöntemlerini araştırmak için sistemin dinamik analiz ve kinetik sönüm değerlerinin gözlenmesi gerekir.

Kesik dörtyüzlü geometri kullanılarak oluşturulan tensegrity sistemlerde altıgen yüzeylerin, sistem denge durumuna ulaştıktan sonra çok az deforme olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Kesik Dörtyüzlü

Düzensiz tensegrity sistemlerde form bulma yöntemleri için “kuvvet yoğunluğu metodu” veya “analitik form bulma” metodu kullanılır. Kuvvet yoğunluğu metodu, kuralsız geometriler ile tasarlanan tensegrity sistemlerin denge şartını araştırmanın en etkili yöntemidir.

#### 4.2.1 Kuvvet yoğunluğu metodu

Kuvvet yoğunluğu prensibi, kuvvet yoğunluğu katsayısına “q” bağlıdır. “j” elemanı için kuvvet yoğunluğu katsayısı “q<sub>j</sub>”, aksenal kuvvet T<sub>j</sub> ve eleman uzunluğu L<sub>j</sub><sup>0</sup> için (Motro, 2003):

$$q_j = \frac{T_j}{L_j^0} \quad (4.18)$$

Eleman uzunluğu “L<sub>j</sub><sup>0</sup>”, sisteme dış yük etkisi olmadığı durumdaki değeri ifade eder.

“j” elemanı ile bağlanmış düğüm noktaları “i” ve “h” için X doğrultusu boyunca oluşan denge denklemi:

$$\sum_j \frac{(x_i - x_h)}{L_j^0} \cdot T_j = f_{ix} \quad (4.19)$$

Kuvvet yoğunluğu katsayısı cinsinden oluşan denklem:

$$\sum_j (x_i - x_h) \cdot q_j = f_{ix} \quad (4.20)$$

X doğrultusundaki düğüm noktası “i” ’nin sayısal koordinat değeri “ $x_i$ ”, “i” noktasına x doğrultusunda etkiyen dış yüklerin bileşkesi “ $f_{ix}$ ” ise, form bulma yöntemleri için değeri sıfır olmalıdır ( $f_i=0$ ).

İç gerilme dengesi olan uzaysal ağ biçiminde sistemlerde form bulma, kuvvet yoğunluğu metodu ve sistemin bağlı strüktürüne bağlıdır. Üç bölümde incelenir:

- İç gerilme dengesi katsayısı bulunmalıdır: Uzaysal sistemler için, iç gerilme katsayısına bağlı birleşim matrisi dizisinin sayısal değeri n-4 değerine eşit ve ya küçük olmalıdır.
- Bulunan katsayı değerleri ile sistemin denge eşitliği denklemleri yazılmalıdır.
- Bulunan katsayı değerleri ile tasarlanacak sistemin formu tespit edilmelidir.

İç gerilme dengesi katsayısının bulunmasında kullanılacak bazı teknikler şunlardır:

- Deneme-yanılma yöntemi: Daha çok basit sistemler için geçerlidir. Karmaşık sistemler için kullanılamaz.
- Tekrarlama yöntemi: Birleşim matris dizisi gerekli büyüklüğü alana kadar iç gerilme dengesi katsayısına tekrarlanarak sayısal değer verilerek bulunur. Bu tür sayısal değerler daha çok bilgisayar yardımı ile bulunmaktadır.
- Analitik yöntem: Gerekli matris dizisi değerini sağlayan iç gerilme katsayısını bulmak için tüm matris değerleri tek tek analiz edilir. En etkili yöntemlerden biridir. Düğüm noktası sayısı çok büyü kolan sistemlerde analiz yoğunluğu azaltılabilir.

Tüm bu form bulma yöntemleri “uzaysal ağ görünümlü sistemler” olan tensegrity strüktürlere de uygulanmaktadır.

Altı düğüm noktalı, üç çubuklu, dokuz kablolu simplex tensegrity gibi sistemler, düzgün strüktürler oluşturduğu için form bulma yöntemleri daha kolaydır. Düzgün olmayan simplex tensegrity sistemler için form bulma; iç gerilme katsayısı birleşim matrisini değerinin düşürülmesine (n-4) bağlıdır. Gerekli iç gerilme katsayısı sıfırdan farklı ve kablolar için  $q^0 > 0$ , çubuklar için  $q^0 < 0$  olmalıdır.

Sistemdeki elemanlar için kuvvet yoğunluğu katsayısı değerleri:

$$\text{Alt taban üçgenin kabloları için } q_1^0 = q_2^0 = q_3^0 = q_i^0 \quad (4.21)$$

$$\text{Destek kabloları için } q_4^0 = q_5^0 = q_6^0 = q^0 \quad (4.22)$$

$$\text{Üst taban üçgenin kabloları için } q_7^0 = q_8^0 = q_9^0 = q_s^0 \quad (4.23)$$

$$\text{Çubuklar için } q_{10}^0 = q_{11}^0 = q_{12}^0 = -q^0 \quad (4.24)$$

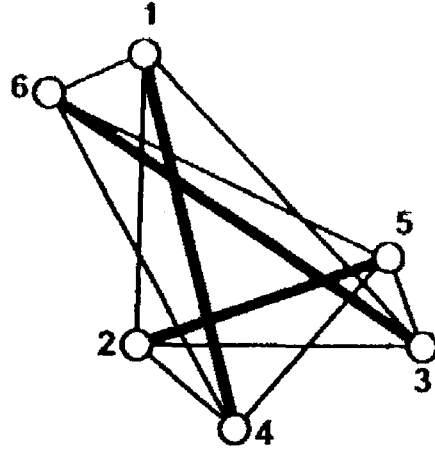
Analitik metot (Gaussian Yöntemi) kullanılarak ulaşılan denklem:

$$3 \cdot q_i^0 \cdot q_s^0 - (q^0)^2 = 0 \quad (4.25)$$

$$\text{Eğer } q_1^0 = q_2^0 = 1 \text{ değeri verilirse,} \quad (4.26)$$

$$\text{Kuvvet yoğunluğu katsayısı } q^0 = \sqrt{3} \text{ olarak elde edilir.} \quad (4.27)$$

Sistem içindeki herhangi iki elemana uygulanacak bağımsız iki denge eşitliği elde edilir. Sistemde dört bağımsız düğüm noktası ortaya çıkar. Bu noktalar  $d_1, d_2, d_3, d_4$  olarak ifade edilir. Diğer düğüm noktaları  $d_5, d_6$ , elde edilen iki bağımsız denge eşitliği ile tanımlanır. Eğer  $d_1, d_2, d_3$  noktaları sistemin eşkenar üçgen üst tabanını oluşturduğu düşünülürse,  $d_4, d_5, d_6$  noktaları birbirini takip eden eşkenar üçgen alt tabanını oluşturur. Oluşan bu sistem “düzgün simplex tensegrity” strüktürdür. Her düğüm noktasında tek çubuk ve üç kablo birleşimi olduğu için bu sistemlere “triplex tensegrity sistemler” de denir. Aynı değerler ile kuralızsız “triplex” tensegrity sistemler de elde edilir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Kuralızsız Triplex Tensegrity (Motro.R. 2003)

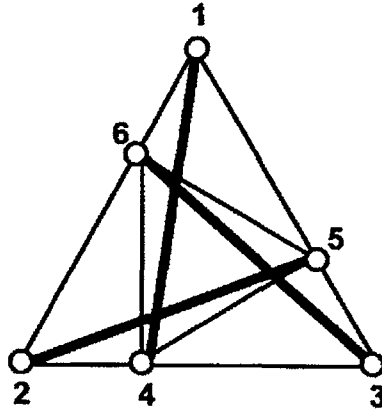
İç gerilme katsayısı denklemleri kullanılarak elde edilen değerler ile birçok geometriye sahip tensegrity sistemler elde edilebilir. Düzgün tensegrity sistemler elde etmek için, kuralızsız tensegrity sistemlere, iç gerilme dengesi katsayısı eşitliği uygulanırsa:

$$q^0 = q_s^0 = 1 \text{ denklemi,} \quad (4.28)$$

Buna bağlı olarak:

$$q_i^0 = (q^0)^2 / 3 \cdot q_s^0 = 1/3 \text{ denklemi bulunur.} \quad (4.29)$$

$d_4$  düğüm noktası merkez kabul edilerek  $d_1, d_2, d_3, d_5, d_6$  düğüm noktaları, iç gerilme katsayısı göz önüne alınarak koordinatlarına yerleştirilirse, alt ve üst tabanı eşkenar üçgen olan “düzgün triplex tensegrity sistem” elde edilir (Şekil 4.5) (Motro, 2003).



Şekil 4.5 Düzgün Triplex Tensegrity (Motro, 2003)

Tensegrity sistemlerde, her bir elemanda oluşan gerilme ve basınç kuvvetlerinin hesaplanması yöntemi olan kuvvet yoğunluğu metodu, form bulma çalışmaları için büyük önem taşımaktadır.

Form bulma çalışmaları ile elde edilen değerlerin denge denklemleri yazılarak, sisteme ön germe uygulayarak veya uygulamaya gerek olmadan iç dengeye sahip sistemler elde edilir.

### 4.3 Tensegrity Sistemlerde İç Denge ve Mekanizmanın Form Bulma Çalışmalarına Etkisi

Form bulma çalışmaları için en önemli sorunlardan biri sistemin iç kuvvet dengesine bağlı rijitliğidir. Genellikle tüm tensegrity sistemlerin mekanizması vardır. Bu mekanizmaya bağlı olarak tensegrity sistemler statik ve kinematik açıdan belirlidir.

Bir tensegrity sistemde, ayrı dış kuvvet etkisi ile bir veya daha fazla düğüm noktası ilk konumundan farklı yer değişimi gösteriyorsa bu sistemler kinematik açıdan belirsizdir. Sistemin, ilk iç denge konumuna geri dönmesi için üzerine etkiyen dış kuvvetin kaldırılması gerekir. Form bulma yöntemleri için iç denge, kinematik belirlilik ve sağlamlık ilkelerinin incelenmesi gerekir.

Uzaysal ağ görünümlü sistemlerde, “e” sayıda eleman, “N” sayıda serbestlik derecesi, “S<sub>s</sub>” sayıda iç kuvvet dengesi:

$$S_s = b - r_A \quad (4.30)$$

“m<sub>e</sub>” sayıda iç mekanizma için:

$$m_e = N - r_A \quad (4.31)$$

$$S_s - b = m_e - N \text{ eşitliği elde edilir.} \quad (4.32)$$

Denge matrisi dizisi r<sub>A</sub>, denge matrisi [A]:

$$[A] \cdot \{T\} = \{f\} \text{ eşitliğini sağlar (Motro,R.).} \quad (4.33)$$

Kablodaki çekme kuvveti vektörü “T”, düğüm noktalarına etkiyen dış kuvvet vektörü “f” olarak ifade edilir. Bu değerlere göre uzaysal ağ görünümlü sistemler dört bölümde incelenir (Çizelge 4.1).

Tensegrity sistemlerde iç gerilme dengesi, statik ve kinematik belirlilik varsa bölüm-1 içinde yer almaktadır. Kinematik ve statik açıdan belirsiz tensegrity sistemler bölüm-4 içinde yer almaktadır (Çizelge 4.1).

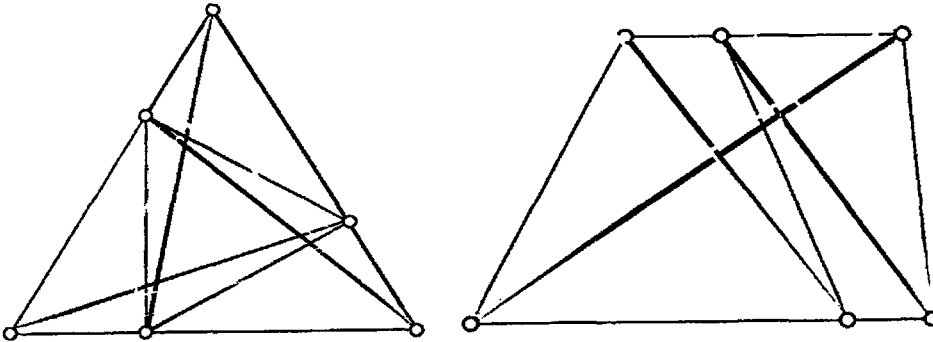
Çizelge 4.1 Uzaysal ağ görünümlü sistemlerin sınıflandırılması

Bölüm	$r_A$	$m, s_s$	Özellikler
1	$r_A = b$ $r_A = N$	$S_s = 0$ $m = 0$	Statik ve kinematik olarak belirli sistemler
2	$r_A = b$ $r_A < N$	$S_s = 0$ $m = N - r_A$	Kinematik olarak belirsiz sistemler
3	$r_A < b$ $r_A = N$	$S_s = b - r_A$ $m = 0$	Statik olarak belirsiz sistemler
4	$r_A < b$ $r_A < N$	$S_s = b - r_A$ $m = N - r_A$	Statik ve kinematik olarak belirsiz sistemler

Üç çubuklu, altı düğüm noktalı, on iki elemanlı, on iki serbestlik derecesi olan basit tensegrity hücrede:

$$S_s = m_e = 1 \text{ dir.} \quad (4.34)$$

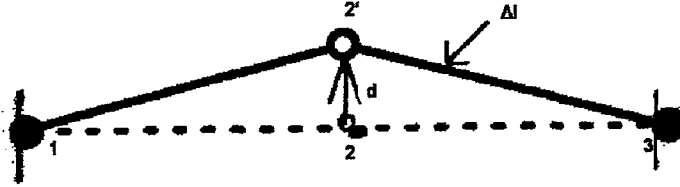
Üst taban üçgenin alt taban üçgene göre çevrilmesi ile oluşturulan ve ön germe uygulanmadan dengede duran triplex tensegrity sistem düğüm noktalarında çok küçükte olsa deformasyon oluşur (Şekil 4.6). Sistemdeki bu çok küçük deformasyonlara “sonsuz küçük mekanizma” adı verilir (Şekil 4.7).



Şekil 4.6 “Üç Çubuklu Triplex” tensegrity sistem

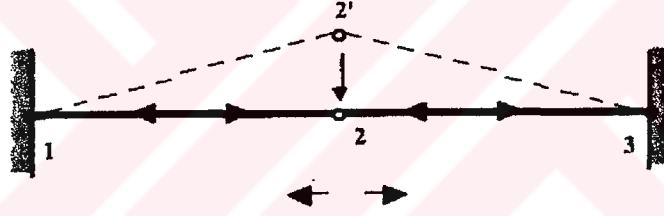
Sonsuz küçük mekanizma, tensegrity sistemlerde herhangi iki düğüm noktası arasına uygulanan kuvvet etkisi altında gerilen kabloların, birim uzama miktarı ve bu uzamadan etkilenen düğüm noktalarının yer değişimini inceler. Sonsuz küçük mekanizma olan sistemler kinematik olarak belirsizdir. "d" birim yer değişimi için uzunluk varyasyonları eşitliği:

$$\Delta l = \alpha \cdot d^2 \leq d \quad \text{dir.} \quad (4.35)$$



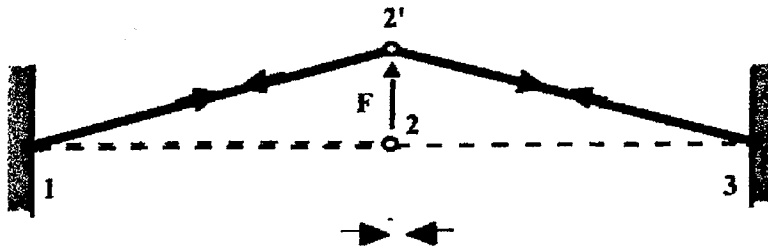
Şekil 4.7 Sonsuz küçük mekanizma (Motro,R. 2003)

Sonsuz küçük mekanizma, sistemde statik belirsizlik meydana getirir. Statik belirsizliği önlemek ve düğüm noktasının konumunun sabit kalması için sisteme ön germe kuvvetleri uygulamak gerekir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Uygulanan ön germe kuvveti (Motro,R. 2003)

Elde edilen ikinci noktanın sabit kalması isteniyorsa gerekli elemanlara basınç kuvveti uygulanır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Uygulanan basınç kuvveti (Motro,R. 2003)

Sonuç olarak tensegrity sistemlerin geometrisi, sistemin iç gerilme dengesi ve mekanizmasının oluşturduğu statik sağlamlığın, sayısal değerinin kesin hesaplarına bağlıdır.

## 5. HAREKETLİ, KATLANABİLİR TENSEGRİTY SİSTEMLER

Uzaysal yapıların gelişimi, en karmaşık ve geniş açıklık geçebilen sistemlerin inşaat sektöründe kullanımını yaygınlaştırmıştır. Uzaysal strüktürler, yapısı gereği yayılabilir ağ görünümlü sistemler oluşturabilir. Strüktürü oluşturan elemanların boyutlarında değişiklikler yaparak veya sistem içinde hareket etmesini sağlayarak, strüktürlerin daha geniş açıklıkları kontrol edilebilir bir mekanizma ile geçmesi mümkün olabilir. Tensegrity sistemler de hareketli veya katlanabilir strüktürler oluşturulabilir.

Hareketli tensegrity sistemlerde sistemin önceden iç dengesi, statik sağlamlığı ve oluşturulmak istenen geometrisi kesin hesaplar ile belirlendikten sonra hareket mekanizması oluşturulur. Bu sistemlerde, ilk sönüm hali ve hareket mekanizmasından sonraki gerilmiş denge hali söz konusudur. Sönüm halinde sistem dengede değildir ve hiçbir sağlamlığı yoktur.

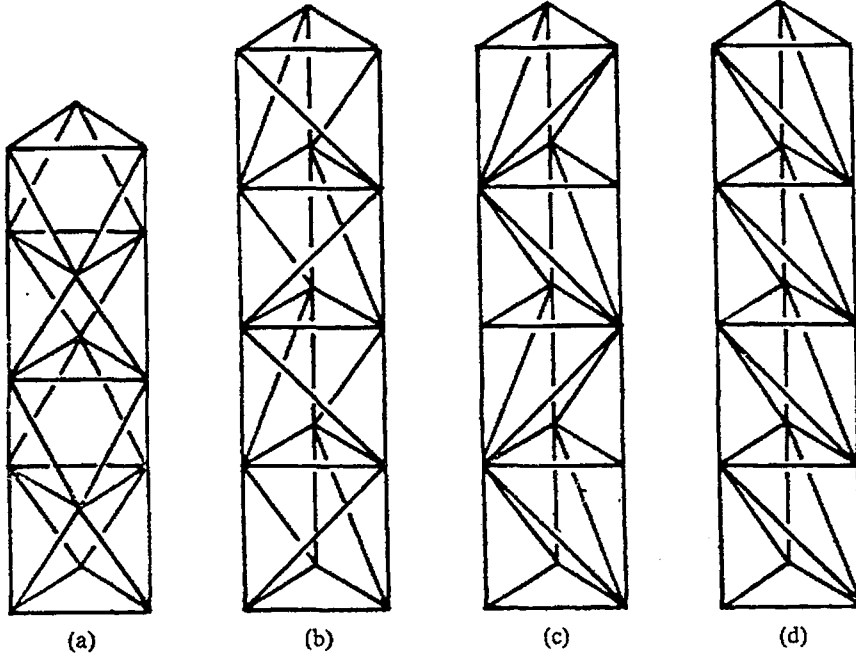
Katlanabilir veya hareketli tensegrity sistemin, ilk sönüm halindeki geometrisinden gerilmiş statik denge halindeki son geometrisine kadarki evrede, tüm elemanların yer değişimi (mekanizma) tek tek hesaplanması gerekir.

Katlanabilir tensegrity sistemlerin üç tasarım ölçütü vardır:

- Mekanizma tasarımı,
- Katlama ve sönümleme evresinde sistemin tüm hareketinin mekanizmaya uyumluluğunun sağlanması,
- Sistemin stabilitesi ve denge durumu kesinliğidir.

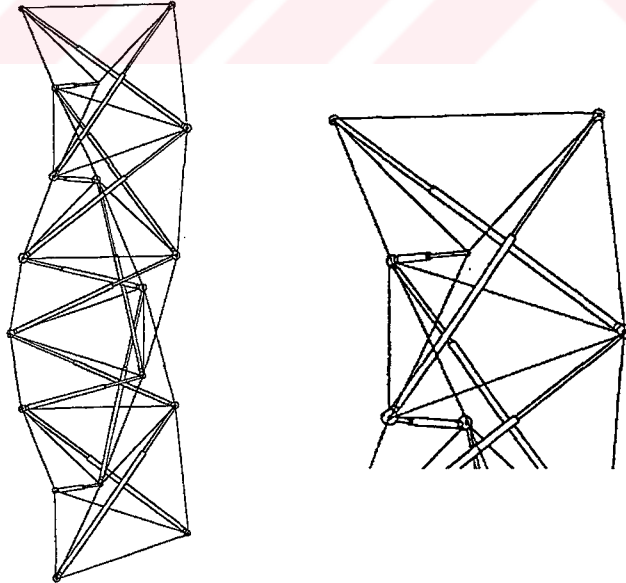
Hareketli tensegrity sistemlerde, hareketi sağlayan elemanlar çeşitlilik gösterebilir. Çekme kabloları yerine membran veya tekstil ürünleri kullanılabilir.

Hareketli tensegrity strüktürlerin tasarımında ilk olarak basit tensegrity hücreler kullanılmıştır. Basit çok yüzlü birleşimler ile tensegrity sütunlar elde edilmiştir (Şekil 5.1). Sekiz yüzeyle tensegrity sütun, sekiz yüzlü tensegrity hücrenin üst üste tekrarlanması ile elde edilmiştir (Şekil 5.1a). Sekiz yüzeyle tensegrity sütunun yanal üçgen yüzeylerinin  $60^\circ$  çevrilmesi ile diğer bir sütun elde edilir (Şekil 5.1b). Düğüm noktalarının farklı birleşimleri ile dört yüzeyle tensegrity sütunlar oluşturulur (Şekil 5.1c-d). Hücrelerin birleşiminde çubuklar birbirleri ile kesişmez. Tensegrity sütunlarda hareketi sağlamak için hücrelerin birleşimleri mafsallı yapılıdır.



Şekil 5.1 Çeşitli tensegrity sütunlar (Furuya,H. 1990)

Katlanabilir tensegrity sütunların mekanizmasında diyagonal çubukların uzunluğu değişiklik gösterebilir, fakat kablo uzunlukları korunmalıdır (Şekil 5.2). Çubuk uzunluklarının sabit tutulması kilitli mekanizma yaratır. Çubuk uzunluklarının değişebilir mekanizması olan sistemlerin geometrisi çeşitlilik gösterir.



Şekil 5.2 Katlanabilir tensegrity sütun (Furuya, 1990)

Üçgen prizma tensegrity hücreden meydana gelmiş katlanabilir tensegrity sütunun hareket analizi yapıldığında (Şekil 5.3) (Furuya, 1990):

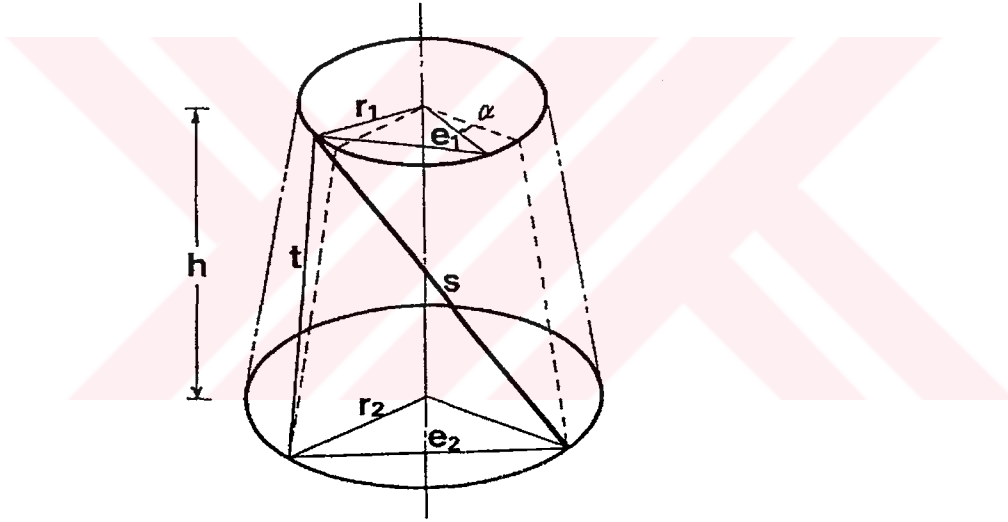
$$L_s^2 = r_1^2 + e_2^2 - 2r_1 \cdot r_2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \alpha\right) + h^2 \quad (5.1)$$

$$L_t^2 = r_1^2 + e_2^2 - 2r_1 \cdot r_2 \cdot \cos\alpha + h^2 \quad (5.2)$$

$$e_1 = 2r_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \quad (5.3)$$

$$e_2 = 2r_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \quad (5.4)$$

Uzunluk eşitlikleri elde edilir.



Şekil 5.3 Üçgen prizma tensegrity hücrenin analizi

4.1 ve 4.2 eşitlikleri hesaba katılarak:

$$L_t^2 = L_s^2 \cdot 2r_1 \cdot r_2 \left\{ \cos\left(\frac{2\pi}{3} + \alpha\right) - \cos\alpha \right\} \text{ denklemi elde edilir.} \quad (5.5)$$

Sağlam bir strüktür elde etmek için yanıl kablo uzunlukları ile çubuk uzunlukları oranı minimum değerlerini alması gerekir. Buna bağılı olarak:

$$\sin\alpha = \sin\left(\frac{2\pi}{3} + \alpha\right) \text{ denklemi yazılır.} \quad (5.6)$$

En küçük değer verildiğinde:

$$\alpha = \frac{\pi}{6} \text{ elde edilir.} \quad (5.7)$$

Sonuç olarak prizmatik tensegrity hücrenin dönme açısı sabittir. 5.7 eşitliğine göre tensegrity prizmanın üst taban üçgeni ile alt taban üçgeni uyum gösteriyorsa, çubuk ve kabloların uzunlukları:

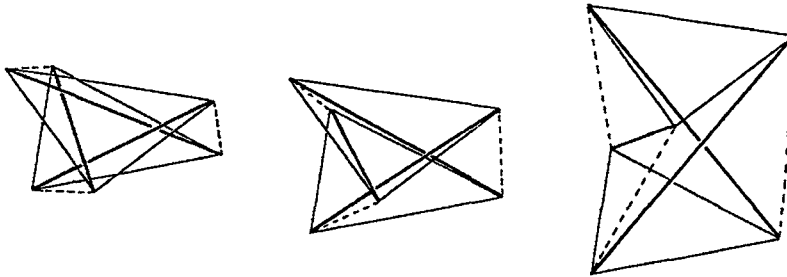
$$L_s^2 = \left( \frac{2 + \sqrt{3}}{3} \right) \cdot e^2 + h^2 \quad (5.8)$$

$$L_t^2 = \left( \frac{2 - \sqrt{3}}{3} \right) \cdot e^2 + h^2 \text{ eşitlikleri ile bulunur.} \quad (5.9)$$

Hareket süreci boyunca her elemanın uzunluğu için 5.8 ve 5.9 eşitliği sağlanıyorsa, bu sisteme hareketli veya katlanabilir tensegrity strüktür denir. Hareket süreci boyunca uzunluğu sabitlenmiş elemanlar kullanıldığı varsayılan üç farklı durum ortaya çıkar:

- Diyagonal kabloların uzunluğunun sabitlenmesi.
- Çubukların uzunluğunun sabitlenmesi.
- Yanal kabloların uzunluğunun sabitlenmesidir.

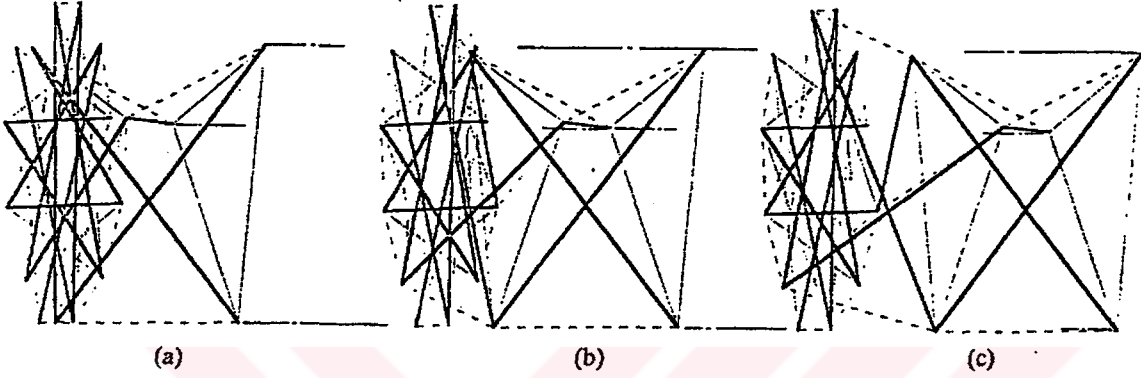
Tüm bu hareket süreci boyunca, sistemde farklı dönme veya kayma tepkileri oluşmaz. Fakat 1. ve 2. durumlarda yanal üçgen yüzeylerin ölçüleri, eş zamanlı olarak değişiklik gösterir. 3. durumda, tensegrity sütun, bağımsız olarak farklı hücrelerden meydana gelebilir. Bu yüzden hareketli tensegrity yapıların tasarımında en çok kullanılan yöntem, yanal kabloların uzunluğunun sabitlenmesi yöntemidir (Şekil 5.4).



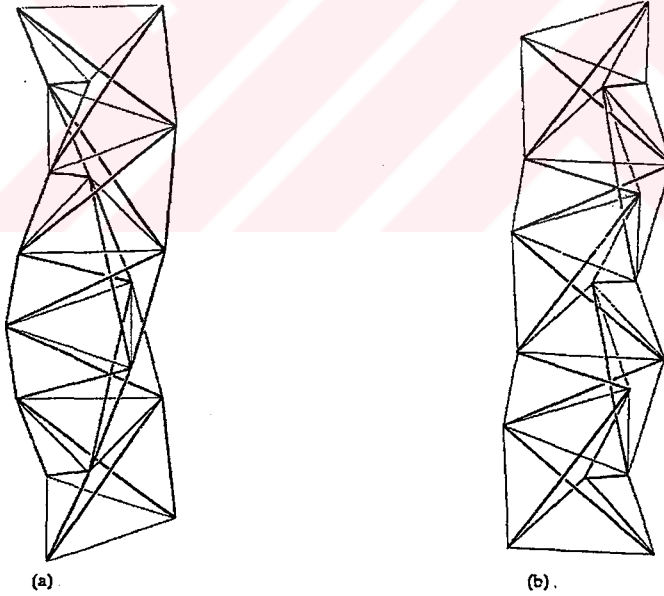
Şekil 5.4 Yanal kabloların sabit tutulması yöntemi (Furuya, 1990)

Sistem mekanizmasını kavramak için çubukların uzunluklarına değişken değerler verilmesi gerekir. Bu yöntemi kullanmak için iç içe geçmeli, uzunluğu değişebilen çubuk sistemi kullanılır.

Tensegrity sistemin hareketi ardışık sıra takip eder (Şekil 5.5). Yapının uç noktaları hareket yönüne göre bir ray üzerinde yol alır. Sarmal yapı ve zig-zag yapı olmak üzere iki temel tensegrity sütun vardır (Şekil 5.6 a-b).



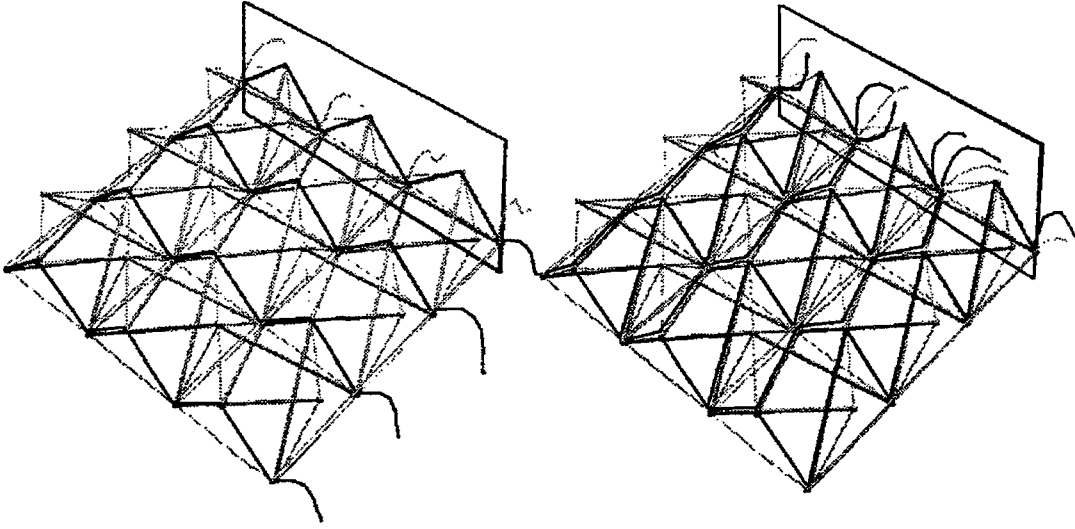
Şekil 5.5 Tensegrity sistemin hareket sırası (Furuya, 1990)



Şekil 5.6 a) Sarmal yapı b) Zig-zag Yapı (Furuya, 1990).

Bir sarmal tensegrity sistemin hareketinde, sabit uzunluklu kabloların gerilme değeri hareketin yarı yolunda sıfır olduğu için sistem stabil değildir. Tam açılım olduğunda sistem stabildir (Şekil 5.7).





Şekil 5.9 Çift tabakalı tensegrity sistemin hareket yönüne göre oluşan zincir (Motro, 2003)

Hareket mekanizmasını yönlendiren zinciri oluşturmanın dişey ve yatay sıra olmak üzere iki yolu vardır (Şekil 5.9).

Katlanabilir karmaşık tensegrity sistemlerin tasarımı birçok eş zamanlı araştırmaya dayanır. Tasarım, geometri, rijitlik, kinematik..v.b. gibi birçok problemin çözümüne bağlıdır. Katlanabilir sistem tasarımında, hareket mekanizmasının çözümü için sistemin ölçekli maketlerin yapılması, statik yükleme analizi yapılması, titreşim-esneklik analizi yapılması, grafik simülasyonların oluşturulması ve nümerik hesapların elde edilmesi gereklidir.

## 6. MEVCUT VE GELİŞMEKTE OLAN TENSEGRİTY SİSTEMLER

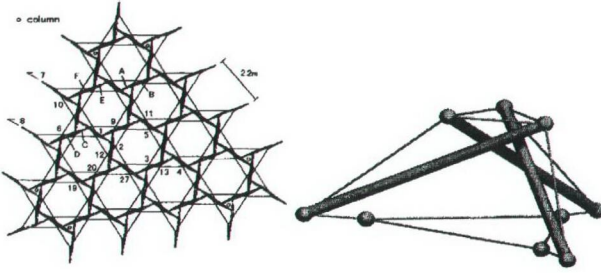
Yarım asrı aşkın süredir tensegrity sistemler üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Tensegrity sistemlerin gelecek yıllarda bina yapım teknolojileri üzerinde önemli etkileri olacağı görülmektedir.

Tensegrity sistemler, tasarım süreci, kullanılan malzeme, uygulama şekli ve yapı prensipleri açısından diğer sistemlerden çok farklıdır. Tüm tasarım sürecinde farklı yeni prensipler geliştirilmiştir. Uzaysal yapılar, asma-germe ve şişme sistemlerin uygulama prensipleri kullanılarak yapılan araştırmalar sonucu geniş açıklık geçebilen tensegrity kubbe, tensi-küre, tensi-kemer, tensi-tonoz..v.b. birçok yapı elde edilmiştir.

Tensegrity sistemlerin en önemli sorunu, elde edilmek istenen geometrinin, sistematik ve bilgisayar destekli aşamalardan geçmek zorunda olmasıdır. Ayrıca, oluşturulacak sistem için birçok basit tensegrity modül arasından seçim yapılması gerekir.

Tensegrity sistemlerin temel prensiplerini koruyarak farklı denemeler ile yeni sistemler elde edilmiştir. Bu yöntemlerden bazıları şunlardır:

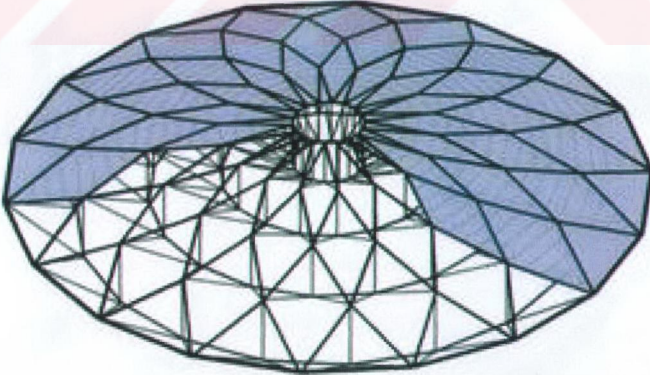
- Düzgün çift tabakalı tensegrity sistemlerin oluşum ızgarası üzerinde ve basınç çubuklarının sistem içindeki yapısını değiştirerek, düzgün ızgara tipleri yerine çokgen ızgara veya deforme edilmiş ızgara tipleri kullanılmıştır. Basınç çubuklarının sistem içindeki açısı değiştirilerek değişken uzunluklu basınç çubukları kullanılmıştır.
- Farklı eğrilikli çift tabakalı tensegrity sistemlerin bir araya getirilmesi ile tabaka aralıkları büyütülmüştür.
- Dügüm noktalarında farklı birleşim elemanları kullanılmıştır.
- Sistemin oluşumu için rasyonel hücreler kullanmak yerine irrasyonel tensegrity hücreler kullanılmıştır (Şekil 6.1).



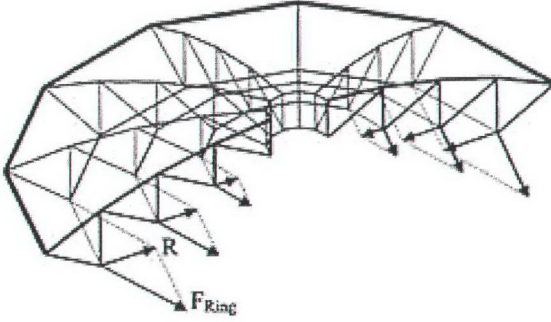
Şekil 6.1 Farklı düğüm noktaları ile oluşturulmuş tensegrity ızgara (Motro, 2003)

Günümüze kadar tensegrity sistemler ile çeşitli yapı ve yapı elemanları oluşturulmuştur. Bunlar; tensegrity kubbe, tensegrity kule, düzlem tensegrity çatı, tensegrity çadır, tensegrity kiriş, tensegrity kolon, tensegrity köprü gibi yapılarıdır. Tensegrity sistemler, günümüzde iç mimari ürünler için de kullanılmaktadır. Tensegrity prensipleri ile koltuk, masa, aydınlatma armatürü, sandalye..v.b. tasarımlar yapılmıştır.

Tensegrity kubbe tasarımı ilk olarak R.B.Fuller tarafından ortaya konmuştur. Bu kubbe, çubuklar ile kabloların oluşturduğu zincir halkalarının birleşiminden meydana gelir (Şekil 6.2). Aynı sistemin basit prensipler ile tasarlanmış modeli D.Geiger tarafından seul, olimpiyat stadyumu çatısında uygulanmıştır (Şekil 6.3).

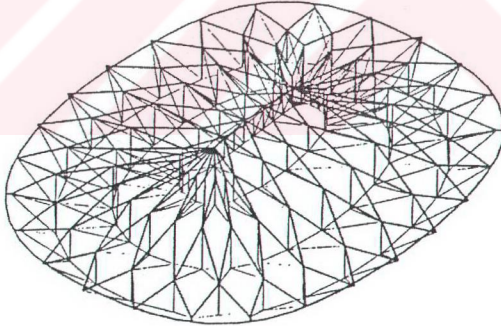


Şekil 6.2 R.B.Fuller'in tasarladığı "Tensegrity Kubbe"



Şekil 6.3 D.Geiger'in tasarladığı "Tensegrity Kubbe"

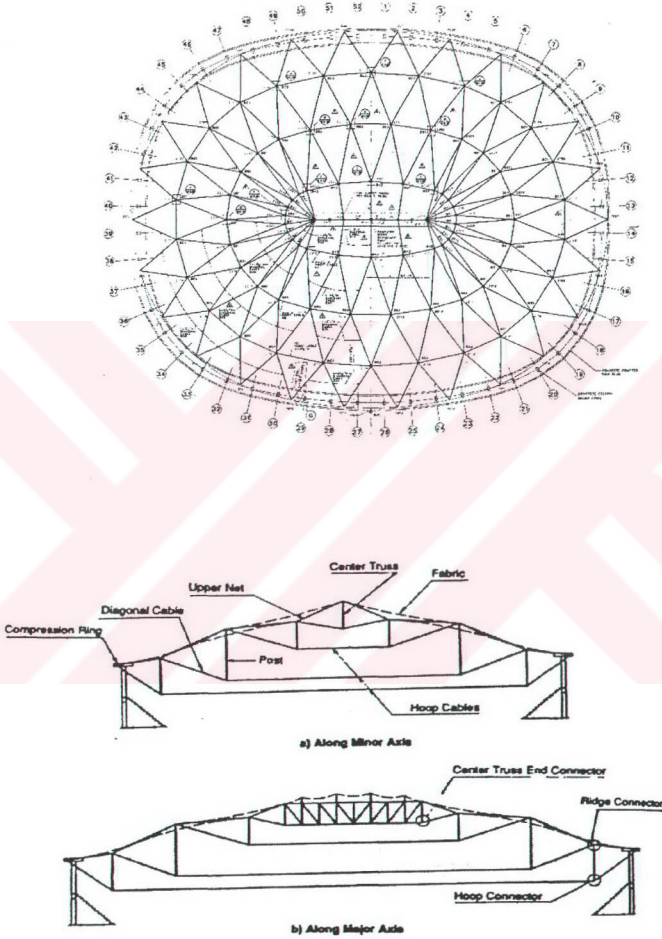
Dünyanın en büyük tensegrity kubbesi "Georgia Dome", 1992 yılında A.B.D.'nin Georgia eyaletinin Atlanta kentinde futbol stadyumu çatısı olarak tasarlanmıştır. "Hiper Tensegrity Kubbe" adı verilen bu sistem, 234 m x 186 m açıklık geçmektedir. R.B.Fuller ve K.Snelson'un tensegrity sistemler için geliştirdiği prensipler kullanılarak tasarlanmıştır. Hiperbolik paraboloid paneller, tensegrity prensipleri ile rijitliği sağlanmış kablo ağlarına monte edilmiştir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Hiper Tensegrity Kubbe

Tasarımda iki yarı çapı olan oval şekilli plan kullanılmıştır (Şekil 6.5). Kablolar ve çubukların oluşturduğu zincir-kiriş halkalar, elli iki mesnete oturmaktadır. Çubuklar ve kablolar eşkenar dörtgen (baklava biçimli) birleşimle oluşturulmuştur. Çekme halkaları birbirlerine, basınç çubukları ve yanal çekme kabloları ile bağlanmıştır.

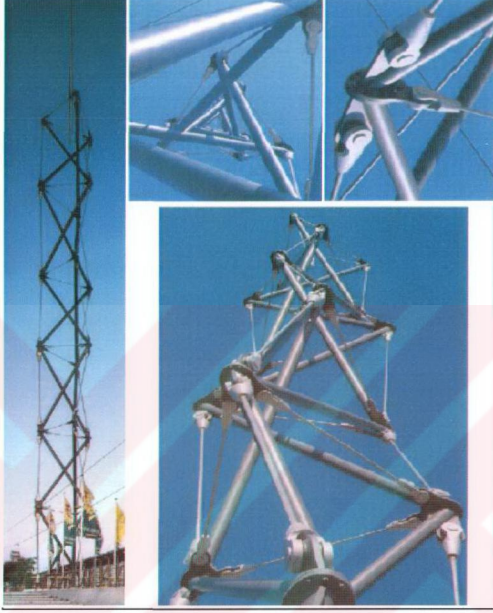
Yatay ve düşey yükler etkisi altında dengede ve rijit kalması için sistemdeki kablolarla ön-germe kuvveti uygulanmıştır. Georgia Dome ile ilgili detaylı bilgi ve resimler Ek 3'te verilmiştir.



Şekil 6.5 “Hiper Tensegrity Kubbe” planı ve kesiti

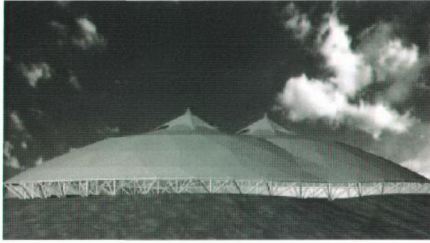
Tensegrity kule tasarımı, K.Snelson'un sistemi geliştirdiği sıralarda yaptığı heykellerden ortaya çıkmıştır. Tensegrity kule, tensegrity sistemlerin en küçük ve en basit birimi olan “simplex”ten oluşturulmuştur. Mühendis Mike Schlaich, dünyanın en yüksek tensegrity

kulesini tasarlamıştır. Rostock Uluslar arası bahçe fuarı (IGA 2003) için yaptığı çalışma, altı simplex hücreden meydana gelmiştir. Her hücrenin yüksekliği yaklaşık 8.3 m dir (Şekil 6.6)



Şekil 6.6 Rostok Tensegrity Kulesi

Arjantin La Plata stadyumu, Mimar Roberto Ferreira tarafından tasarlanmıştır. “Tenstar” adı verilen tensegrity uygulama prensibi ile yapılmış yapı ödül almış bir tasarımdır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7 La Plata Stadyum

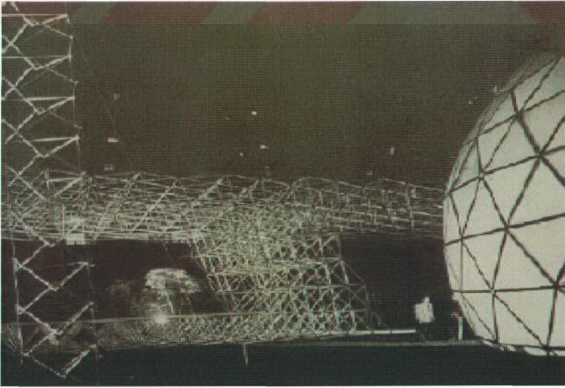
Asma-germe ve membran sistemlerle birlikte kullanılarak yapılan tensegrity kemerlerle, geniş açıklık geçen yapılar elde edilmiştir. Mimar Frei Otto, Kuveyt Spor Merkezi için, ana sistemi tensegrity kemerin oluşturduğu ve yanları membran örtüyle kapatılan bir yapı tasarlamıştır (Şekil 6.8).



Şekil 6.8 Tensegrity Kemer ve Membran Sistem

Tensegrity sistemler, uzay teknolojileri gelişiminde de kullanılmaktadır. Dünya dışı, yerleşik yaşam oluşturma amacı ile tensegrity prensipleri ile sistemler geliştirilmektedir. Bununla ilgili en önemli projelerden biri "Ay-Kolonileri" dir. R.B.Fuller, tensegrity sistemlerin yer çekimine veya herhangi bir dış kuvvet etkisine bağlı olmadan her konumda dengede duran, rijit sistemler olduğunu tespit etmiş, katlanabilir, hafif, tensegrity uydu ve ay koloni yapıları geliştirmiştir. (Şekil 6.9).

Hareketli tensegrity sistemler, uzay araştırmalarında önemli gelişmeler sağlamıştır. Sinyal antenleri, gözlem uyduları, roket kalkış panelleri... v.b. birçok yapı, tensegrity prensipleri kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6.9 R.B.Fullerin Tasarımları: Tensegrity kule, Jeodezik kubbe

Tensegrity prensipleri kullanılarak iç mimari mobilya üretimleri de yapılmıştır. Tasarımcı Ross M.Miller ve Stephen Wiesner, tensegrity masa, sandalye, koltuk ve ışık armatürleri gibi birçok iç mimari ürün tasarlamıştır (Şekil 6.10).



Şekil 6.10 Tensegrity Mobilya

## 7. SONUÇ

Başlangıçta sadece felsefi bir olgu olan tensegrity, sanat yapıtlarından tesadüf eseri ortaya çıkmış ilk yapı sistemidir. Tensegrity sistemlerin taşıyıcı yapı ve yapı elemanları oluşturabileceği fark edilmiş ve günümüzde mobilyadan uzaysal yapılara kadar birçok yapım sisteminde kullanımını sağlamak için çalışmalar yapılmıştır.

Tensegrity sistemler, kablo ve çubukların belli bir düzen içinde birleşimi ile bir bütün oluşturarak uzayda dengede durmasıyla meydana gelir. Kablo ve çubuklardan meydana geldiği için “hafif sistemler” olarak adlandırılır. Sistemde, kabloların birleşiminin sürekliliği ile çubukların birbirlerini kesmeden süresiz birleşimi, tensegrity sistemlerin temel prensibidir.

Tensegrity sistemler, maddenin atom veya molekül yapısına benzer özellik gösterir. Kablolar ve çubukların birleşimi ile oluşmuş en küçük birime “Tensegrity hücre” denir. Hücreler, rasyonel veya irrasyonel geometrik formlar oluşturabilir. Tensegrity hücreler tek tabakalıdır. Birden fazla hücrenin birleşmesiyle meydana gelen moleküllere “Çift Tabakalı Tensegrity Sistemler” denir.

Tensegrity sistemlerin çeşitlemeleri ve sınıflandırılması için düzgün çok yüzlü geometrilerden yararlanılmıştır. Çok yüzlü geometrilerin kenarlarını kablolar, kablolardaki gerilmeyi oluşturan iç gövdeyi basınç çubukları oluşturur.

Tensegrity sistemlerin oldukça karmaşık yapısı vardır. Kablo ve çubukların birleşimi kinematik ve statik olarak belirli olmalıdır. Sistem içinde sonsuz küçük yer değişimler, büyük deformasyonlara sebep olabilir. Bu yüzden tensegrity sistemlerin tasarımı, bilgisayar destekli form bulma yöntemleri ve hassas statik hesaplara dayanır. Tensegrity sistemlerin tasarım sürecindeki her adım için farklı yöntemler geliştirilmiştir.

Tensegrity sistemlerin, hafif, esnek ve hareketi kontrol edilebilir mekanizması olan uzaysal sistemler oluşturabildiği tespit edilmiştir. Bu özelliğinden yararlanarak açılır-kapanır geniş açıklık geçen çatı sistemleri geliştirilmiştir.

Tensegrity sistemler, seksen yıllık tarihi boyunca, birçok yapım sisteminde kullanılmıştır. Fakat tensegrity prensiplerini tam içeren sistemlerin kullanımı günümüzde çok yenidir. Tensegrity sistemler henüz tam anlamıyla bilinmemektedir. Dünyanın belli gelişmiş ülkelerinde bu sistemle ilgili araştırmalar yapılmaktadır. Günümüzde tensegrity sistemlerin tanıtılması, yaygınlaşması ve yapı sistemlerinde kullanımı hız kazanmıştır.

İç mimari mobilya ürünlerinden uzay yapılarına kadar birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada, tensegrity sistemlerin tanıtılması, yapı sistemlerinde kullanımıyla ilgili geniş bilgiler veren Türkçe bir kaynak oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışmada tensegrity sistemlerin en küçük biriminden en karmaşık birimine kadar verilen bilgiler, tensegrity sistemlerin temel prensiplerinin kavranmasında yardımcı olmaktadır.

Gelecekte önemli yer alacağı öngörülen uzaysal ağ görünümlü tensegrity sistemler, belli gelişmiş ülkeler dışında üzerinde çalışmalar yapılmamaktadır. Geniş açıklık geçen, hafif, hareketli mekanizmaya sahip olan uzaysal yapılar elde edilebilen bu sistem, ülkemizde sahip olduğumuz geniş imkânlar ile geliştirilmeye müsaittir. Tensegrity sistemler ile farklı ve yeni sistemler elde etmek mümkündür. Bu sistemlerin yapım teknolojilerinde kullanımı ve yaygınlaştırılması üzerinde durulması, ülkemizin diğer dünya devletleri arasındaki konumunun daha farklı olmasına ve gelişmiş toplumlar arasındaki yerinin üst düzeylere çıkmasını sağlayacaktır.

**KAYNAKLAR**

Akçali, İ. Deniz, Mekanizma Tekniği, Birsen Yayın Evi, İstanbul, 2002, s:249

Chassagnoux, A., "A Study of Morphological Characteristics of Tensegrity Structures", International Journal of Space Structures Vol. 7 No:2, 1992.

Coloney, R., "The Stability of Tensegrity Frameworks", International Journal of Space Structures Vol:7, 1992.

Emmerich, D.G., "Self-Tensioning Spherical Structures", International Journal of Space Structures Vol. 5 No: 3&4, 1990.

Emmerich, D.G., "Emmerich on Self-Tensioning Structures", International Journal of Space Structures Vol:11, 1996

Furuya, H., "Concept of Deployable Tensegrity Structures in Space Application", International Journal of Space Structures Vol:7, 1992

Fu, F. Ve Lan, T., "A study of Tensegrity Cable Domes", Space Structures 5, Thomas Telford, 2002

Fuller, R.B., "Tensional-Integrity Structures", 1981, www.bfi.org.

Grip, R., "The Correspondence Between Convex Polyhedra and Tensegrity Systems: A Classification System", International Journal of Space Structures Vol:7, 1992

Hanaor, A., "Aspects of Design of Double-Layer Tensegrity Domes, International Journal of Space Structures Vol:7, 1992.

Hanaor, A., "Double Layer Tensegrity Grids"

Hangai, Y., "Self-Equilibrating Stress Systems and Structural Behavior of Truss Structures Stabilized by Cable Tension", International Journal of Space Structures Vol:7, 1992

Jáuregui, V., "Tensegrity Structures and Their Applications"

Motro, R. "Structural Systems for the Future", s:236, 2003.

Motro, R., Belkacem, S., Vassart, N., "Form Finding Numerical Methods for Tensegrity Systems"

Motro, R., "Tensegrity Systems and Geodesic Domes", International Journal of Space Structures Vol:5, 1990.

Rebielak, J., "General Morphology of New Types of Tension-Strut Systems", Head of Division of Structures and Building Engineering, Department of Architecture, Wrocław University of Technology, POLONYA, 2002.

Sadao, S., "Fuller on Tensegrity", International Journal of Space Structures Vol.11 No:1-2, 1996.

Saidani, M. Ve Remise, E., "Research on Double Layer Tensegrity Systems", Tension Structures.

Shepherdson, E., "How Many Stricks Does It Take to Cross the Road?" Tension Structures, Tensegrity.

Wang, B., "Simplexes in Tensegrity Systems", Space Structures Technology Development, Çin

#### **INTERNET KAYNAKLARI**

[1][www.columbia.edu](http://www.columbia.edu)

[2][www.alumnos.unican.es](http://www.alumnos.unican.es)

[3][www.rwgrayprojects.com](http://www.rwgrayprojects.com)

[4][www.engr.wisc.edu](http://www.engr.wisc.edu)

[5][www.freiotto.com](http://www.freiotto.com)

[6][www.chanel1.com/users/bobwb/tenseg/book/revision.html](http://www.chanel1.com/users/bobwb/tenseg/book/revision.html)



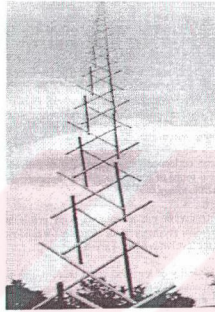
**EKLER**

- Ek 1 Keneth Snelson'un Çalışmaları  
Ek 2 D.G.Emmerich'in Çalışmaları  
Ek 3 "Atalanta Georgia Dome" Stadyumu Tensegrity Çatı Sistemi  
Ek 4 Mekanizma tekniği ve Kinematik



### Ek 1 Keneth Snelson'un Çalışmaları

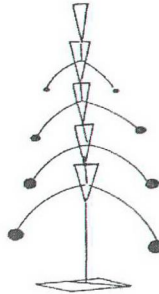
K. Snelson'un çalışmaları, oluşturduğu sistemlerin denge şartını araştırmaya yöneliktir. R.B.Fuller'e sunduğu çalışma, üç küçük modelden oluşmaktadır. K. Snelson, bunlara "birinden diğerine", "birinden sıradakine" ve "X-Form" adını vermiştir. Son çalışması x-form da kablo ve çubuklar kullanarak temel tensegrity prensipleri ile oluşmuş ilk yapıyı sunmuştur. R.B.Fuller ile çalışmalarından sonra yapmış olduğu "İğne Kulesi" adlı heykel, tensegrity sistemlerin temel yapısını gösteren ilk ve önemli yapıtlardan biridir (Şekil Ek-1.1).



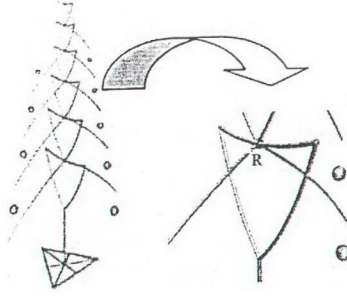
Şekil Ek 1.1 İğne Kulesi (IASS,Sayı:43,2002)

#### " Birinden diğerine"

Yere ankre edilmiş metal çubuk üzerine beş üçgen eleman oluşturarak dikme tamamlanmış, alt dört üçgene, üçgen düzlemine dik uçlarında kil topları bulunan teller asılmıştır. Dengenin sağlanması ve ağırlık merkezinin aşağıya çekilmesi için, üçgen boyutları ve çubuk uzunlukları aşağıdan yukarıya doğru büyütülmüştür. (Şekil Ek 1.2, Şekil Ek 1.3).

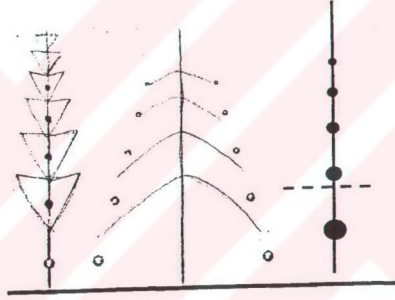


Şekil Ek 1.2 "Birinden diğerine" modeli (Motro,2003)



Şekil Ek 1.3 "Birinden diğerine" modelinden detay (Motro,2003)

Sistemin dengesi , heykelin denge merkezinin en alt yön aksının altında olmasına bağlıdır (Şekil Ek 1.4).

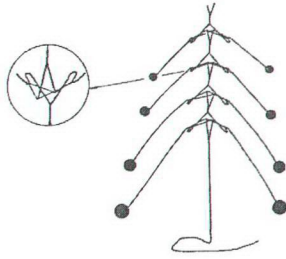


Şekil Ek 1.4 Denge Merkezi (Motro,2003)

#### "Birinden sıradakine"

Bu sistemin önemli bir tek farkı vardır. Sistem, yatay bileşenleri eşkenar dörtgen izdüşüm oluşturan dört kablo seti tarafından sabitlenmiş ve dengelenmiştir. Yatay olarak düzenlenmiş dört kablo seti tarafından taşınmaktadır.

Bileşenlerin alt elemanları, eşkenar dörtgenin farklı iki noktasından ara noktalara bağlanır. Sistemin denge prensibi diğer sistemlerle aynıdır. Bütün sistemin kontrollü, dikey çubukların üzerinde bulunan seri kütlelerin dengesine eşdeğerdir (Şekil Ek 1.5).



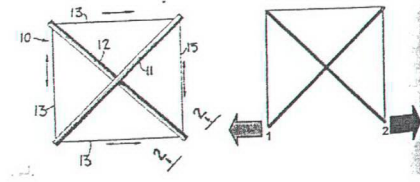
Şekil Ek 1.5 "Birinden sıradakine" Modeli

### "X-Form"

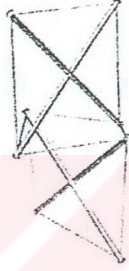


Şekil Ek 1.6 "X-Şekli"

K. Snelson'un iki çalışması arasındaki temel fark, çelik tellerin oluşturduğu modelin bileşenlerin aralarına bağlanan kabloların oluşturduğu eşkenar dörtgenlerle ilgilidir. K. Snelson, oluşan eşkenar dörtgenlerden faydalanarak tensegrity sistemler patentininin temel özelliklerini oluşturan "X" şeklini elde etmiştir. (Şekil Ek 1.6). "X" şeklinde iki çubuk çapraz olarak düzlem yüzeye yerleştirilmiş, çubukların uç noktalarından kablolar ile bağlanmıştır. Bu yapı, çekme gerilmelerini oluşturan kabloların sürekliliği ile basınç gerilmelerini oluşturan çubukların süreksizliği prensibini sağlamaktadır (Şekil Ek 1.7, Şekil Ek 1.8).



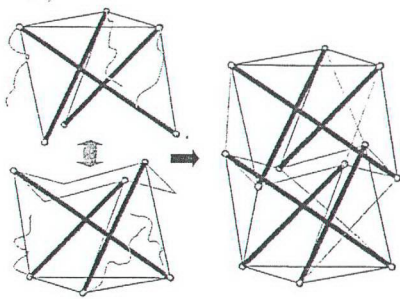
Şekil Ek 1.7 “X” Şekli (Motro,2003)



Şekil Ek 1.8 İki “x” şeklinin ilk birleşimlerinden meydana gelen sistem

### Needle Tower (İğne Kulesi)

İğne kulesi, birçok prizmatik tensegrity (Simplex) hücrelerin birleşmesinden oluşmuştur. İki simplex hücre üst üste birleştirilmiştir. Birleşim sonucunda altı yüzlü bir geometri oluşur. Rijitliği sağlamak için sisteme fazladan üç kablo eklenir (Şekil Ek 1.9).



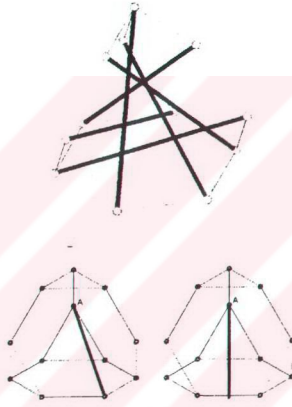
Şekil Ek 1.9 Üst üste eklenmiş simplex tensegrity hücreler (Motro.2003)

## Ek 2 D.G.Emmerich'in Çalışmaları

D.G.Emmerich form bulma çalışmaları için genellikle geometrik formlar kullanmıştır. Tasarladığı çalışmalarının büyük maketlerini yaparak sistemin denge şartını araştırmıştır. Kullanılan çok yüzlü geometrilere "Tensypolyhedra" denir.

### Kesik Dört Yüzlü Geometri

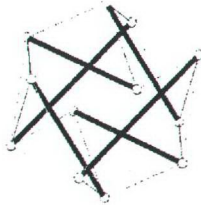
Bu örnekte tensegrity prensibine uygun denge konumu, geometrinin formundan dolayı tam olarak gerçekleşmemiştir. İç gerilme dengesinin oluşması için çubuklar, kesik dört yüzlü geometri içinde simetrik dizilim göstermelidir (Şekil Ek 2.1).



Şekil Ek 2.1 Kesik dört yüzlü geometri (Motro,2003)

### Yirmi Yüzlü Geometri (Genleşmiş Sekiz Yüzlü)

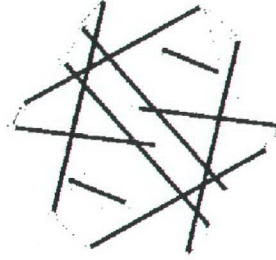
Basit sekiz yüzlü geometriden türetilmiş altı çubuklu tensegrity hücredir (Şekil Ek 2.2).



Şekil Ek 2.2 Genleşmiş Sekiz Yüzlü geometri (Motro,2003)

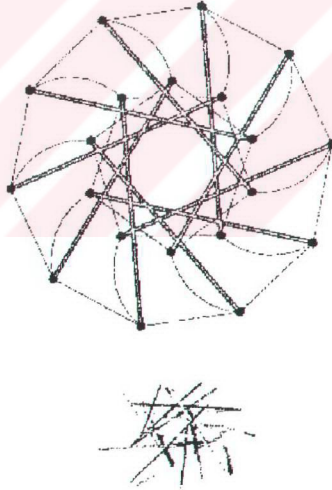
## On İki Yüzlü Geometri

Beş çift paralel çubuktan meydana gelmiş tensegrity hücredir (Şekil Ek 2.3)



Şekil Ek 2.3 On İki Yüzlü Geometri (Motro,2003)

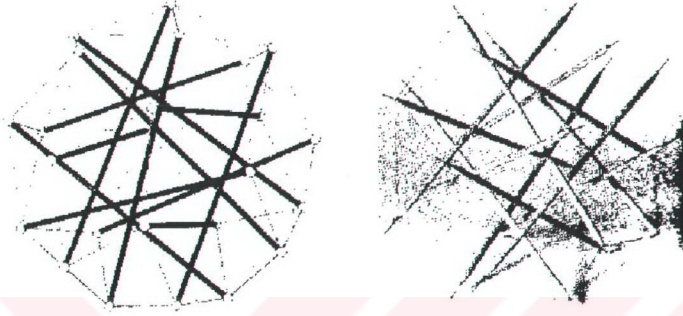
Düzlem on iki yüzlü tensegrity hücre şekil Ek 2.4'te verilmiştir.



Şekil Ek 2.4 Düzlem On İki Yüzlü Geometri (Motro,2003)

### Geniş Kübik Sekiz Yüzlü Geometri (Snub Cube)

Bazı çok yüzlü geometrilere fazladan çubuk eklenmesi ile “Tensypolyhedra” elde edilir. Bu yöntemle “Geniş Kübik Sekiz Yüzlü” geometri elde edilmiştir (şekil Ek 2.5).



şekil Ek 2.5 Geniş Kübik Sekiz Yüzlü

### Ek 3 “Atlanta Georgia Dome” Stadyumu Tensegrity Çatı Sistemi

Yapım yılı: 1992

Yapım yeri: Atlanta, Georgia, ABD

Yapı cinsi: Amerikan Futbol Stadyumu (Atlanta Falcons)

Yapı maliyeti: \$ 175 milyon Amerikan Doları

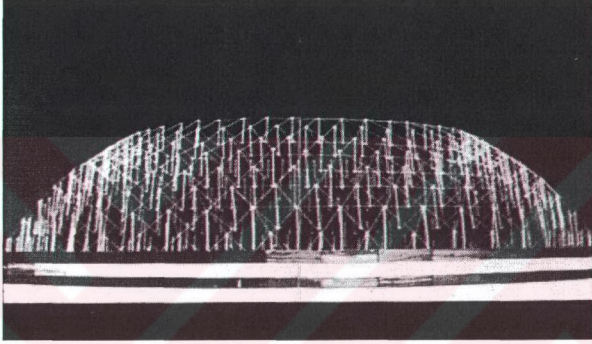
Seyirci kapasitesi: 80.000

Mimar: Heery International; Thompson, Ventulett, Stainback & Associates

Çatı yapı mühendisi: Weidlinger Associates

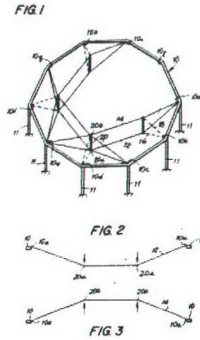
Çatı yapısı: Hiper “Tensegrity” Kubbe

Çatı açıklığı: 235m x 186m



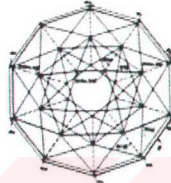
Şekil Ek 3.1 Georgia Dome tasarımı R.B.Fuller'in “Tensegrity Kubbe” tasarımından esinlenmiştir.

U.S. Patent Jul. 19, 1960 Sheet 1 of 12 4,757,650



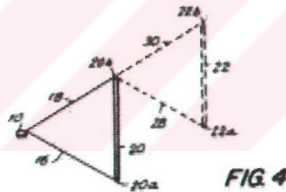
Şekil Ek 3.2 Hiper Tensegrity Kubbe tasarımı patenti ([www.columbia.edu](http://www.columbia.edu))

<b>United States Patent</b> [14]	[11] Patent Number:	4,757,650
<b>Burger</b>	[22] Date of Patent:	Jul. 19, 1988
[24] <b>CABLE DOME SYSTEM WITH MAIN CABLES ORIENTED ALONG CHORDS</b>	4,111,936 6-1978 Issued	12-93
[74] <b>Inventor: Hans L. Burger, 14 Chatham Dr., Hastings-on-Hudson, N. Y. 11755</b>	4,164,888 12-1978 Issued	12-90
	4,076,439 5-1979 Expired	12-91
[21] <b>Appl. No. FULLST</b>	<b>OTHER PUBLICATIONS</b>	
[22] <b>Filed: Sep. 28, 1986</b>	Architectural Record, Aug. 1979 opp. 176-1815	
[23] <b>Int. Cl.:</b> E28D 7/14	Primary Examiner—Carl D. Friedman	
[22] <b>U.S. Cl.:</b> 12-93, 12-780, 12-90	Assistant Examiner—Michael Isakoff	
[24] <b>Field of Search:</b> 12-93, 12-780, 12-90, 12-91, 4, 6, 602, 16, 12-98	Attorney Agent or Firm—Conroy & Dutton	
	[17] <b>ABSTRACT</b>	
[19] <b>References Cited</b>	A cable dome has lower and upper outer cables each consisting of a series of edge ring nodes which are spaced by one outer node. The lower and upper cables containing the same nodes are spaced from each other in alternation by a pair of inner nodes each having an upper and a lower node. Each upper node is vertically aligned with a lower node below it, forming a horizontal member in the shape of a corresponding edge ring node.	
<b>U.S. PATENT DOCUMENTS</b>	10 Claims, 11 Drawing Sheets	
4,071,939 1-1978 1-91		
4,068,236 10-1978 1-91		
4,062,587 1-1978 Continuing in pt. 1-91		
4,066,490 1-1978 1-91		
4,066,493 1-1978 1-91		

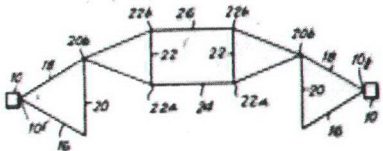


Şekil Ek 3.3 Hiper Tensegrity Kubbe tasarımı patenti (www.columbia.edu)

**U.S. Patent** Jul. 19, 1988 **Sheet 2 of 12** **4,757,650**

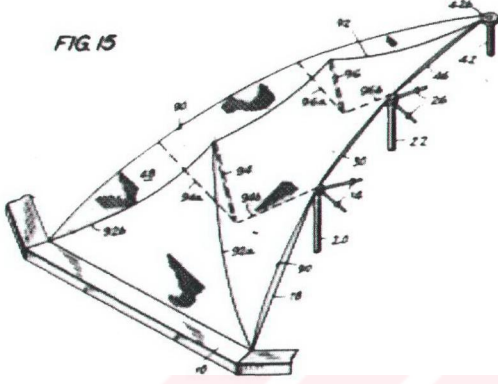


**FIG. 5a**



Şekil Ek 3.4 Hiper Tensegrity Kubbe tasarımı patenti (www.columbia.edu)

FIG. 15



Şekil Ek 3.5 Hiper Tensegrity Kubbe tasarım patenti (www.columbia.edu)

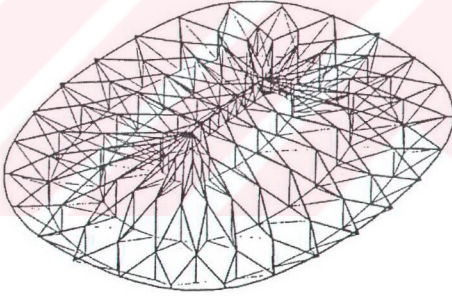
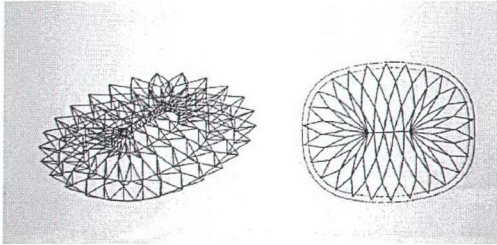


Fig 1. Hypar-Tensegrity Dome



Şekil Ek 3.6 Hiper Tensegrity Kubbe plan ve perspektifi (www.columbia.edu)

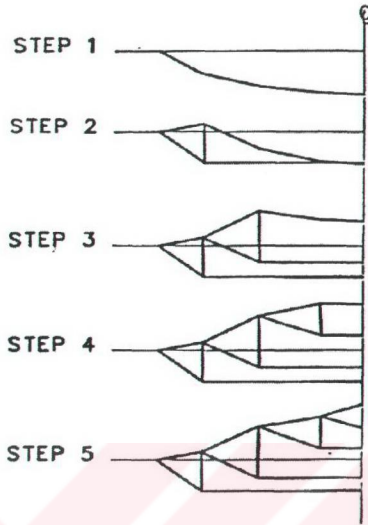


Fig 6. Erection Sequence

Şekil Ek 3.7 Çatı oluşum süreci (www.columbia.edu)

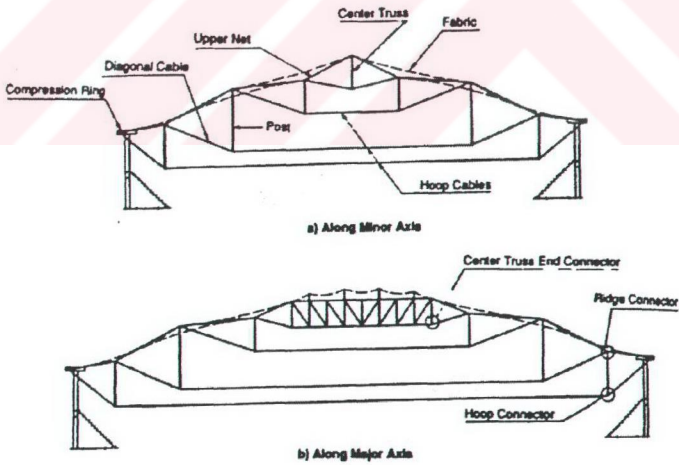
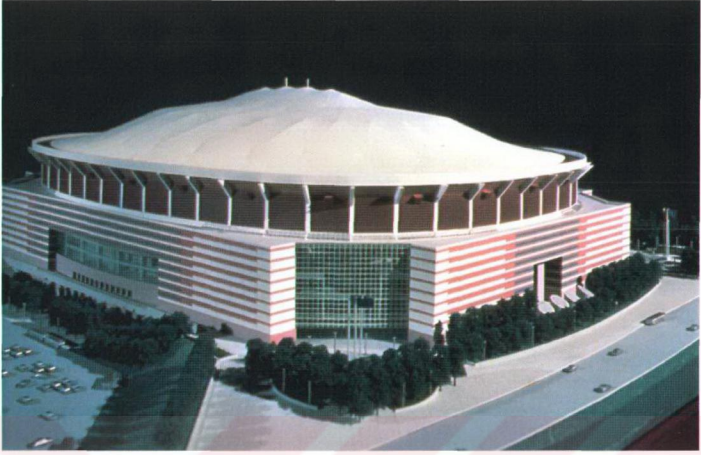


Fig 2. Sections

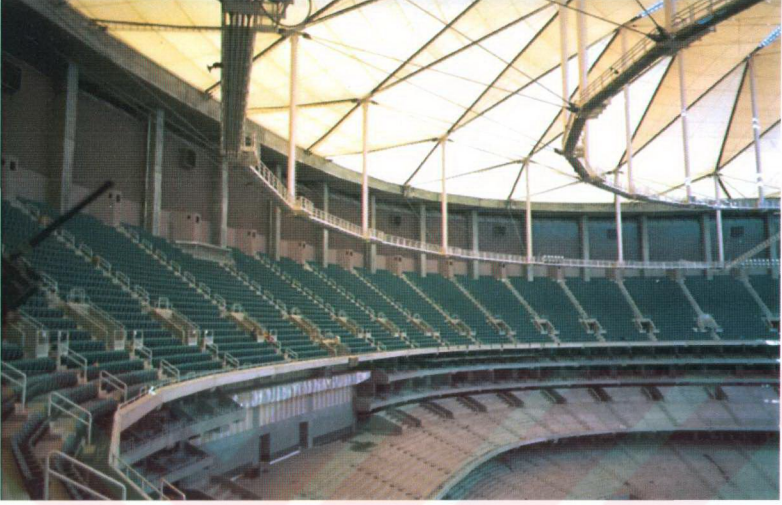
Şekil Ek 3.8 Çatı kesiti (www.columbia.edu)



Şekil Ek 3.9 Georgia Dome dış görünümü ([www.columbia.edu](http://www.columbia.edu))



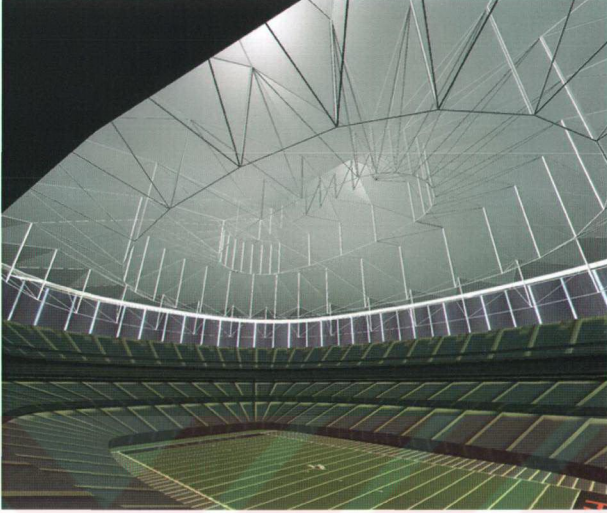
Şekil Ek 3.10 Georgia Dome gece görünümü ([www.columbia.edu](http://www.columbia.edu))



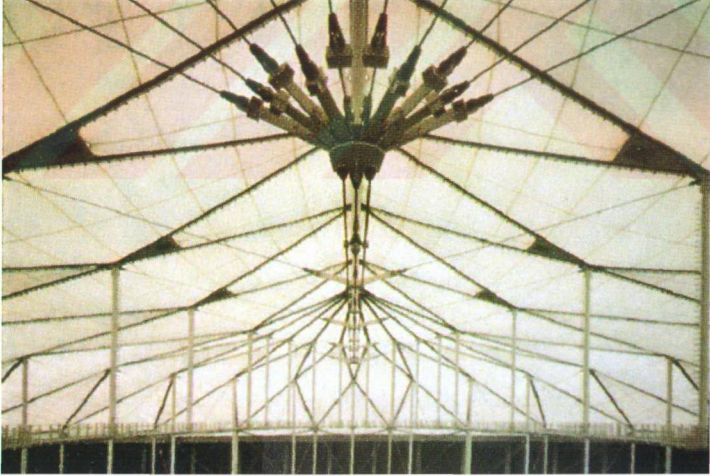
Şekil Ek 3.11 Stadyum iç perspektifi ([www.columbia.edu](http://www.columbia.edu))



Şekil Ek 3.12 Stadyum iç mekan genel perspektifi ([www.columbia.edu](http://www.columbia.edu))



Şekil Ek 3.13 Stadyumun 3D Modeli ([www.columbia.edu](http://www.columbia.edu))



Şekil Ek 3.14 Çatı strüktürü bağlantı detayı ([www.columbia.edu](http://www.columbia.edu))



Şekil Ek 3.15 Kabloların mesnetlere bağlanması (www.columbia.edu)



Şekil Ek 3.16 Membran çatı örtüsü (www.columbia.edu)



Şekil Ek 3.17 Membran çatı örtüsü (www.columbia.edu)



Şekil Ek 3.18 Tensegrity çatı ve membran örtü uygulaması (www.columbia.edu)



Şekil Ek 3.19 Kablo ve çubuk bağlantı detayı ([www.columbia.edu](http://www.columbia.edu))



Şekil Ek 3.20 Kablo ve çubuk bağlantı detayı ([www.columbia.edu](http://www.columbia.edu))

#### Ek 4 Mekanizma Tekniği ve Kinematik

Mekanizma; kuvvet ve hareket iletimi için kullanılabilen rijit cisimlerin rijit mafsallar ile birleştirildiği sistemdir. Mekanizma ve makine arasındaki fark, makinenin belirli bir amaç için üretilmiş olmasındır. Buna karşın mekanizma daha geneldir ve farklı makineler da kullanılıyor olabilir. Mekanizma, makine içinde hareketi belirleyen cisimlerin oluşturduğu sistemin bir modelidir. Bu cisimler esnek olsa bile mekanizma çalışmalarında rijit kabul edilebilir. Hareketi oluşturan kuvvetler veya cisimlerde oluşan gerilmeler düşünülmeden mekanizmalarda sadece hareketin incelenmesine “Kinematik” denir. Cisimlerin tamamen rijit düşünülmesi ile kinematik, hareketin geometrisidir.

Kinematik açıdan hareketi belirli mekanizmalar iki şekilde olabilir:

- Serbestlik derecesi bir değerini ( $F=1$ ) alan mekanizmalar.
- Serbestlik derecesi birden fazla olan, ancak kontrol edilen parametre sayısının ( $p$ ) mekanizma serbestlik derecesine ( $s$ ) eşit olduğu mekanizmalar ( $p=s$ ).

Mekanizma serbestlik derecesi, bir mekanizmanın her uzvunun konumunu ya da herhangi bir noktasının yerini tanımlamak için gerekli olan bağımsız değişken ya da parametre sayısına denir.

Hareket iletimi ile mekanizmalarda cisimler arasında kuvvet(moment) iletimi vardır. Verilen dış kuvvetlerin etkisi altında belirli bir konumda bir mekanizmayı oluşturan cisimlerde kuvvetlerin nerelere nasıl etkiğiği statik denge denklemleri kullanılarak belirlenir. Bu işleme “Mekanik Statik Kuvvet Analizi” denir.

Bilinen mekanizmalarda hareket özelliklerini belirlemek için yapılan çalışmaya “Kinematik Analiz” denir. Mekanizmadaki tüm uzuvların boyutları biliniyor kabul edilir. Bilinen mekanizmanın analizi yapılır.

Tipi bilinen bir mekanizmanın istenilen bir hareketi sağlaması için (yer değişim, hız, ivme) mekanizma boyut parametrelerinin (cismin mafsal noktaları arasındaki uzaklığı, düğüm noktası sayısı...) belirlenmesidir. Kinematik sentez kinematik analizden önce yapılır.

Kinematik açıdan belirsiz mekanizmalar; belirlenmiş olan parametre sayısının mekanizma serbestlik derecesinden az olduğu durumdur. Bu durumda mekanizmada bulunan uzuvların hareketi, sadece kinematik olarak değil, etki eden dış kuvvetler ve sistem dinamiği ile belirlenir.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	29.09.1978	
Doğum yeri	Antalya	
Lise	1993–1996	Özel Antalya Lisesi
Lisans	1996–2001	Mimar Sinan Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü
Yüksek Lisans	2001–2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Yapı Anabilim Dalı, Taşıyıcı Sistemler Programı

**Çalıştığı kurum(lar)**

2001-.....

Galip KAYA MİMARLIK ATELYESİ