

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**TEK KATMANLI UZAY KAFES KUBBELERDE  
ÇAPRAZ ELEMAN KULLANIMININ TASARIMA ETKİSİNİN  
BELİRLENMESİ**

**Mustafa ÖZCAN**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**OCAK 2019**

**ANTALYA**

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**TEK KATMANLI UZAY KAFES KUBBELERDE  
ÇAPRAZ ELEMAN KULLANIMININ TASARIMA ETKİSİNİN  
BELİRLENMESİ**

**Mustafa ÖZCAN**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**OCAK 2019**

**ANTALYA**

**T.C.**  
**AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEK KATMANLI UZAY KAFES KUBBELERDE**  
**ÇAPRAZ ELEMAN KULLANIMININ TASARIMA ETKİSİNİN**  
**BELİRLENMESİ**

**Mustafa ÖZCAN**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Bu tez .... / ..... / 201..... tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ .....

Doç. Dr. Ferhat ERDAL .....

Dr. Öğr. Üy. Bayram ER .....

## ÖZET

### TEK KATMANLI UZAY KAFES KUBBELERDE ÇAPRAZ ELEMAN KULLANIMININ TASARIMA ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

Mustafa ÖZCAN

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Ocak 2019; 52 sayfa

Tek katmanlı uzay kafes kubbeler farklı biçimleri ile günümüzde etkileyici ve estetik taşıyıcı sistem formları arasında yerini almıştır. Yapı malzemelerindeki gelişmelere paralel olarak bu yapılarda daha yüksek dayanımlı fakat daha küçük kesitler kullanılmaktadır. Küçük kesitlerin kullanılması yapıları nispeten hafifleterek kolonlara gelen yükleri, temel boyutlarını ve deprem yükünü azaltmaktadır. Ancak kesitlerin küçülmesi narinlikte artışa neden olmakta ve tek katmanlı uzay kafes yapılarda stabilite sorununu ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada tek katmanlı uzay kafes kubbelerin kullanım alanları, kaydedeğer örnekler kısaca incelendikten sonra bu tip yapıların stabil olmasının önemine işaret edilmiştir. Bu amaçla imalat kolaylığı açısından en çok tercih edilen kubbe tiplerinden rijit birleşimli nervürlü kubbe ile schwedler tipi mafsallı kubbe asimetrik yük kombinasyonlarında, eleman boyutlandırması esnasında güvenlik faktörü olarak doğrusallaştırılmış burkulma analizi ile tespit edilen burkulma katsayısı değeri esas alınarak incelenmiştir. İnceleme esnasında, asimetrik yüklerin uygulanmasında ve eleman boyutlandırmasında güncel yönetmeliklere uygun olmasına özen gösterilmiştir. Boyutlandırma esnasında elemanların standartta verilen şartları sağlaması dışında global burkulma kontrolünün özellikle narin yapılarda önemine dikkat çekilmiştir.

Tasarım sonuçlarına bakıldığında her iki modelde de kullanılan malzeme miktarı ve burkulma katsayısı değerlerinin birbirine yakın olduğunu görülmektedir. Ancak sehim miktarı açısından bakıldığında modeller arasında büyük fark olduğu görülmektedir. Sehim miktarı özellikle kaplamanın esnekliği açısından önemlidir; esnekliği yüksek olmayan bir kaplama seçildiğinde nervürlü kubbede rijitliği sağlamak için daha büyük kesit ihtiyacı doğacaktır. Mafsallı birleşimli kubbedeki sehim değeri ise makul düzeyde olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda schwedler tipi kubbenin daha rijit olduğu görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELELER:** doğrusallaştırılmış burkulma analizi, kubbe, stabilite, tek katmanlı uzay kafes

**JÜRİ:** Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Doç. Dr. Ferhat ERDAL

Dr. Öğr. Üy. Bayram ER

## ABSTRACT

### EFFECT OF USING BRACING MEMBERS ON DESIGN OF SINGLE LAYERED RIBBED DOME

Mustafa ÖZCAN

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

January 2019; 52 pages.

Braced domes with different forms are one of the most impressive and aesthetic structural systems. In recent developments of the material technology, structural members have higher strength but smaller sections. The use of smaller sections reduces self-weight and earthquake load but makes structures more slender and braced domes especially if they are of wide span and shallow, need to be analysed for any possible instability that may occur. In this thesis, it is pointed out the importance of stability analysis of such structures after a short review of braced dome examples. For this purpose, the most preferred type of dome, ribbed dome and schwedler dome are examined under asymmetric load combinations as the safety parameter during design as buckling factor determined by linear buckling analysis. During the examination, care was taken to calculate asymmetric loads to comply with the current regulations in design. In addition to providing the regulation conditions in design members, the importance of buckling factor check has been demonstrated especially in braced domes.

When design results are considered, it is seen that the material quantity used in both models and the buckling factors are close to each other. However, there is a big difference between the models in terms of deflection. When non-flexible covering is selected, larger member sections will be required to ensure the rigidity in ribbed dome. The deflection in schwedler dome is seen to be reasonable. In this respect, the schwedler dome was found to be more rigid.

**KEYWORDS:** braced dome, linear buckling analysis, single layered space structures, stability

**COMMITTEE:** Assoc. Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Assoc. Prof. Ferhat ERDAL

Asst. Prof. Dr. Bayram ER

## ÖNSÖZ

Mühendislikteki en eski taşıyıcı sistemlerden biri olan kubbe; malzemeyi en ekonomik kullanımı ile geniş alanların en etkili biçimde örtülmesini sağlayarak insanlık tarihinde büyük bir iz bırakmıştır. Malzeme teknolojisindeki ilerlemeler, kubbe yapıların daha geniş açıklıkları daha küçük kesitlerle estetik biçimde örtmesini sağlamış ve tek katmanlı uzay kafes kubbelerin yayılmasının önünü açmıştır. Ancak bu durum yapılarda özellikle asimetrik yükler altında öngörülmesi zor stabilite kaybını kolaylaştırmaktadır.

Bu tez çalışması ile boyutlandırma esnasında elemanların güncel yönetmeliklerde verilen şartları sağlaması yanında global burkulma kontrolünün, asimetrik yükler altında tek katmanlı uzay kafes yapılarda önemine dikkat çekilmeye çalışılmıştır.

Bana bu çalışma imkanını sunan ve bu süreçte her türlü desteği esirgemeyen danışman hocam sayın Doç. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ başta olmak üzere, değerli bilgi ve görüşlerini benimle paylaşan sayın Doç. Dr. Ferhat ERDAL'a, maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme ve yakın arkadaşlarıma, en içten teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	4
3. MATERYAL VE METOT.....	8
3.1. Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbeler.....	8
3.1.1. Uzay kafes sistem tanımı.....	8
3.1.2. Izgara (grid) sistemler.....	8
3.1.3. Çaprazlı (braced) kubbe.....	9
3.1.3.1. Gelişimi ve tarihçesi.....	9
3.1.3.2. Çeşitleri.....	11
3.1.4. Türkiye’den uzay kafes kubbe örnekleri.....	17
3.2. Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbelerin Analizi.....	19
3.2.1. Kubbe Davranışı.....	19
3.2.2. Analiz.....	20
3.3. Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbelerin Stabilitesi.....	20
3.3.1. Giriş.....	20
3.3.2. Stabilitate kavramı.....	21
3.3.2.1. Eleman burkulması.....	23
3.3.2.2. Yerel burkulma.....	24
3.3.2.3. Global burkulma.....	26
3.4. Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbe Tasarımı.....	28
3.4.1. Giriş.....	28
3.4.2. Modellere ilişkin bilgiler.....	28
3.4.3. Modellerin oluşturulması.....	29
3.4.4. Yükler ve yük kombinasyonları.....	31
3.4.4.1. Zati ve hareketli yük.....	31
3.4.4.2. Rüzgâr yükü.....	31

3.4.4.3. Kar yükü.....	36
3.4.4.4. Deprem yükü.....	39
3.4.4.5. Sıcaklık yükü .....	39
3.4.4.6. Yük kombinasyonları.....	40
3.4.5. Analiz ve boyutlandırma.....	41
4. BULGULAR.....	42
5. TARTIŞMA .....	48
6. SONUÇLAR.....	49
7. KAYNAKLAR .....	50
ÖZGEÇMİŞ	



## AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbelerde Çapraz Eleman Kullanımının Tasarıma Etkisinin Belirlenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../.....

Mustafa ÖZCAN

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$I$	: Atalet momenti
$I_v$	: Türbülans şiddeti
$E$	: Yapısal çelik elastisite modülü (210000 MPa)
$F_u$	: Yapısal çelik karakteristik çekme dayanımı
$F_{ue}$	: Yapısal çelik hesap çekme dayanımı
$F_y$	: Yapısal çelik karakteristik akma gerilmesi
$F_y$	: Yapısal çelik hesap akma dayanımı
$G$	: Sabit yük
$K_l$	: Elastik yapısal rijitlik matrisi
$K_g$	: Geometrik rijitlik matrisi
$L$	: Eleman boyu
$P_{cr}$	: Kritik burkulma yükü
$Re$	: Reynolds sayısı
$W$	: Rüzgâr yükü
$S$	: Kar yükü
$T$	: Sıcaklık değişmesi etkileri
$c_e$	: Maruz kalma katsayısı
$c_p$	: Rüzgâr basınç katsayısı
$c_{season}$	: Mevsim katsayısı
$c_t$	: Isı katsayısı
$d$	:Yapının derinliği (aksi belirtilmediyse, rüzgar yönüne paralel doğrultudaki yüzey uzunluğu)
$h$	: Yapı yüksekliği
$l$	: Çubuğun burkulma boyu

$q_b$	: Referans ortalama (esas) hız kaynaklı rüzgâr basıncı
$q_p$	: Tepe hız kaynaklı rüzgâr basıncı
$s$	: Çatı kar yükü ( $\text{kN/m}^2$ )
$s_k$	: Dikkate alınan mahaldeki karakteristik zemin kar yükü ( $\text{kN/m}^2$ )
$r$	: Atalet yarıçapı
$r$	: Yük vektörü
$v_b$	: Esas rüzgâr hızı
$v_{b,0}$	: Esas rüzgâr hızının temel değeri
$v_m$	: Ortalama rüzgâr hızı
$w$	: Rüzgâr basıncı
$z_e$	: Dış rüzgâr etkisi için referans yükseklik
$\beta$	: Silindirik çatı sistemleri için, eğri yüzeyin tanjantı ile yatay düzlem arasındaki açı
$\Delta$	: Sistemin burkulma halindeki yer değiştirme vektörü
$\lambda$	: Burkulma katsayısı
$\lambda$	: Global burkulma yük faktörü
$\mu$	: Kar yükü şekil katsayısı
$\rho$	: Hava yoğunluğ
$\sigma_{cr}$	: Kritik burkulma gerilmesi
$\sigma_y$	: Akma gerilmesi.

Bu tez çalışmasında sayıların ondalık kısmı (.) ile ayrılmıştır.

## **Kısaltmalar**

AISC : American Institute of Steel Construction (Amerikan elik Konstrüsyon Enstitüsü)

ASCE : American Society of Civil Engineers (Amerikan İnşaat Mühendisleri Odası)

LRFD : Load Resistance Factor Design (Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım)

ha : Hektar

kN : Kilonewton

m : Metre

MPa : Megapascal

TÇY : elik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik

TS : Türk Standartları Enstitüsü

EN : European Norms (Avrupa Normları)

AÜ : Akdeniz Üniversitesi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Önemli antik kubbeler: a) Pantheon, Roma; b) Ayasofya, İstanbul .....	1
Şekil 1.2. Mısır Çarşısı, Paris, Fransa.....	2
Şekil 1.3. Centennial Hall, Wrocław, Polonya .....	2
Şekil 1.4. Zeiss Gözlemevi, Almanya.....	3
Şekil 2.1. Asimetrik kar yükü nedeniyle tersine dönerek burkulan kubbe. ....	4
Şekil 3.1. Izgara (grid) sistemler.....	9
Şekil 3.2. Erken dönem çaprazlı (braced) kubbeler.....	10
Şekil 3.3. Çaprazlı (braced) kubbe türleri.....	11
Şekil 3.4. Bell's Sport Centre, İngiltere .....	12
Şekil 3.5. Piscine Tournesol, Fransa.....	12
Şekil 3.6. Swindon Leisure Centre, İngiltere.....	13
Şekil 3.7. Charlotte Coliseum, North Carolina, ABD .....	13
Şekil 3.8. Pavillon Z Sergi Alanı, Brno, Çekya.....	14
Şekil 3.9. Lamella biçimi .....	14
Şekil 3.10. Houston Astrodome, Teksas, ABD .....	15
Şekil 3.11. Louisiana Superdome, New Orleans, ABD.....	15
Şekil 3.12. Desert Dome - Henry Doorly Zoo Omaha, Nebraska, ABD.....	16
Şekil 3.13. Jeodezik kubbenin biçimlendirilmesi .....	16
Şekil 3.14. 50 m çaplı çift katmanlı uzay kafes kubbe, Terzi Baba Camii, Erzincan.....	17
Şekil 3.15. 72 m çaplı lamella kubbe, Panora Avm, Ankara .....	17
Şekil 3.16. 21 m çaplı jeodezik kubbe, Konya Bilim Merkezi Planetarium Binası .....	17
Şekil 3.17. 40 m çaplı kubbe, Su Kuşları Kafesi, Bursa Hayvanat Bahçesi.....	18
Şekil 3.18. 30 m çaplı jeodezik kubbe, Kışladığı Altın Madeni, Uşak.....	18
Şekil 3.19. 124 m çaplı çift katmanlı uzay kafes kubbe, Akçansa Çimento Stokholü, Çanakkale .....	18

Şekil 3.20. Kubbede yük dağılımı.....	19
Şekil 3.21. Çaprazlama şekilleri .....	19
Şekil 3.22. Yük-şekil değiştirme eğrisinde simetrik ve asimetrik burkulma davranışları.....	21
Şekil 3.23. Tersine dönerek (snap through) burkulma.....	22
Şekil 3.24. Asimetrik burkulma .....	22
Şekil 3.25. Eleman burkulması .....	24
Şekil 3.26. Düğüm noktası burkulması.....	24
Şekil 3.27. Eleman ve düğüm noktası burkulması.....	24
Şekil 3.28. Tersine dönerek burkulma (snap-through) .....	25
Şekil 3.29. Tekil yüke bağlı burkulma.....	25
Şekil 3.30. a) Model 1; b) Model 2 .....	28
Şekil 3.31. Yapının plan ve cephe görünüşleri .....	28
Şekil 3.32. Formex algoritması ile üretilen Model 2 .....	30
Şekil 3.33. Silindirik yüzeylerde Reynolds katsayısı- akış ilişkisi .....	32
Şekil 3.34. Maruz kalma katsayısı, $c_e(z)$ .....	33
Şekil 3.35. Dairesel tabanlı kubbeler için tavsiye edilen $c_{pe,10}$ dış basınç katsayıları.....	34
Şekil 3.36. Rüzgâr dış basıncı $w_e$ , kubbe yüzeyine dağılımı .....	35
Şekil 3.37. Rüzgâr pozitif iç basıncı, $w_{ip} = 0.17 \text{ kN/m}^2$ .....	36
Şekil 3.38. Rüzgâr negatif iç basıncı, $w_{in} = 0.25 \text{ kN/m}^2$ .....	36
Şekil 3.39. Silindirik çatılar için kar yükü şekil katsayısı.....	37
Şekil 3.40. Durum (II) için kubbede kar yükü şekil katsayısı dağılımı (Maten 2011) ...	38
Şekil 3.41. Farklı yükseklik/açıklık oranına sahip silindirik çatılar için tavsiye edilen kar yükü şekil katsayıları ( $\beta \leq 60^\circ$ ) .....	38
Şekil 3.42. Durum (ii) birikmiş (drifted) kar yükü şekil katsayısı (Maten 2011).....	39
Şekil 3.43. Durum (i) birikmemiş (undrifted) kar yükü dağılımı .....	39
Şekil 3.44. Durum (ii) birikmiş (drifted) kar yükü dağılımı .....	39

<b>Şekil 4.1.</b> Model 1 için seçilen kesitler .....	43
<b>Şekil 4.2.</b> Model 2 için seçilen kesitler .....	43
<b>Şekil 4.3.</b> Kombinasyon (10) için 1. burkulma mod şekli ( $\lambda = 3.55$ ).....	44
<b>Şekil 4.4.</b> Kombinasyon (3) için 1. burkulma mod şekli ( $\lambda = 3.77$ ) .....	44
<b>Şekil 4.5.</b> Kombinasyon (8) için 1. burkulma mod şekli ( $\lambda = 3.95$ ) .....	44
<b>Şekil 4.6.</b> Kombinasyon (8) için 1. burkulma mod şekli ( $\lambda = 3.11$ ) .....	45
<b>Şekil 4.7.</b> Kombinasyon (10) için 1. burkulma mod şekli ( $\lambda = 3.45$ ) .....	45
<b>Şekil 4.8.</b> Kombinasyon (9) için 1. burkulma mod şekli ( $\lambda = 3.49$ ) .....	45
<b>Şekil 4.9.</b> Model 1’de en elverişsiz sehim kombinasyonu (3) için deformasyon dağılımı, $\delta_{max} = 11$ cm. ....	46
<b>Şekil 4.10.</b> Model 2’de en elverişsiz sehim kombinasyonu (1) için deformasyon dağılımı, $\delta_{max} = 1.45$ cm .....	47

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. A, B ve C noktalarında $cp$ ve $we$ değerleri .....	35
Çizelge 4.1. Model 1 için uygun kesit miktarı.....	42
Çizelge 4.2. Model 2 için uygun kesit miktarı.....	42

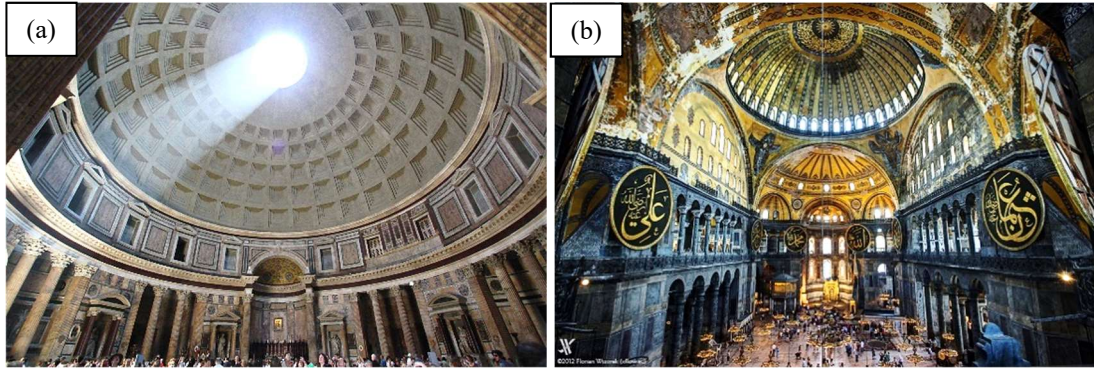


## 1. GİRİŞ

Mühendisler ve mimarlar geniş açıklıkları örtmeyi sağlayan yapı sistemlerine her zaman özel bir ilgi göstermiştir. Stadyumlar, toplantı salonları, sergi alanları, yüzme havuzları, alışveriş merkezleri ve sanayi yapıları; açık ve geniş alanlar talep eden, içerden en az destek ile müdahale gerektiren yapıların tipik örnekleridir.

Mühendislikteki en eski taşıyıcı sistemlerden biri olan kubbe; çift eğrilikli formu, açıklıkları minimum yüzey alanı ve malzemeyi en ekonomik kullanımı ile geniş alanların en etkili biçimde örtülmesini sağlamıştır.

Kubbe yüzeyi ilk olarak M.S 120’de İmparator Hadrian tarafından Roma’daki Pantheon tapınağında kullanılmıştır. Günümüze kadar hala ayakta olan birçok antik kubbe Asya, Yunanistan, Rusya ve Avrupa’da bulunmaktadır. İstanbul’daki Ayasofya, Londra’daki St. Paul Katedrali, Roma’daki Aziz Petrus Bazilikası göze en çok çarpan antik kubbelerdir (Şekil 1.1).



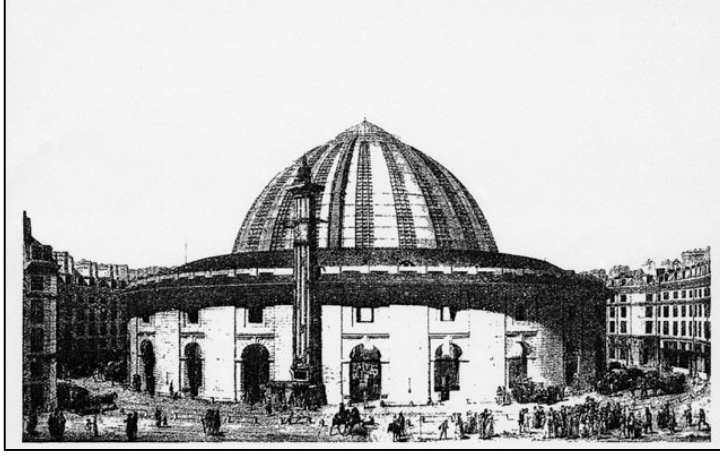
**Şekil 1.1.** Önemli antik kubbeler: a) Pantheon, Roma; b) Ayasofya, İstanbul

Kubbelerin gelişimi mevcut malzemelerin gelişimiyle yakından ilgili olmuştur. Antik çağda kubbe inşaatında taş kullanılmış, tuğla yavaş yavaş taş işçiliğinin yerini almaya başlamıştır. Ahşap, Orta Çağ’dan başlıca örtü malzemesi olarak kullanılmış ve hatta Almanya, Fransa, İtalya, Rusya ve İskandinavya’daki bazı ahşap kubbeler günümüze kadar varlığını korumaktadır. Genellikle taş kubbelerin koruyucu tabakası olarak kullanılmıştır.

Kubbe ile örtülen geniş açıklıklar, 19. yy. da mimarların hayal gücünde önemli yer kazanmış ve çoğu büyük sergi binalara kubbe ile örtülmüştür. Bu akımın belirleyici faktörü, nispeten yüksek mukavemet sağlarken aynı zamanda nispeten hafif, potansiyelinin farkına erken varan mühendis ve mimarlar için heyecan verici yeni bir dönem açan, çeliğin kullanılmaya başlanması ile olmuştur.

Çelik, üretiminin yayılmaya başlaması ile büyük ölçüde geliştirilmiş yüksek mukavemet özelliği sayesinde uzay kafes kubbe çeşitlerinin gelişimini ve geniş açıklık için kullanımında temel etken olduğunu kanıtladı. Beton, kubbe inşaatında Romalılar tarafından yaygın bir biçimde kullanıldı; fakat donatısız beton, basınçta güçlü, çekmede zayıf olmasına nedeniyle donatısız beton kubbe kesitinin oldukça kalın yapılması gerekiyordu.

Çelik, kubbe inşaatında ilk olarak 1811’de, Belanger ve Brunette tarafından Paris’deki mısır çarşısının merkez kısmını demir kubbe ile örtmüşlerdir (Şekil 1.2). Hadde profil ve ahşap konstrüksiyon ile yapılan geleneksel yöntemlerle uyumlu olmasına rağmen bu yapı sistemi mimarlar ve mühendisler arasında büyük ilgi uyandırmıştır.



**Şekil 1.2.** Mısır Çarşısı, Paris, Fransa

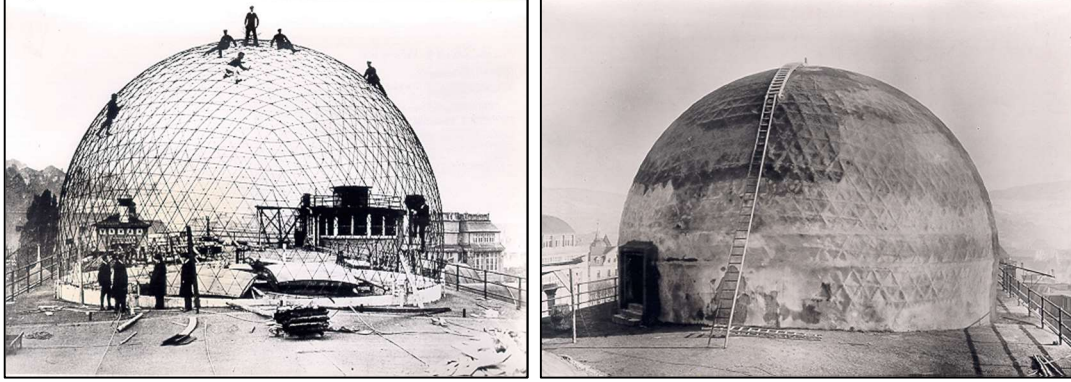
Kesme kuvvetine dayanım için betona çelik donatı eklemek yapı mühendisliği alanında heyecan verici yeni bir alan açtı. İlk betonarme kubbelerden biri Max Berg tarafından 1912 yılında tasarlanan, Polonya’daki Centennial Hall üzerindeki meşhur nervürlü kubbe oldu. Bu kubbe, ilk ve hala en büyük betonarme nervürlü kubbe olma özelliğini taşımaktadır. 65 m çapında dairesel bir alanı örten, 4 eğri kemer ile desteklenen merkez kubbe, paralel beş halka birbirine bağlanmış 32 radyal nervür içerir. İstanbul’daki Ayasofya’ya benzer yük aktarım davranışıyla- dört küresel yarım kubbe destek görevi görür. Bu tarz yapı, gereğinden fazla ağır olması ve betonun avantajlı yönlerinin tam kapasite kullanılmamasına rağmen kendini kanıtladı (Şekil 1.3).



**Şekil 1.3.** Centennial Hall, Wrocław, Polonya

Almanya’nın Jena kentinde Zeiss Gözlem Evi çalışmalarında, baş mühendis Dr. Walter Bauersfeld tarafından tasarlanan ilk betonarme kabuk yapısı 1922’de inşa edildi (Şekil 1.4). Bu inşaat mühendisliği tarihinin ilk ince kabuk beton yapısı oluşturulmuş, dünyanın ilk hafif çelik çerçevesi, ferrocement örtülü yapısıydı. Temiz açıklığı 25 m olan betonarme kabuk sadece 60.3 mm kalınlığı ile bu kubbe muazzam bir gelişme olarak

tarihe geçti. Gözlem evini örten bu yapının hızlı başarısının sonucu olarak, Jena'da açıklığı 40 m kalınlığı yalnızca 60.3 mm ikinci kubbe ile birlikte sayısız betonarme kabuk kubbe inşa edildi.



**Şekil 1.4.** Zeiss Gözlemevi, Almanya

Ancak, tasarımcıların ilk betonarme kabuk kullanmadaki bu büyük hevesleri, bu inşaat formunun sakıncalarının farkına varınca; detaylı ve oldukça pahalı kalıp imalatı, yavaş inşaat süresi ve çoğu zaman ekonomik olmayan nihai maliyeti nedeniyle betonarme kabuklara olan ilgi gitgide azaldı. Çelik, alüminyum alaşımları ve cam elyafı ile güçlendirilmiş plastiklerin avantajlarının kabul gördüğü bir döneme girilmekteydi. 20.yy. son çeyreğinde, çelik uzay kafes kubbelerin cesur ve yaratıcı kullanımı, tüm dünyada özel bir yer buldu.

Tez çalışması kapsamında tek katmanlı uzay kafes kubbeler arasında imalat kolaylığı açısından en çok tercih edilen kubbe tiplerinden rijit birleşimli nervürlü kubbe ile schwedler tipi mafsallı kubbe; güncel yönetmeliklerde tarif edilen asimetrik yükler ve yük kombinasyonları altında eleman boyutlandırması esnasında güvenlik faktörü olarak doğrusallaştırılmış burkulma analizi sonucu tespit edilen global burkulma katsayısı değeri,  $\lambda$  esas alınarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda çalışmanın ikinci bölümünde uzay kafes sistemlerin çalışma prensibi ve tek katmanlı uzay kafes kubbe biçimlerinin kayda değer örneklerine yer verilerek sistemin kullanım alanları ve tarihçesi ortaya konulmuştur. İlerleyen bölümde çelik kubbelerin analizinde hem sistemin hem de eleman ve düğüm noktalarının stabilite kontrollerinin önemine işaret edilmiştir. Devamında ise uygulamada oldukça tercih edilen iki farklı kubbe modelinin güncel yönetmeliklerde tarif edilen yük ve yük kombinasyonlarına uygun analiz ve boyutlandırması yanında global burkulma katsayısı esas alınarak incelenmiştir. Son bölümde çalışmadan elde edilen bulguların değerlendirmesi yapılmıştır.

## 2. KAYNAK TARAMASI

Timoshenko ve Woinowsky-Kriger (1959), plak ve kabukların teorisi isimli kitapta kubbelerdeki gerilme dağılımı ve deplasmanların tespiti için analitik çözümler sunulmuştur.

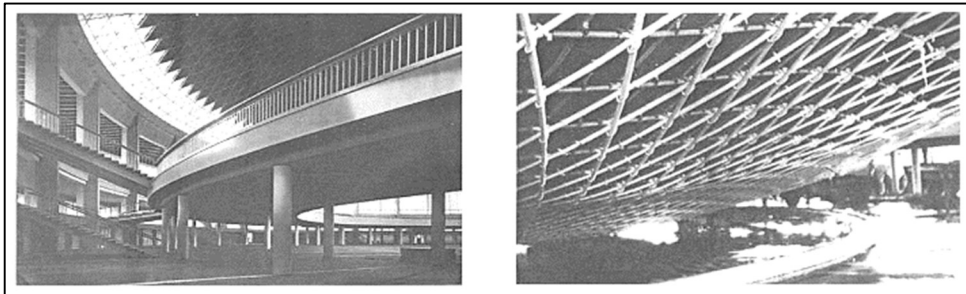
Budiansky (1959), kabuğun asimetrik burkulma mod şekline geçişine sebep olan sınır yükün teorik olarak tespit edilmesini sağlamıştır.

Benjamin (1959), Schwedler tipi kubbe analizinde rijitlik matrisi yöntemi ve kabuk analojisi yönteminde çıkan sonuçlar karşılaştırıldığında, bu tip kubbelerde gerilme dağılımının birleşimlerin rijitliği ile yakından alakalı olduğu, hesaplarda rijitliğin ihmal edilmesi özellikle asimetrik yükleme durumları için elemanlarda eksenel yükleri artıracak ve aşırı deplasmanlar oluşturacak gözlenmiştir.

Timoshenko (1961) elastik burkulma teorisi kitabında, kabukların burkulma problemlerine teorik çözümler sunulmuş; kabukların burkulmasında sınır yük noktasına ulaşmadan önce diğer mod şekillerinde de çatallanma burkulması olma olasılığı olduğu ortaya konulmuştur.

Kloppel ve Schardt (1962), yapılan çalışmalarda tek katmanlı kubbelerin stabilite problemi ilk defa ele alınmıştır.

Soare (1963), Ocak 1963'de Bükreş'te tersine dönerek burkulmuş, 93.5 m çapında 19.107 m yüksekliğinde bir kubbenin göçme mekanizması araştırılmış ve raporunda; dar alanlarda dengesiz birikmiş kar yükünün kubbenin tersine dönerek burkulmaya sebep olduğu, mekanizma oluşan alanda eleman birleşimlerindeki yenilmenin hızla diğerlerine yayılarak ters dönme hareketini kolaylaştırdığı, mesnet görevi gören gerilme halkası ilk pozisyonunu değiştirmede için kubbenin ters dönerek burkulduktan sonraki asılı halini korumasına yardımcı olduğu bulgularına ulaşılmıştır (Şekil 2.1). Son bölümde bu rapor doğrultusunda tek katmanlı kubbe tasarımcılarına; tasarlanacak yapı alanında iklimsel koşulların oluşturduğu asimetrik yükleri gerçekçi bir yaklaşımla ele alarak, kubbenin yerel ve global burkulma kontrollerine, bu yükler altında birleşimlerin kesmeye ve burkulmaya mukavemet gösterecek şekilde tasarlanmasına önem verilmesi tavsiye edilmiştir.



**Şekil 2.1.** Asimetrik kar yükü nedeniyle tersine dönerek burkulmuş kubbe.

Huang (1964), basık kabuklarda asimetrik burkulma problemi ele alınmış ve  $\lambda > 5.5$  değerleri için asimetrik burkulma mod şekillerine ulaşmada sınır yük, tersine dönerek (simetrik) burkulma yükünden daha düşük olduğunu gösterilmiştir.

Makowski (1966) tarafından yazılan 'Steel Space Structures' isimli kitap, çelik uzay kafes sistemler hakkında yayınlanmış en geniş kapsamlı kitaptır. Bu eserde çelik uzay taşıyıcı sistemlerin tarihi gelişimi anlatılmıştır.

Tillman (1970), küresel kabukların yük-yer değiştirme eğrisini sadece kritik burkulma değerine kadar değil, burkulma sonrasının da çizilmesini sağlayan bir yükleme sistemi geliştirilmesi sayesinde kabukların burkulma olayını daha detaylı incelenebilmiştir. Sonuçlarında Budiansky ve Huang'ın teorilerini doğrulanmıştır ancak yükseklik-açıklık oranının artmasının asimetrik burkulma aralığının açılma eğiliminde olduğunu gösterilmiştir.

Nooshin (1975), uzay kafes yapıların matematiksel olarak biçimlendirme tekniği Formex algoritmasını sunmuştur.

Dragone (1979), yarı küresel kubbeler üzerindeki rüzgâr basınç dağılımının, kubbenin rüzgâr alan yüzünde az miktarda basınç ve aksi tarafta büyük miktarda emme kuvveti oluştuğu doğrulanmıştır.

Allen ve Bulson (1980), elemanlardaki kusurların kubbenin yük taşıma kapasitesini azaltacağından burkulma testlerinin sonuçlarında dalgalanma olduğu, bu nedenle tasarımcıların daha muhafazakâr olması gerektiği ve kritik burkulma yükünü  $p_0/4$  kullanmaları tavsiye edilmektedir.

Constantinou (1980), Schwedler, lamella ve üç doğrultulu ızgara (grid) sistemli kubbelerin zati yük, rüzgâr yükü, asimetrik kar yükü altında; kabuk analojisi ve rijitlik matrisi yöntemi altında mafsallı birleşim ve rijit birleşim durumları için hesaplamalar yapılarak kubbelerdeki gerilme dağılımı arasındaki farkları araştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda; Schwedler tipi kubbede aksenal kuvvetler, kabuk analojisi yöntemiyle yapılan hesaplarda oldukça gerçeğe yakın bulunmuştur ancak lamella ve üç doğrultulu ızgara (grid) sistemin mesnetlere yakın elemanlarında, özellikle asimetrik yükler altındaki hesaplanan kuvvetlerde kayda değer bir fark olduğu gözlenmiştir.

Görün (1983), kabukların tanımı ve geometrileri hakkında teorik bilgiler verilerek, kabuk yüzeyindeki membran kuvvet dağılımları ve kuvvetlerin zemine aktarılması incelenip tasarım örneğiyle eğrilik değişmesinin kuvvet dağılımını nasıl etkilediği incelenmiştir.

Soare ve Raduica (1985), 4 farklı kubbe tipini; nervürlü kubbe, basit çaprazlı schwedler tipi kubbe, şaşırtmalı çaprazlı schwedler tipi kubbe ve çift çaprazlı schwedler tipi kubbe incelenmiştir. Bu doğrultuda; yarım kar yükünün kubbede en elverişsiz yük olduğu, schwedler kubbelerin nervürlü olanlara daha avantajlı olduğu (farklı çaprazlı schwedler kubbelerin arasında önemli bir fark olmadığını), kubbedeki çaprazlamanın dönen biçimde tasarlanmasının statik olarak en iyi davranışı gösterdiği görülmüştür.

Aşkar (1985), çelik uzay taşıyıcı sistemleri, kabuk kavramından başlayarak incelenmiş, küresel ve silindirik kabuk sistemler üzerinde durmuştur. Kafes örgülü kabuklar ve bunların hesap metotları ve analizleri anlatılmıştır.

Tzourmakliotou (1993), uzay kafes yapıların biçimlendirme tekniğinde kullanılan Formex algoritması üzerine kurulu Formian programını kullanıma sunularak daha kullanışlı hale getirilmiştir.

Stephan et al. (2004), serbest yüzeyli tek katmanlı uzay kafes sitemlerde birleşimlerin karşılaştırması yapılmıştır. Kuvvet aktarımı açısından bakıldığında, ara levhalı bulonlu birleşimlerin (splice connector), ek levhalı birleşimlere (end-face connector) göre daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir. Özellikle geniş açıklıklı ızgara formlarda yüksek moment aktarma ihtiyacını kaynaklı MERO-4 ve OCTA-1 tipi birleşim sistemlerinin karşıladığı ortaya konulmuştur. Ara levhalı bulonlu birleşimlerin (splice connector) dayanımı çubuk elemanlarından yüksek, ancak şekil değiştirme kapasitesi zayıf olduğundan; önce çubuk uçlarında oluşan yenilme ile meydana gelen plastik mafsallı takiben bulonların kopma ve kesme kapasitelerine ulaşması sonucu göçme mekanizması olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, yük aktarımında oldukça önemli olan dairesel ara levhaların, çubuk elemanlardan 1.5-2 kat daha fazla dayanıma ve benzer deplasman özelliğine sahip olması gerektiği ifade edilmiştir.

Saraç (2005), tek katmanlı uzay kafes kubbelerin genetik algoritma yöntemiyle optimum tasarımı yapılmıştır. Kar ve rüzgâr yükleri ASCE 7-98 yönetmeliğine göre hesaplanmıştır. Bu doğrultuda kubbeler için optimum yükseklik-açıklık oranı 0.20 ile 0.25 arasında olduğunu, bu aralığın üstünde ve altında oranlara sahip olan kubbelerin optimum olmayan çözümlere yol açtığı tespit edilmiştir. Tek katmanlı uzay kafes kubbelerin tasarımında önemli bir etkiye sahip diğer kriterin ise geometrinin tamamen üçgenlere ayrılması olduğu, bu tip yapıların her doğrultuda yüksek bir rijitliğe sahip ve denge durumunda kararlı olması gerektiğinden özellikle rijit birleşim kullanılmadığında üçgenlere ayrılmasının zaruri olduğu ortaya konulmuştur. Aksi takdirde mafsallı birleşimli kubbenin stabilite sorunu ile karşılaşacağı ifade edilmiştir. Ayrıca çalışmada simetrik kar yükü dağılımı ile beraber simetrik olmayan kar yükü dağılımının da hesaplarda göz önünde bulundurulması gerektiği, bazı elemanların tasarımında zati yük, kar ve rüzgâr yükü kombinasyonunun kritik olabileceği belirtilmiştir.

Hwang et al. (2009), ızgara (grid) kabuklarda farklı bulon boşluklu birleşimlerin global burkulma üzerindeki etkisi, dört farklı birleşim tipi sonlu eleman olarak modellenerek araştırılmış ve burkulmanın esasında birleşim noktasının rijitliği ve yükseklik-açıklık oranına bağlı olduğu gözlenmiştir.

Çifçi (2009), uzay sistemler üzerindeki geometrik doğrusalsızlık etkisini incelemek için, 72 m çaplı lamella tipi bir çelik kubbe yapı seçilerek doğrusal olmayan burkulma analizi yapılmıştır. Yükler TS 498 standartına, çelik yapı elemanları da TS 648 standartlarına uygun dizayn edilmiştir.

Gürses (2012), rüzgâr yükleri Eurocode 1-4 ve ASCE 7-05 standartları doğrultusunda farklı tip yapılarda hesaplanmıştır. Bu doğrultuda genel olarak Eurocode 1'e göre yapılan hesaplamalarda elde edilen rüzgar basınç değerlerinin ASCE 7-05'e göre daha büyük sonuç verdiği, ASCE 7-05'in Eurocode 1'e göre kullanıcıya daha net bilgiler

verdiği, tonoz çatılı bir yapı için dış basınç katsayılarının birbirine çok yakın olmasına rağmen Eurocode 1’de net basınç değerleri ASCE 7-05’den daha büyük olduğu, her iki standart için de iç basıncın negatif olduğu durumda elde edilen net basınç değerleri iç basıncın pozitif olduğu durumdan daha düşük olduğu görülmüştür.

Hosseini et al. (2012), optimum kubbe geometrisini elde etmek amacıyla zati yük ve deprem yükü altında nervürlü, schwedler tipi ve diamatik kubbelerin performansı incelenmiştir. Geometri seçiminde açıklık sabit 40m tutularak, farklı yükseklikler araştırılmıştır. Yapılan çalışma sonunda nervürlü kubbelerin, schwedler tipi ve diamatik kubbelerden daha iyi sismik davranışa sahip olduğu gözlenmiştir.

Fiouz et al. (2012), Formian programı kullanılarak, sabit açıklıkta nervürlü ve schwedler tipi tek katmanlı uzay kafes kubbe geometrisi modellenmiş, ANSI ve ECCS standartlarına göre rüzgar yükü kubbe yüzeylerine uygulanarak yapıda meydana getirdiği etkiler karşılaştırılmış ve rüzgar basıncının oluşturduğu deformasyon kubbe yüksekliğiyle doğru orantılı olduğu, özellikle tepe etrafında emme kuvvetinin kubbeyi kaldırmaya çalıştığı, sabit açıklıkta yükseklik-açıklık oranının artması mesnetlerde oluşan kesme kuvvetini azalttığı ortaya konulmuştur.

Chacko et al. (2014), farklı yükseklik-açıklık oranında nervürlü kubbelerin sonlu eleman analizi yapılmış; nervürlü kubbelerin dikey yüklere karşı gösterdiği mukavemeti yatay yüklere karşı gösteremediği gözlenmiştir. Nervür elemanların arasına çapraz stabilite elemanları atılarak daha avantajlı hale geleceği ve daha gerçekçi rüzgâr yükünün tatbik edilmesi kubbe davranışında daha doğru sonuç vereceği ifade edilmiştir.

Eldhose et al. (2015), yükseklik-açıklık oranı farklı, rijit birleşimli schwedler tipi kubbelerin analizi ve burkulma hesapları yapılmış; bu tip kubbenin yanal yüklere karşı diyagonal elemanları sayesinde iyi performans gösterdiği ve diğer ana elemanların kesitlerinde küçülme sağladığı gözlenmiştir. Bu çalışmada Hindistan yönetmeliği şartları uygulanmıştır. Ayrıca çalışmanın son bölümünde; elemanlardaki eksenel kuvvetlerde avantaj sağlamak için yükseklik-açıklık oranının 0.25’in altında seçilmesi, deplasmanda avantaj için oranın 0.25 ila 0.40 arasında seçilmesi, elemanlardaki burkulma yükünde avantaj sağlamak için oranın 0.35’in üzerinde seçilmesi, tüm sonuçlar açısından bakıldığında ise en uygun oranın 0.25 ila 0.35 arası seçilmesi tavsiye edilmiştir.

Ulusal ve ulusal arası literatür incelendiğinde tek katmanlı uzay kafes sistemlerin stabilite tasarımlarının yapıldığı çalışmalar mevcuttur. Ulusal çalışmalardan yabancı dildeki çalışmalarda doğrusal olmayan analiz yöntemiyle farklı formasyonlardaki uzay kafes kubbelerin stabilite tahkiki yapılmıştır. Ancak Türkçe çalışmalardan tek katmanlı uzay kafes kubbelerin tasarımının yapıldığı çalışmalar arasında güncel yönetmeliklerde tarif edilen asimetric yükler ve yük kombinasyonları altında eleman boyutlandırmasının yanı sıra sistemin stabilitesi için güvenlik faktörü olarak doğrusallaştırılmış burkulma analizi sonucu tespit edilen global burkulma katsayısı değeri,  $\lambda$  esas alınarak incelenen bir çalışmaya rastlanmamıştır.

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Tek Katmanlı Uzak Kafes Kubbeler

##### 3.1.1. Uzak kafes sistem tanımı

Yapı mühendisliği alanındaki literatürde “uzak kafes” teriminin anlamını araştıran birisi için oldukça farklı hatta kafa karıştırıcı görünebilir. Geniş anlamda, uzak kafes tam anlamıyla bir üç boyutlu yapıdır. Ancak daha özel bir anlamda uzak kafes sistem; birden fazla düzlemde çubuk ve düğüm noktalarından oluşan, yükleri üç boyutta bir bütün halinde dengeleyen özel bir davranış türü anlamına gelir.

Uzak kafes sistem, genellikle kesişen elemanların tek, çift veya çok katmanlı dizi halinde düzenlenmiş halidir. Eğri yüzeyli forma sahip tek katmanlı uzak kafes sistem çaprazlı (braced) tonoz, çaprazlı (braced) kubbe veya ızgara (grid) kabuk olarak adlandırılır.

Uzak kafes sistemler eğri veya düz yüzeyli formda olabilir. Uzak kafes yapıların erken dönem formları tek katmanlı örgü halindedir. Kirişli çerçeve sistemine, ara çaprazlar ve rijit birleşimler eklenerek tek katmanlı ızgara (grid) sistem oluşturulmuştur. ızgara (grid) sistemlerin en büyük özelliği, sıradan çerçeve sistemdeki gibi yükün doğrusal aktarımının aksine yükün çok yönlü yayılmasıdır. Bu tarz yük aktarımında eğilme etkin olduğu için daha büyük açıklıklarda ise eğilme rijitliğini artırmak amacıyla daha etkili olan çift katmanlı sistem uygulanır. Eğimli yüzeyli uzak kafes sistemlerin yük aktarım mekanizması temelde ızgara sistemlerden farklı olarak membran davranışına yakın bir davranış sergiler.

##### 3.1.2. ızgara (grid) sistemler

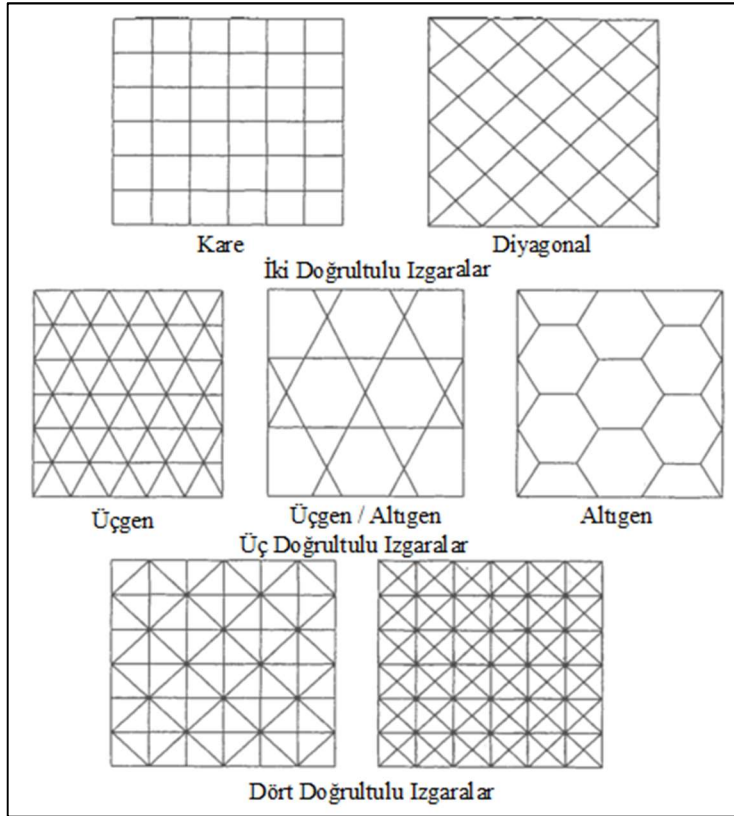
Son yıllarda mimar ve mühendislerin uzak kafes sistemlerin sağladığı form ve biçimlere olan ilgisi giderek artmaktadır. Modern uzak kafes yapıların görsel estetiği ve çizgilerin etkileyici sadeliği takdir edilmekte; mimari ifadenin bir parçası olarak ızgara elemanların açıkta bırakılmasına doğru belirgin bir yönelme söz konusudur.

Uygulamada karşılaşılan çerçeve sistemlerin çoğu birbirine bağlı elemanların oluşturduğu bir ağ içerir. Bu bağlantı sayesinde, yapının belli bir kısmına tesir eden tekil yüklere, yük uygulanan noktadan oldukça uzakta olan elemanlar dahi mukavemet gösterir. Bu tarz bir örtünün zati ağırlığı diğer türlere göre daha azdır. Örneğin, 40 m çapındaki beton kubbe yüzeyinin metrekaresine düşen zati ağırlık, çelik çerçeveli kubbeninkinin neredeyse 15 katıdır. Böylece kolon ve temellerde de önemli miktarda tasarruf sağlanır. Uzak kafes çerçevenin elemanları fabrikada seri üretilir ve sahada yarı kalifiye işgücü ile montajı yapılır. Çift veya çok katmanlı ızgaralar, kubbe, silindirik tonozlar, çelik çerçeveli katlanmış plak ve hiperbolik yapılar çerçeve sistemlerin en tipik örnekleridir. Çerçeve sistemler arasında ızgara biçimi önemli bir kategoriye sahiptir. Dünya çapında inşa edilen çoğu uzak kafes yapıları, bu kategorideki çerçeve sistemlere ait olarak nitelendirilir.

Tek katmanlı ızgara (grid) sistem aslında iki boyutlu bir yapıdır. Bu sistemlerin ilk biçimleri kirişli çerçeve sistemin bir uzantısı olmuştur. Uçları kolonlar tarafından



desteklenmeyen, rijit birleşimler ile kirişlere ara bağlantılar eklenerek oluşturulan sistem tek katmanlı ızgara biçimini almıştır. Böylece ızgara sistem, normal kuvvetlerden meydana gelen yüklemesistemini karşılayan, iki veya daha fazla kirişin bir diğeri ile herhangi bir açıda kesişmesi ile oluşan bir sistem olarak tariflenebilir (Şekil 3.1). Bu yüklemesistem bütünü elemanlarda eğilme ve burulma üretir. Izgara yapının karakteristik özelliklerinden biri de sıradan bir çerçevesisteminde yük doğrusal aktarılmasına karşılık ızgara sistemde yük çok yönlü dağılımıdır. Çatı ve zemin sistemleri, köprü ve gemi tabliyeleri, yüksek karayolları ve sürekli temeller ızgara sistemin sıklıkla kullanıldığı örnek yapılarıdır.



**Şekil 3.1.** Izgara (grid) sistemler

Izgara sistemlerin yük aktarma davranışı kabuk davranışından farklıdır; çünkü kendi düzlemi içindeki yükleri doğrudan aktaran membran davranışından ziyade yükler eğilme ile bir diğereleman aktarılır. Bu nedenle ızgara sistemlerde esas olan eğilme rijitliğidir. Diğeri rijitlik, burulma ve kesme rijitliği bazı durumlarda davranışını etkiler. Dolayısıyla geniş açıklıklı ızgara sistemlerde, çift katmanlı sistem seçilmesi eğilme rijitliğini artıracığından daha olumlu sonuç verecektir.

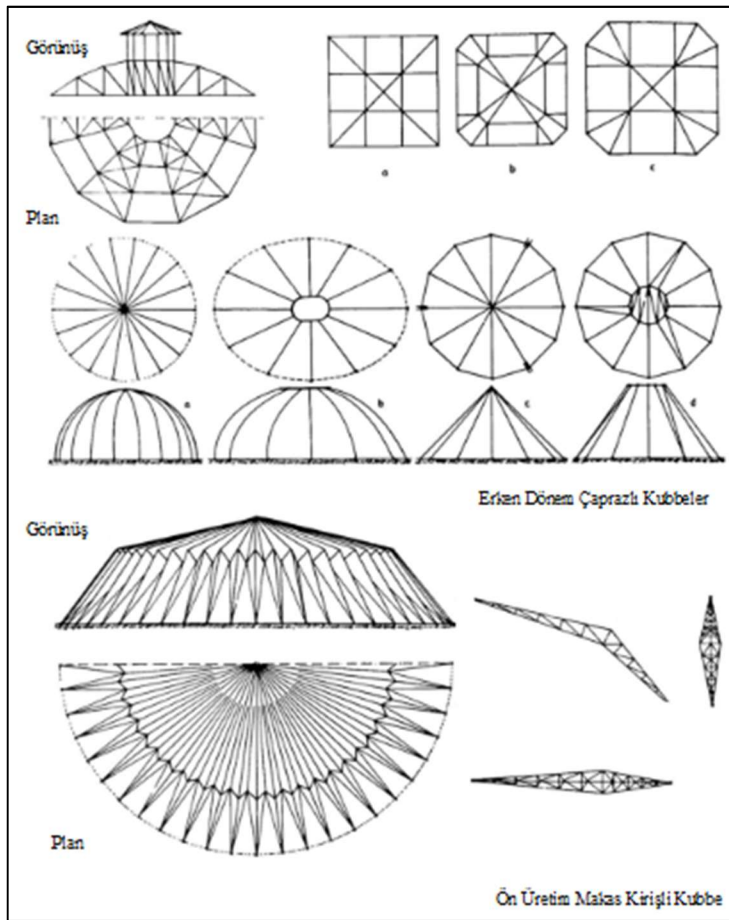
### 3.1.3. Çaprazlı (braced) kubbeler

#### 3.1.3.1. Gelişimi ve tarihçesi

Büyük açıklıklar demir kubbe ile örtülen büyük açıklıklar, mühendislerin ve kamuoyunun hayal gücüne canlılık getirdi. Bu yapıım şekline olan büyük ilgi 19. yy. da çeşitli kafes şekillerinin gelişimi ile sonuçlanmıştır. Almanya, Fransa ve İsviçre’ de bu

hareket, kubbe yapıların babası olarak bilinen, Schwedler'in çalışmalarından oldukça etkilendi. Henneberg, Mohr, Ritter, Müller-Breslau, Scharowsky ve Zimmerman, her biri çaprazlı kubbelerin gelişiminde ve yapısal davranışlarının anlaşılmasında büyük katkıları olmuştur.

19. yüzyılın erken demir kubbeleri, genellikle yükselen kısmı diklemesine putrel ve üst tarafı eğimli pek çok ızgara kafes kiriş içerir. Bunlar dairesel duvara mesnetlendirilmiş ve tepedeki basınç halkasına kafes kirişler ile bağlanmıştır. (Şekil 3.2). Daha küçük kubbelerde, basınç halkası ve ışıklık ihmal edilerek, kafes kirişler birbirine doğrudan bağlanmıştır. Bu tarz düzenleme ile örtülen alanların çoğu kare veya sekizgen idi. Daha büyük açıklıklar için ise makasların yükselen kısımlarına eğrilik verilerek makas kirişlerden oluşan ızgara kubbeler ortaya çıktı. Yarıküre şeklindeki erken dönem kubbeleri mesnetlerde yalnızca düşey reaksiyon oluşturuyordu.



**Şekil 3.2.** Erken dönem çaprazlı (braced) kubbeler

Basık kubbelerin yükseklik-açıklık oranını düşürmek için yapılan girişimler sonucunda birleşimlerin yatay kuşaklarla desteklenmesi kayda değer değişiklikler ortaya çıkardı. Ancak, bazı durumlarda mesnetlerdeki bağlantı kirişlerinin kapasitesi aşıldı. Bu durum pek çok mühendisi nervürlü kubbeler için daha detaylı çalışmaya yöneltti ve bunun sonucunda, yeni ve gelişmiş türde çerçeve sistemlerin ortaya çıkmasına yol açtı.

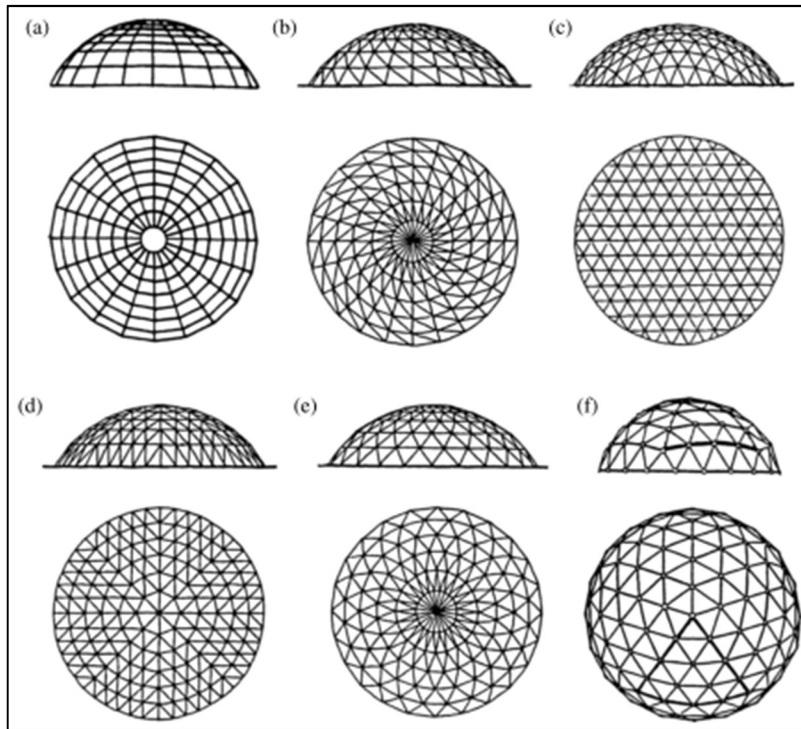
### 3.1.3.2. Çeşitleri

Çaprazlı (braced) kubbelere olan ilginin canlanması ve bunların geliştirilmesi, İkinci Dünya Savaşından sonra Amerikalı ünlü tasarımcı Buckminster Fuller faaliyetlerinden oldukça etkilenmiştir. Onun jeodezik kubbesi, mimarların ilgisini tekrar inşaatın bu oldukça verimli formuna çekti. Sonraki yapısal gelişmelerde Lederer, Kiewitt, Soare, Wright, du Chateau, Kadar, Tsuboi, Matsushita ve diğer seçkin tasarımcılar; çaprazlı (braced) kubbe çeşitlerinin gelişimden, dünyanın birçok yerinde bu tarz yapıların inşa edilmesinde ve davranışlarının anlaşılmasında büyük payı vardır. Çaprazlı kubbeleri yük taşıma özellikleri açısından dört ana grupta toplamak uygundur:

- a. Çerçeve ya da iskelet tipi tek katmanlı kubbeler,
- b. Kafes kirişli tipi ve çift katmanlı kubbeler (geniş açıklıklar için ideal),
- c. Asma-germe sistemler (yapıyı kaplayan örtünün taşıyıcı elemanlara bağlı olduğu ve yükün taşınmasında görev aldığı taşıyıcı sistem),
- a. Yüzey taşıyıcılı sistemler (ince çelik, alüminyum veya sacın uygun şeklin verilmesi ile kenarları boyunca birbirine bağlanan, kubbenin ana iskeletine dahil edilmesiyle oluşan taşıyıcı sistem).

Çoğu kubbe birinci tip, çerçeve tipi tek katmanlı kubbe örneklerindedir. Bunlar daha küçük açıklıklarda kullanılmasına rağmen tek katmanlı kubbelerin temiz açıklığının 100 m'ye ulaştığı az miktarda örnekler de mevcuttur. Çift katmanlı kubbelerin eğilme rijitliği yüksek olduğundan, geniş açıklıklarda daha çok kullanılmaktadır.

Makowski (1985) pratikte en çok uygulanan çerçeve tipi kubbe çeşitlerini 5 grupta toplamıştır:



Şekil 3.3. Çaprazlı (braced) kubbe türleri

### Nervürlü kubbe

Çelik nervürlü kubbeler, prefabrikasyon imkanından dolayı hala popüler olan en eski formlardan biridir. Genellikle temelde bir gerilme halkası ile rijitleştirilmiş, tepede basınç halkasında birleşen radyal makaslar veya rijit kirişler içeren sistemdir (Şekil 3.3.a).

Nervürlü kubbenin en güzel örneklerinden biri İngiltere Pert'deki Bell's Sports Centre'nin üstünü örten, zeminde çapı 67 m, her biri 35 m uzunluğunda lamine edilmiş ahşaptan imal edilen 36 adet yay kirişten oluşan taşıyıcı sistemdir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Bell's Sport Centre, İngiltere

Nervürlü kubbelere diğer bir örnek Fransa'daki Piscine Tournesol, 44 m çapındaki alanı örten, boru profilden imal edilen kafes kirişli nervürlere sahip bu yapının zati ağırlığı sadece 25 kg/m<sup>2</sup> dir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Piscine Tournesol, Fransa

Bir diğerk örnek Swindon Leisure Centre'nin üstünü örten yapı, yaklaşık orta yüksekliğine kadar tam üçgen ağ formu gösteren; 7 adet yatay halka 4 sıra çapraz elemanlar ile rijitleştirilmiş 48 adet nervür içerir. Yükseklik-açıklık oranı 1/5 ve 45 m çapa sahiptir. Kaplama olarak buzlu pvc cam kullanılmıştır (Şekil 3.6).



**Şekil 3.6.** Swindon Leisure Centre, İngiltere

### Schwedler tipi kubbe

Schwedler kubbe asimetrik yükleri karşılayabilmek adına yapıyı çapraz yönde güçlendirme fikrinden doğmuştur. Meridyen doğrultuda nervürler ile paralel doğrultudaki halkaların oluşturduğu her bir trapez forumunun, çapraz elemanlarla üçgenlere ayrılması sonucu oluşmuştur (Şekil 3.3.b). Bazı durumlarda trapez form iki adet çapraz elemanla da bölünmüştür. Bu tip kubbe Alman mühendis J.W. Schwedler tarafında 1863 yılında hayat bulmuştur. Schwedler kubbenin büyüyen popülaritesi altında yatan nedenlerden biri de birleşimlerin mafsallı varsayımı ile statikçe kararlı olarak analiz edilmesini sağlamasıdır. Uygulamada, aksenal kuvvetlere ek olarak bütün elemanlar eğilme ve burulma momenti etkisi altındadır.

Charlotte Coliseum'un üzerini örten en geniş açıklıklı Schwedler tipi kubbe 1955 yılında inşa edilmiştir (Şekil 3.7). Kubbenin yüksekliği 18 m ve açıklığı 100 m dir. Çekme halkasının 48 adet betonarme kolona mesnetlendiği 48 adet radyal nervüre ve 9 adet yatay halkaya sahiptir. Tabandaki çekme halkası 50 mm kalınlığında ve 800 mm genişliğinde, tepedeki basınç halkasının çapı ise 14 m'dir. Kubbe yüzeyinin tamamı ızgaralı alüminyum kaplama ile örtülmüştür.



**Şekil 3.7.** Charlotte Coliseum, North Carolina, ABD

### Üç doğrultuda çaprazlı kubbe

Üç doğrultuda çaprazlı kubbeler (Şekil 3.3.c) ilk olarak Prof. Lederer'in boru en kesitinden tasarladığı, Çekya'da inşa edilen yapı oldukça ilgi gördü. Tasarladığı yapı, hafif bükülmüş boru profillerin birleşiminden oluşan ızgara elemanların bir sonucuydu. Üç doğrultuda gruplanmış boru profillerin baklava dilimi şeklinde kesişiminden oluşmuştur. Bu tipteki en seçkin yapılardan biri olan kubbenin, temiz açıklığı 93.5 m dir. Şekil 3.8'de görüldüğü üzere montajı sahada özen gerektiren ancak oldukça basit şekilde inşa edilebilmektedir.



Şekil 3.8. Pavillon Z Sergi Alanı, Brno, Çekya

### Lamella tipi kubbe

Lamella sistemi, Alman mimar Zollinger tarafından 1906 yılında icat edilmiştir. Lamella biçimi, baklava dilimi veya eşkenar dörtgen şeklinde düzenlenmiş çok sayıda benzer birimden oluşur (Şekil 3.9). Her bir dilimi, kenarının iki katı uzunluğa sahiptir. Kaplama örtüsü veya aşıklar dilimini üçgenlere ayrılarak sağlayarak kubbe yüzeyinin stabilite ihtiyacını karşılar. Bir lamella kubbe diyagonal şekle sahiptir ve bir veya birden fazla halka içerebilir (Şekil 3.3.d, e). Lamella kubbelerin büyük popülaritesi, kabuk yüzeyinde asimetrik rüzgâr yüklerine olduğu kadar yangın ve depreme karşı da son derece iyi davranış göstermesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.9. Lamella biçimi

Dünyadaki en büyük çelik kubbelerden Houston'daki Harris County Spor Salonu'nun 3 hektarlık alanını örten; temiz açıklığı 200 m, merkez yüksekliği 63 m olan Astrodome paralel lamella tipinin en iyi örneğidir (Şekil 3.10). Yüzeyi 12 bölgeyi ayrılmış ve her bölge meridyen ve paralel doğrultuda 6 adet düğüm noktası

oluşturulmuştur. Kubbenin mesnetlendiği çekme halkası 72 adet kolon tarafından desteklenmektedir. Çelik elemanların zati ağırlığının kapladığı alana oranı  $70 \text{ kg/m}^2$  dir. Astrodome'nin küçük ölçekli modeli rüzgâr etkilerinin oluşturabileceği 48 farklı durumda incelenmiş; 270 km/sa hıza ulaşabilen kasırgaların ani etkilerine ve 220 km/sa hızla esen rüzgâr yüküne mukavemet gösterecek şekilde tasarlanmıştır.



**Şekil 3.10.** Houston Astrodome, Teksas, ABD

Lamella tipi kubbenin en güzel örneklerinden New Orleans'daki stadyum üzerini örten 207.3 m çaplı Superdome dünyadaki en büyük kubbedir (Şekil 3.11). Merkez yüksekliği 83 m olan ve 3.2 hektarlık alanı örten yapı 1975 yılında inşa edilmiştir. Kubbe bulunduğu bölge itibariyle rüzgâr etkilerine karşı özel ilgi gösterilmiş; 240 km/sa hızla esen rüzgâr yüküne ve 320 km/sa hıza ulaşabilen kasırgalara mukavemet gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Ancak kubbe örtüsü 2005 yılında meydana gelen Katrina Kasırgası'nda (rüzgâr hızı 280 km/sa) ciddi hasar almıştır.



**Şekil 3.11.** Louisiana Superdome, New Orleans, ABD

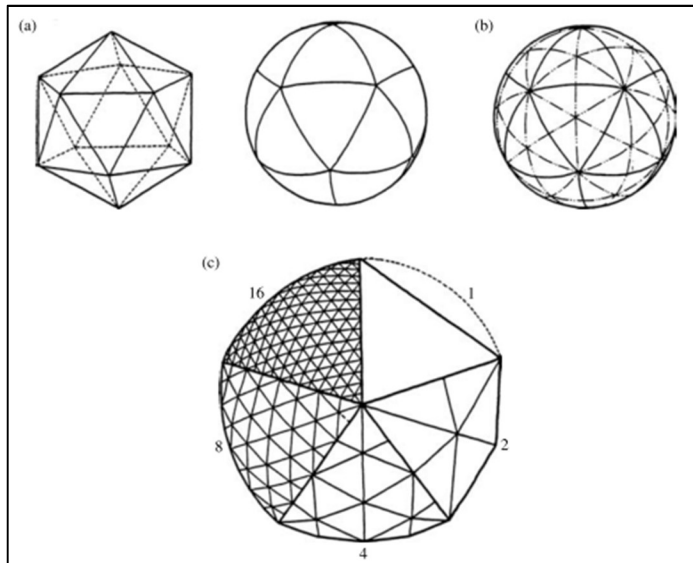
### Jeodezik kubbe

Yapının iskeletini oluşturan elemanların kürenin dairesinin formunda yer aldığı çaprazlı kubbelerin avantajına mimarların dikkatini çeken jeodezik kubbe Amerikalı tasarımcı Buckminster Fuller tarafından geliştirildi. Jeodezik adı buradan gelmektedir (Şekil 3.3.f). Bu keşişen elemanların oluşturduğu yapı aslında eşkenar küresel üçgenler içeren üç doğrultulu bir ızgara oluşturur (Şekil 3.12).



**Şekil 3.12.** Desert Dome - Henry Doorly Zoo Omaha, Nebraska, ABD

Fuller başlangıçtaki jeodezik kubbesinde, küreyi bölmek için çok yüzlü çokgen kullandı; daha sonra küresel yüzeyi Şekil 3.13.a'da gösterildiği gibi 20 adet eşkenar üçgene böldü. Bu, bir kürenin eşkenar üçgenle bölünebileceği maksimum sayıdır. Daha geniş açıklıklı kubbeler için bu üçgenlerin her biri, kenarortay ve açıortay yardımıyla üçgenlerin kenarları ikiye ayrılarak, altı üçgen halinde bölünebilir. Bunun sonucunda, küre yüzeyinde düzenli olarak dağılmış 15 büyük daire oluşturmak mümkündür (Şekil 3.13.b). Uygulamalar, jeodezik kubbede ilk çaprazlama sonunda eleman uzunlukları fazla olacağından ikinci bir çaprazlama ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Çaprazlamada düzenli bir ağ elde etmek için, üçgenlerin kenarları bölünmektedir. Küresel çok yüzlü yapının her bir kenarının bölünmüş olduğu parça sayısı esasında kubbenin büyüklüğüne, açıklığına ve kaplama tipine bağlıdır. Bu bölme işlemi Şekil 3.13.c'de gösterildiği gibi frekans olarak adlandırılır. Böyle bir bölmede ortaya çıkan üçgenlerin artık eşdeğer olamayacağı belirtilmelidir. Kubbenin iskeletini oluşturan elemanlar, uzunluklarında bir miktar farklılıklar gösterir. Bölme frekansı arttıkça eleman uzunluğu azalır, parça ve birleşim sayısı artar. Sonuç olarak jeodezik kubbenin maliyetinin artmasına neden olur ve bu tip kubbelerin, daha dar açıklıklar için kuşkusuz avantajlarına rağmen, daha geniş açıklıklı çaprazlı kubbeler ile eşit şartlarda doğru bir karşılaştırma yapılamamasına neden olur.

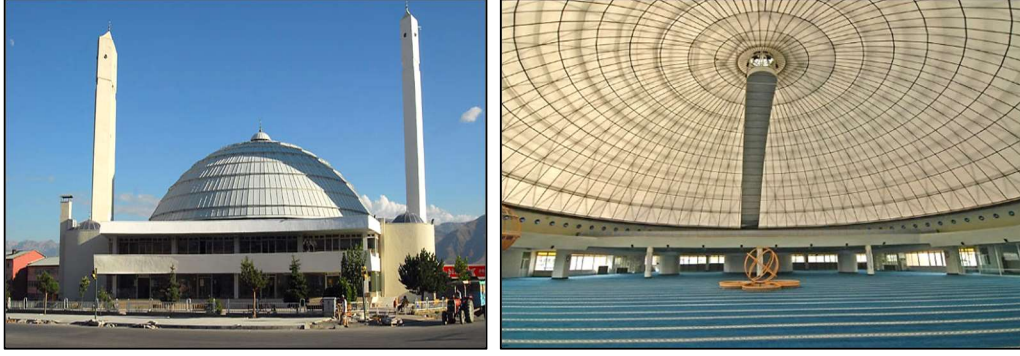


**Şekil 3.13.** Jeodezik kubbenin biçimlendirilmesi

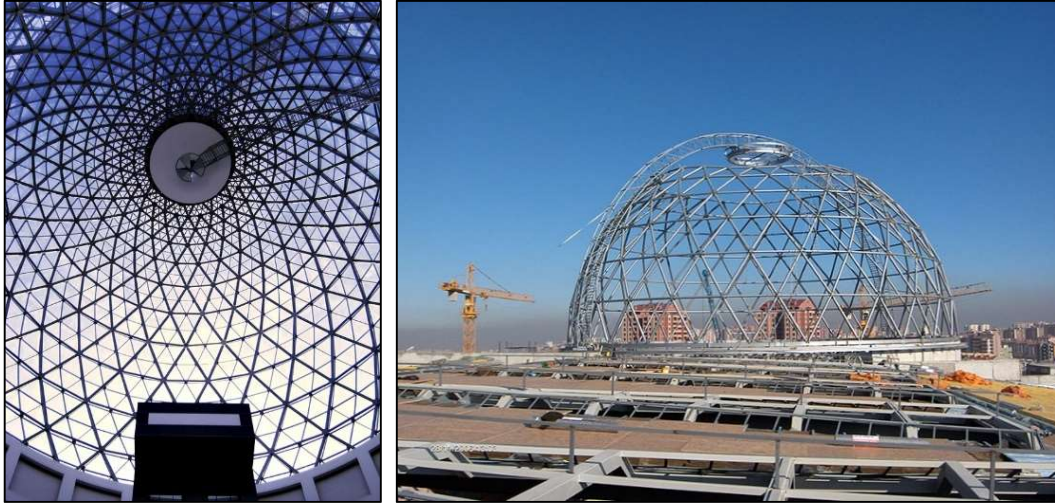


### 3.1.4. Türkiye’den uzay kafes kubbe örnekleri

Türkiye’de uzay kafes kubbeler dünyada olduğu kadar yaygın değildir. Çoğunlukla ızgara sistemli çelik yapılar daha çok tercih edilmektedir. Türkiye’de bulunan uzay kafes kubbe örnekleri Şekil 3.14’den Şekil 3.19’e kadar sunulmuştur. Bunlar genellikle açıklıkları 40-50 metreyi geçmeyen, dünyadaki örneklerine göre daha küçük boyutlu yapılardır.



Şekil 3.14. 50 m çaplı çift katmanlı uzay kafes kubbe, Terzi Baba Camii, Erzurum



Şekil 3.15. 72 m çaplı lamella kubbe, Panora Avm, Ankara



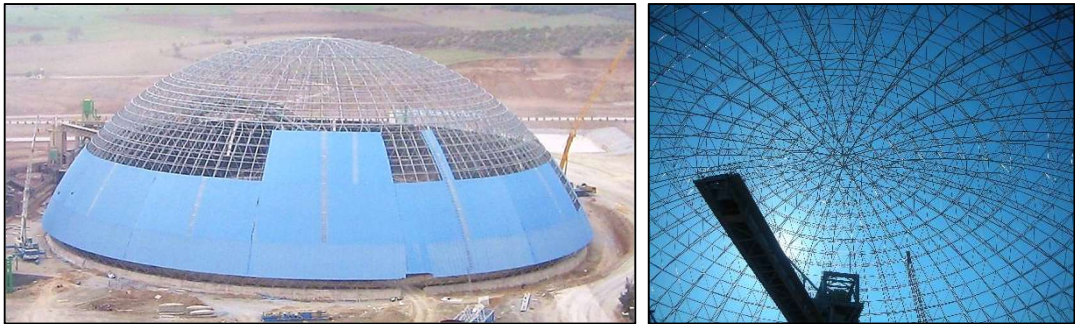
Şekil 3.16. 21 m çaplı jeodezik kubbe, Konya Bilim Merkezi Planetaryum Binası



Şekil 3.17. 40 m çaplı kubbe, Su Kuşları Kafesi, Bursa Hayvanat Bahçesi



Şekil 3.18. 30 m çaplı jeodezik kubbe, Kışladığı Altın Madeni, Uşak

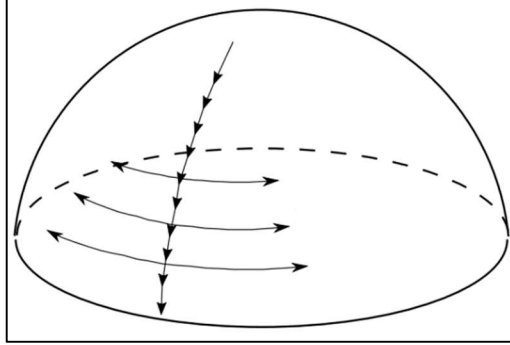


Şekil 3.19. 124 m çaplı çift katmanlı uzay kafes kubbe, Akçansa Çimento Stokholü, Çanakkale

### 3.2. Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbelerin Analizi

#### 3.2.1. Kubbe Davranışı

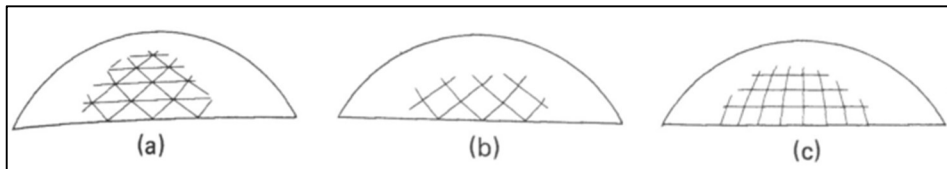
Mühendis bir yapıyı tasarlamadan önce, yapının nasıl davranacağına dair öngörüye sahip olmalıdır. Kubbe yapılar, kabuk yüzeyinde kendiliğinden oluşan bir kuvvet dağılımı ile üzerine gelen yüklere mukavemet gösterir. Tipik olarak kubbe yüzeyine meridyen doğrultuda etkiyen basınç kuvvetlerine ve yüzey çevresinde daha az etkili yatay kuvvet (genellikle çekme) eşlik eder (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Kubbede yük dağılımı

Çaprazlı (braced) kubbelerin çalışma şekli büyük ölçüde elemanlarının düzenleniş biçimine bağlıdır. Üçgenlere tam ayrılmış (Şekil 3.21.a) kubbeler, her yönde daha yüksek rijitlik gösterirler. Ayrıca bu düzenleme uzay kafes olarak idealize edildiğinde kararlı (stable) özellik gösterir. Buna göre üçgenlere tam ayrılmış kubbeye etkiyen kuvvetler esasında aksenal çalışıp büyüklük ve doğrultu açısından kubbedeki iç kuvvetlere benzerlik göstermektedir.

Üçgenlere tam ayrılmamış kubbeler, kafes olarak idealize edildiğinde kubbe yüzeyindekilerden oldukça farklı doğrultularda farklı rijitlik göstermekte ve labil (instable) hale gelmektedir. Şekil 3.21.b'de gösterilen kubbede taşıyıcı elemanlar ve birleşimler sadece eğilme momentine mukavemet göstermektedir. Şekil 3.21.c'de gösterilen kubbenin asimetrik yüklere mukavemet göstermesi ve kubbeyi stabil hale getirmek için sürekli birleşimler veya yapıyla beraber çalışan kaplama ihtiyacı duyulmaktadır.



Şekil 3.21. Çaprazlama şekilleri

### 3.2.2. Analiz

Yapı analizi, tasarım sürecinin bütünleyici bir parçasıdır. Yapıların analiz yöntemleri doğrusal ve doğrusal olmayan şekilde ikiye ayrılır. Basit doğrusal analiz kullanılarak gerilme sınır durumları tüm yapı elemanları ve birleşimler için kontrol edilebilir. Bunlar akma, eleman burkulması, kopma, yorulma ve birleşimlerin yırtılması kontrollerini içerir. Bununla birlikte birden fazla elemanın stabilite kaybının etkilerinin veya geometrik düzensizlikler veya yapı elemanlarında akma sınır durumunun aşılması sonrası yapının davranışında oluşabilecek değişiklikleri kapsayan etkileri de kontrol etmek için tasarımcı doğrusal olmayan etkileri göz önünde bulundurmalıdır. Doğrusal olmayan etkiler plastik mafsallı oluşumu gibi eleman kusurları ve geometrik düzensizlikler olarak ikiye ayrılır. Geometrik düzensizlikler çaprazlı (braced) kubbeler için kritik olabilir; özellikle basık veya dengesiz yüklere maruz kubbelerde tersine dönerek burkulma (snap-through) kontrolü elzemdir.

Çaprazlı kubbelerin çoğunu uzay kafes sistem olarak idealleştirmek yeterli olmaktadır. Yüzeyi taşıyıcı elemanlarla üçgenlere ayrılmamış kubbeler, eğri elemanları süreklilik arz eden kubbeler, tek katmanlı basık kubbeler gibi eğilme etkilerinin daha belirgin olduğu yapılarda kapsamlı bir çerçeve analizi ihtiyacı doğmaktadır.

Doğrusal yapı analizi, adında anlaşılacağı üzere elastik davranış gösteren yapıların analizi için uygulanır. Neredeyse hiçbir yapısal sistem gerçekte elastik davranış göstermez, ancak uygulamadaki sistemlerin çoğu tasarlandıkları yükleme aralıklarında doğrusala yakın davranış gösterirler. Doğrusal sistem analizinde, yapının deforme olmamış haliyle denge denklemleri kurulur ve çözülerek şekil değiştirmeler tespit edilir. Doğrusal olmayan analiz için çoğu uygulama bir dizi doğrusal analiz içerir, her iterasyonda sistemin çözümüne giderek yaklaşılır. İlk iterasyon genellikle geometrik düzensizlikler ve eksenel kuvvetlerin eğilme momentleri üzerindeki etkisi gibi doğrusal olmayan etkileri de hesaba katan, birbirini takip eden iterasyonlarla basit, doğrusal analizin aynısıdır. İlk iterasyondan sonra, denge denklemleri genellikle bir önceki iterasyon ile hesaplanan yapının şekil değiştirmiş haline göre kurulur. Buradan doğrusal analizin, doğrusal olmayan analizden daha basit olduğu ve doğrusal analiz bilgisinin doğrusal olmayan analizin anlaşılması için gerekli bir ön koşul olduğu görülebilir.

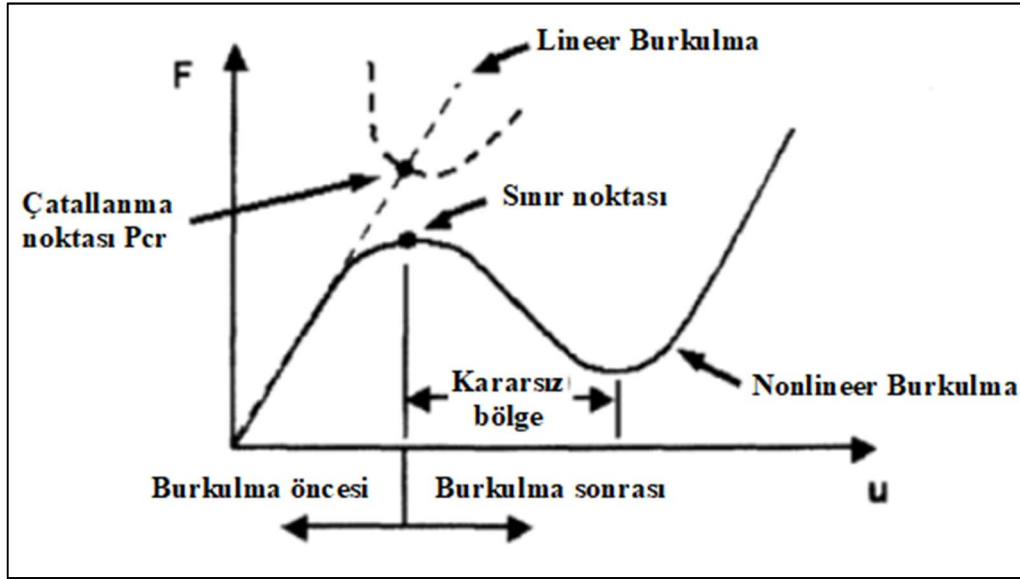
## 3.3. Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbelerin Stabilitesi

### 3.3.1. Giriş

Yapıların davranışını belirlemek üzere kullanılan analiz problemlerinin çoğunda doğrusal analiz güvenle kullanılabilir. Ancak, doğası gereği doğrusal olmayan şekil değiştirme davranışı sergileyen yapıların tasarımında, doğrusal analizin ihtiyatlı bir şekilde kullanılmasını gerektiren problem türleri vardır. Bazı kablo yapıları gibi doğrusal olmayan rijitlik kaybı davranışı gösteren yapıların şekil değiştirmeleri; doğrusal analizlerle değerinin üstünde tahmin edilirken, doğrusal olmayan rijitlik kaybı gösteren yapı sistemlerinin şekil değiştirmeleri doğrusal analizle değerinin altında tahmin edilecektir. İkinci durum potansiyel olarak daha tehlikelidir çünkü doğrusal analizle tespit edilen güvenli-yük değerleri gerçekte aşırı yer değiştirmelere ve stabilite kaybına yol açabilir. Bununla birlikte doğrusal olmayan tarzda davranan yapılar için genellikle doğrusal analiz davranışı gerçeğe yeterince yakın tahmin edeceği bir yük ve şekil

değiştirme aralığı vardır. Tasarımcının karşılaştığı sorun, yapının doğrusal olma potansiyeli olmadığı kararını verdiği bu aralığın tespitidir. Eğer bu aralığın çok dar olduğu tespit edilirse, doğrusal olmayan bir analiz gerekli olacaktır. Doğası gereği, doğrusal olmayan analiz daha külfetli olacaktır, bu nedenle ilkinin tercih etme kararı, tasarımcı için önemli bir karar olacaktır. Bu nedenle problem; doğrusal olmayan analizin gerekip gerekmediği, eğer gerekirse, hesap yöntemlerinin tasarım aşamasındaki yapı için uygulanabilir olup olmadığı gibi görünmektedir.

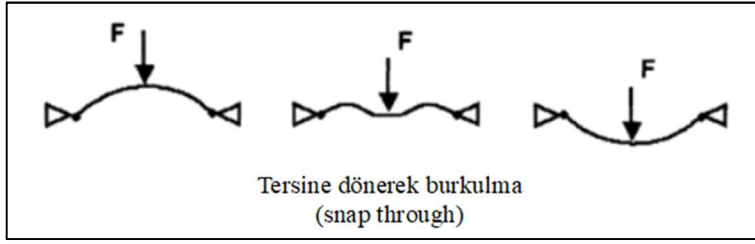
### 3.3.2. Stabilite kavramı



Şekil 3.22. Yük-şekil değiştirme eğrisinde simetrik ve asimetric burkulma davranışları

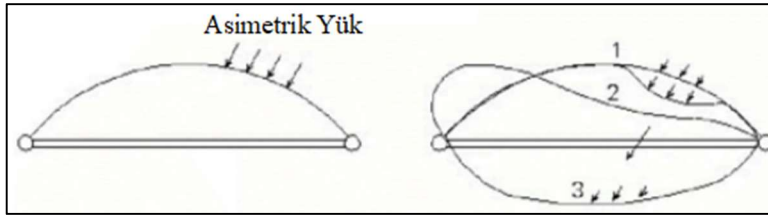
Doğrusal olmayan rijitlik kaybı davranışı gösteren elastik bir yapıda stabilite kaybı iki aşamada meydana gelir: İlki deformasyon başlangıcı ile ilişkilendirilen rijitlik kaybı; rijitliğini kademeli azalarak tamamen kaybettiği noktaya ulaşma aşamasıdır. Bu aşama yapının yük-şekil değiştirme eğrisinde (Şekil 3.22) sınır noktasına ulaştığı ve ani bir hareketle büyük miktarda deformasyona uğradığı anlamına gelir. Basık kubbe ve tonozlarda meydana gelen bu simetrik şekil değiştirme tipi tersine dönerek (snap-through) burkulma olarak adlandırılır (Şekil 3.23). Çelik kubbelerin tersine dönerek burkulması, aksenal yük ve momentin birleştiği noktada kubbe eğriliğinin tersine dönmesi sonucu oluşur. Sonuç olarak ters eğrilik basınç kuvvetinin kesit rijitliğini tamamen ortadan kaldırmaya yetecek kadar moment oluşturduğu anlamına gelebilir; bu noktada kubbe sarkar eğer mesnetler yük taşımaya devam ederse, germe yapısı olarak kalır ve yük taşımaya devam eder. Tersine dönerek burkulma göçme mekanizması ile sonuçlanır. Moment dağılımı yeniden gerçekleşmez. Dönme oluşmasına izin verilmemesi hayati derecede önemlidir. Dönmenin şiddeti; zati yüklerin doğrusal rijitliği kaybetmesi ya da denge durumdan ayrılması, yani yük-yer değiştirme eğrisinden ayrılmasına bağlıdır. Bu, kubbelerin ve tonozların açıklık-yükseklik oranına göre kontrol edilir ve ele alınır. Oldukça basık bir kubbe özellikleri itibarıyla tersine dönerek burkulma oluşmayacakmış gibi görünebilir; yük-şekil değiştirme eğrisi, doğrusal olmayabilir ancak yine de stabil kalabilir. Ancak pratikte böyle bir kubbe geometrisi yoktur. Yükseklik-açıklık oranı arttıkça, tepkinin doğrusal olmama özelliği artar ve denge eğrisi sınır noktası

ile sınırlandırılabilir. Yükseklik açıklık oranının artmasıyla stabilite kaybının önemi artmaktadır.



**Şekil 3.23.** Tersine dönerek (snap through) burkulma

İkinci durumda, kubbe gibi doğrusal olmayan rijitlik kaybı ile burkulan yapılarda, ilk durumdaki rijitlik kaybından oldukça farklı bir burkulma mod şekli ile aniden stabilite kaybı oluşabilir. Üniform yüklü kubbeler için bu; yük-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki simetrik modun sınır noktasına ulaşmadan önce aniden meydana gelen asimetric dönme ile oluşan burkulmadır. Üniform yükler altında geometrisi simetrik olan yapılar için bu olay, farklı bir kritik noktada veya doğrusal olmayan yük-şekil değiştirme eğrisinde çatallanma noktası (bifurcation) adı verilen noktada meydana gelir. Burkulmanın olduğu ve simetrik olmayan burkulma mod şeklini temsil eden ikinci eğri, yük-şekil değiştirme eğrisini bu noktada keser ve başlangıç eğrisinin kendisi kararsız hale gelir. Elastik stabilite teorisinde, burkulma sonrası oluşan simetrik olmayan burkulma mod şekli özelliğine asimetric burkulma denir. Asimetric burkulma yoluyla meydana gelen stabilite kaybı, daha önce tarif edildiği gibi tersine dönerek burkularak sistemin toptan geçmesiyle sonuçlanır (Şekil 3.24).



**Şekil 3.24.** Asimetric burkulma

Asimetric burkulma modu ile ilişkili kritik yük, elemanın kararsız hale gelene kadar taşıyabileceği azami yüküdür. Yapı geometrisindeki veya yük dağılımındaki simetriyi bozan kusurların varlığına karşı oldukça duyarlıdır. Bu durum simetrik burkulmayla stabilite kaybı gösteren yapıların bir özelliğidir ve bu tip kusurların kritik yük değerini düşürdüğü görülmektedir. Kar veya rüzgâr yükü gibi kubbe yüzeyine etkiyen dengesiz yükler altında düzgün yayılı yüklere göre daha düşük kritik yük değeri göstermektedir. Basık kubbelerin tersine dönerek burkulma öncesindeki sınır noktasının yük değeri bu kusurlardan daha az etkilenmektedir.

Şekil 3.22’de gösterildiği üzere yük-şekil değiştirme eğrisinden simetrik olmayan mod şekli eğrisine geçiş, yapıyı denge durumundan göçme duruma taşır. Yük şekil değiştirme eğrisinin; sınır noktasına ulaşmasından itibaren oluşan tersine dönerek burkulma (simetrik burkulma) veya çatallanma noktasına ulaşması sonucu meydana

gelen asimetrik burkulma olarak tanımlanan stabilite kaybı türleri, bazı durumlarda kubbenin herhangi bir bölgesinde bir veya birden fazla düğüm noktasının plastikleşmesiyle meydana gelerek yerel (local) burkulma sonucu oluşmaktadır. Dolayısıyla düğüm noktalarında yeterli rijitliğin sağlanmadığı ve elemanların eksenel kuvvetlere ek olarak eğilme ve kesmeye karşı mukavemet gösterecek şekilde tasarlanmadığı takdirde, tersine dönerek burkulmaya (snap-through) elverişli hale gelecektir.

Global burkulma, yerel burkulma (ileride tartışılacak olan tersine dönerek burkulmayı da kapsayan) ve eleman burkulması tasarım sırasında kontrol edilmesi gereken kararsızlık türleridir. Genellikle plastik teori ve plastik tasarım içinde düşünülen bir göçme türüdür. Burkulma analizi, doğrusallaştırılmış (özdeğer) burkulma analizi ve doğrusal olmayan burkulma analizi olarak ikiye ayrılır:

Doğrusallaştırılmış (özdeğer) burkulma analizi, ideal-doğrusal elastik yapının teorik burkulma dayanımını (çatallanma noktasını) tespit eder. Bir kolonun özdeğerli burkulma analizi klasik Euler çözümü ile örtüşecektir.

Doğrusal olmayan burkulma analizi genellikle gerçeğe daha yakın bir yaklaşımdır. Bu teknik yapının kararsız hale geldiği noktayı bulmak için kademeli artan yüklemeler yoluyla doğrusal olmayan analiz yöntemini kullanır. Özetlemek gerekirse, doğrusal olmayan burkulmanın ana özelliği burkulma sonrası bölgesel stabilite kayıplarını da dahil etmesidir; buna karşılık doğrusallaştırılmış burkulma yalnızca burkulma öncesi davranıştan çatallanma (kritik yük) noktasına kadar olan doğrusal bölümü kapsar.

### 3.3.2.1. Eleman burkulması

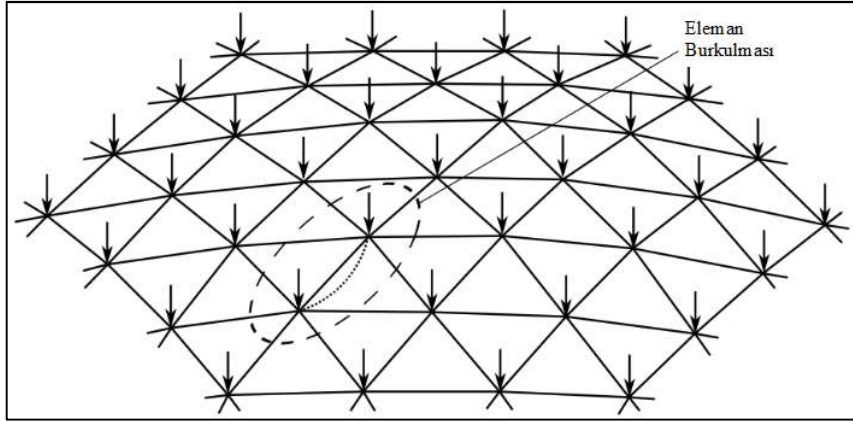
Uzay kafes sistemdeki diğer elemanların veya düğüm noktalarının etkilenmediği, taşıyıcı elemanın tek başına burkulmasıdır (Şekil 3.25). Bu elemanlar tasarım yönetmeliklerine uygun olarak tasarlandığında bu tip burkulmanın oluşmasının önüne geçilir. Eksenel basınca maruz düz bir çubuğun kritik burkulma yükü,

$$P_{cr} = \alpha \frac{\pi^2 EI}{l^2}, \alpha = \alpha(c_i, c_j, w_0, e, m) \quad (3.1)$$

olarak ifade edilir. Burada  $E$  Hooke kanununa uyduğu kabul edilen malzemenin sabit elastisite modülü,  $I$  kesitin atalet momenti ve  $l$  ile de çubuğun burkulma uzunluğu gösterilmektedir.  $\alpha$  katsayısı parantez içinde gösterilen parametrelere bağlı olarak farklı değerler alır; düğüm noktalarının dönme rijitliği  $c_i$  ve  $c_j$ , ön kusur  $w_0$ , yükün eksantrikliği  $e$ , kesme kuvveti ve moment etkisi  $m$  olarak gösterilmiştir.

Denklem (3.1)'e dayanarak, elemanların burkulma tahkikinde tasarım yönetmeliklerinde genellikle narinlik katsayısının  $\lambda=l/r$  kullanıldığı yöntemler verilir, burada  $r$  atalet yarıçapıdır.

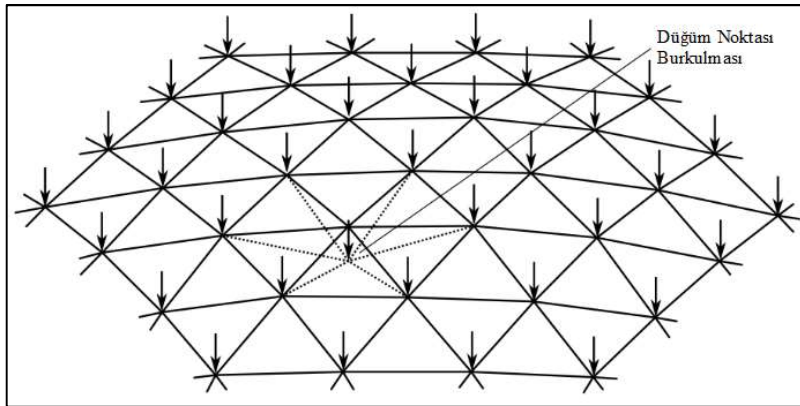
Çalışmada elemanların burkulma tahkiki yönetmelik şartlarına uygun olarak SAP2000 paket programıyla otomatik kontrol edilmiştir.



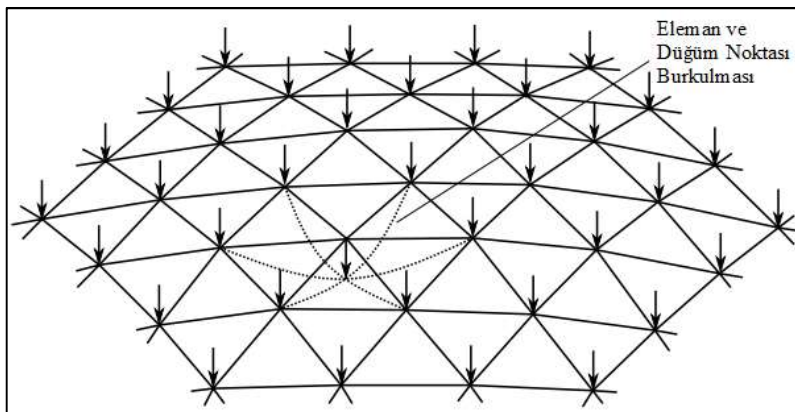
Şekil 3.25. Eleman burkulması

### 3.3.2.2. Yerel burkulma

Uzay kafes sistemin yerel burkulması, ızgara kabuklar gibi tek katmanlı uzay kafes sistemlerde meydana gelme eğilimi yüksektir. Düğüm noktalarında meydana gelen tersine dönerek (snap-through) burkulmadan kaynaklanır. Sınırlı bir alanda meydana gelmesine rağmen büyük ölçüde sistemin bir bütün olarak esnekliğine bağlıdır.



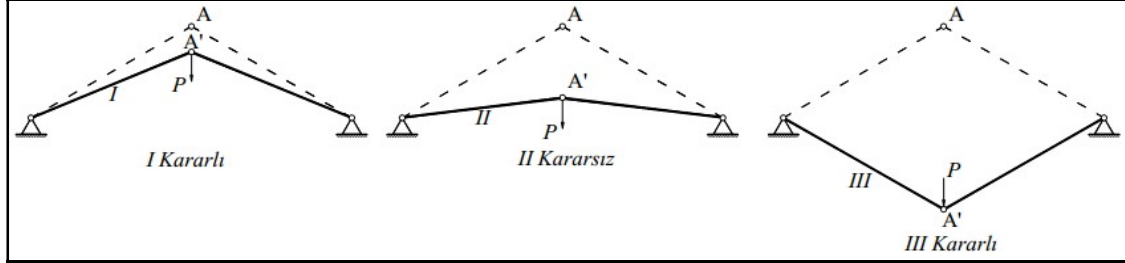
Şekil 3.26. Düğüm noktası burkulması



Şekil 3.27. Eleman ve düğüm noktası burkulması



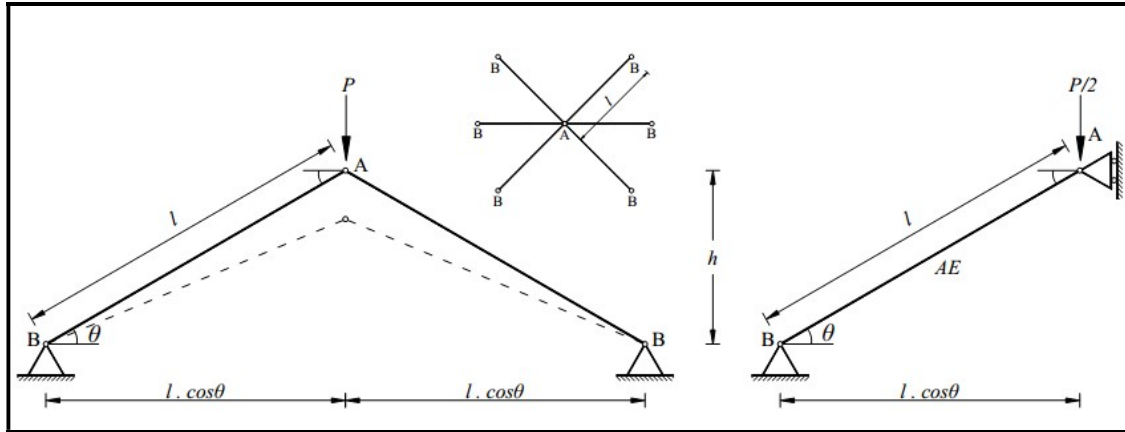
Tersine dönerek burkulma doğrusal olmayan geometri yapısıyla ilişkilendirilir; eğer yük, kritik burkulma yükün ötesinde küçük miktarda artırılırsa, yapı büyük deformasyona uğrayarak orijinal biçiminden tamamen farklı bir biçimde stabil hale gelir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28. Tersine dönerek burkulma (snap-through)

Çaprazlı (braced) kubbelerde taşıyıcı sisteme asılı, özellikle aydınlatma tesisatı, havalandırma tesisatı gibi gerek estetik gerek kullanım açısından ihtiyaç duyulan bazı elemanlar, yoğun tekil yük oluşturabilmektedir. Tek katmanlı uzay kafes kubbeler doğası gereği tekil yüklere karşı hassastır ve tasarım aşamasında özellikle dikkate alınmalıdır. Bunu sağlamak için belirli bir noktaya yükleme yapmak yeterli değildir. Her yükleme noktası ve muhtemel kombinasyonlara özel bir önem verilmesi gerekir çünkü bu yoğun tekil yükler yapının stabilitesi üzerinde, özellikle tersine dönerek burkulma (snap-through) açısından, önemli bir etkiye sahiptir (Walker 1984).

Tekil yüke bağlı yerel burkulma (snap-through) tahkiki için bir analitik formül geliştirilmiştir. Yapılan kubbe tasarımı için emniyetle taşınabilecek tekil yük bu denklem ile elde edilir (Denklem 3.2). Bu denklem aşağıda açıklanmıştır:



Şekil 3.29. Tekil yüke bağlı burkulma

Sistemin rijitlik denklemi,

$$|[K_S^*] - \lambda_{cr}[K_G^*]| = 0$$

olarak ifade edilir. Burada  $K_S^*$  elastik rijitlik matrisi,  $K_G^*$  geometrik rijitlik matrisi,  $\lambda_{cr}$  kritik burkulma katsayısıdır.

$$[K^{(l)}] = \frac{AE}{l} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix}$$

$$[K_G^{(l)}] = \frac{P}{2sl} \begin{bmatrix} s^2 & -cs & -s^2 & cs \\ -cs & c^2 & cs & -c^2 \\ -s^2 & cs & s^2 & -cs \\ cs & -c^2 & cs & c^2 \end{bmatrix}$$

Sınır şartlarından,

$$\frac{AE}{l} s^2 - \lambda_{cr} \cdot \frac{P}{2sl} c^2 = 0$$

$$P_{cr} = \lambda_{cr} P = \frac{2AEs^3}{c^2}$$

olarak bulunur.

Şekil 3.29'da verilen sistemde tersine dönerek burkulma (snap-through) için üst sınır,

$$W_{cr} \leq \frac{6AEh^3}{l^3 - h^2l} \quad (3.2)$$

ifadesiyle tespit edilir.

### 3.3.2.3. Global burkulma

Mevcut uygulamalardan, kubbe şeklindeki basık kabuğun tonozlara kıyasla global burkulmaya daha yatkın olduğu görülmüştür. Dahası, tek katmanlı uzay kafes sistemler global burkulmada çift katmanlılara göre daha duyarlıdır. Çift katmanlı ızgaralar için çoğu zaman basınca çalışan elemanların burkulma kontrolü yeterli olmaktadır.

Global burkulma analizi; zati ağırlık, rüzgâr, kar yükleri altında p-delta etkisini de dikkate alarak yapıdaki stabilite kaybı sonucu ortaya çıkan kararsızlık mod şekillerini arar. Global burkulma analizi, çoğu yapı analizi programında gerçekleştirilebilen, özdeğer probleminin çözümünü içerir. Aşağıda, global burkulma analizinin altında yatan teorisinin temeli açıklanmıştır:

Tüm sistemin rijitlik denklemi

$$\{F\} = ([K]_l - [K]_g)\{\Delta\} \quad (3.3)$$

dir. Burada:

$[K]_l$  elastik rijitlik matrisidir.

$[K]_g$  geometrik rijitlik, yapısal geometriye ve elemanların aksenal kuvveti gibi yük vektörüne ve yükleme durumuna bağlıdır.

$\{\Delta\}$  sistemin burkulma halindeki yer değiştirme vektörüdür.

Eğer yükler burkulma yük faktörü,  $\lambda$  katı kadar artırılırsa verilen mod şeklinde sistemde global burkulma oluşacaktır.

$$\lambda \{r\} = \{F\} \quad (3.4)$$

Burada  $r$  yük vektörüdür.

Denklem (3.3) ve denklem (3.4) düzenlenerek;

$$\lambda \{r\} = ([K]_l - \lambda[K]_g) \{\Delta\} \quad (3.5)$$

halini alır.

Görüldüğü üzere burada yalnızca  $[K]_g$  etkilenir çünkü yük vektörüne bağlıdır. Yani burkulma hali,

$$0 = ([K]_l - \lambda[K]_g) \{\Delta\} \quad (3.6)$$

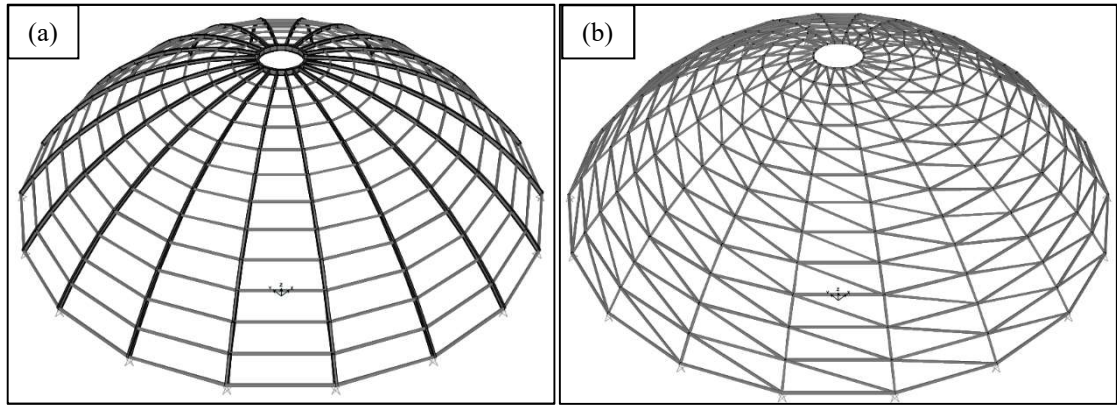
dir. Bu ifadede  $\lambda$  özdeğerlerin diyagonal matrisi olduğu görülebilir.  $\lambda$  daha önce bahsedilen global burkulma yük faktörüdür. Burada burkulma mod şekillerinin yüke bağlı olduğu anlaşılmalıdır. Yapının doğal titreşim modlarında olduğu gibi bir burkulma mod şekli oluşmaz. Her bir yük için burkulma mod şekilleri değerlendirilmelidir. Kısaca global burkulma katsayısı,  $\lambda$  verilen mod şeklinde burkulma oluşması için  $r$  matrisindeki yüklerin çarpılması gereken katsayıdır. Bu nedenle, aynı zamanda güvenlik faktörü olarak da görülebilir; burkulma yük faktörü 1'den büyükse burkulma oluşması için yükler  $\lambda$  kat artırılmalıdır, eğer 1'den küçükse mevcut yükler altında burkulma oluşmaktadır. Burkulma faktörü negatif de olabilir. Bu, yükler tersine çevrilirse burkulmanın oluşacağı anlamına gelir.

Uzay kafes yapıların global burkulma analizi, SAP2000, ANSYS, ABAQUS gibi paket programlar yardımıyla gerçekleştirilebilir.

### 3.4. Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbe Tasarımı

#### 3.4.1. Giriş

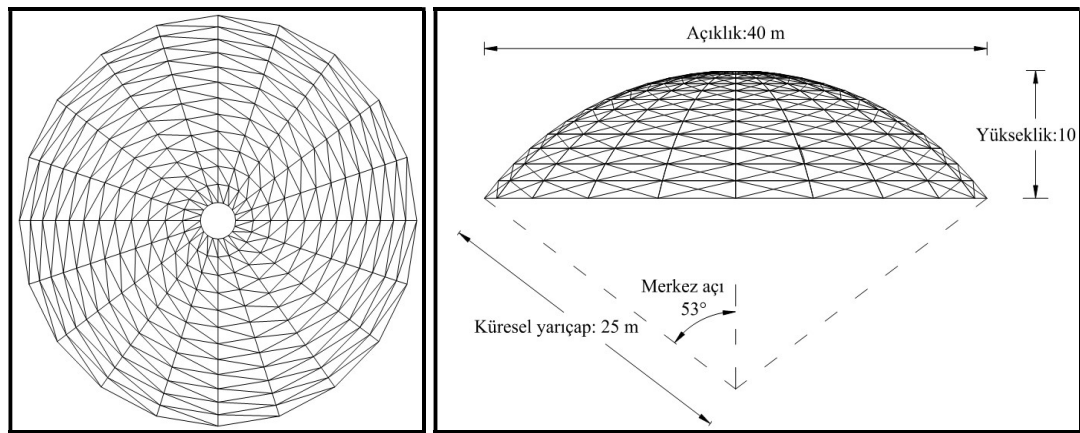
Bu bölümde Antalya ili Korkuteli ilçesinde inşa edilmesi planlanan kapalı yüzme havuzunu örtecek tek katmanlı uzay kafes kubbe model olarak ele alınmıştır. İmalat kolaylığı açısından en çok tercih edilen kubbe formasyonlarından rijit birleşimli nervürlü kubbe (Model 1) veya mafsallı birleşimli schwedler tipi kubbe (Model 2) seçilmesi halinde modellerin stabilite güvenliği açısından karşılaştırması yapılmıştır (Şekil 3.30). Analiz öncesinde kubbe geometrisi Formian2 programında hazırlanarak SAP2000 programına aktarılmıştır. Yük tanımlamaları yönetmelik şartlarına uygun hesaplanmış ve modellere tatbik edilmiştir. Boyutlandırma ve stabilite tahkiki yapılarak, ağırlıkça kıyaslanmış ve bir güvenlik faktörü olarak doğrusallaştırılmış burkulma analizinde tespit edilen kritik burkulma katsayısı açısından karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.30. a) Model 1; b) Model 2

#### 3.4.2. Modellere ilişkin bilgiler

Örnek olarak seçilen kubbeler, tek katmanlı uzay kafes biçiminde taşıyıcı sisteme sahip kabuklardır. Model 2'ye ait plan ve cephe görünüşleri aşağıdaki şekilde verildiği gibidir.



Şekil 3.31. Yapının plan ve cephe görünüşleri

Yapılara ait çeşitli geometrik özellikler ve malzeme özellikleri aşağıda verilmiştir. Hesaplamalarda SI birim sistemi kullanılmıştır:

Kubbe modellerinin çapı 40 m, küresel yarı çapı 25 m, tepede basınç halkasının çapı 3.56 m; kubbe yüksekliği 10 m dir (Şekil 3.31). Tabandan itibaren 12 adet paralel doğrultuda halka ve 20 adet meridyen doğrultuda nervürden oluşmaktadır.

Boyutlandırmada Model 1 için meridyen doğrultuda kirişler IPN ve paralel doğrultudaki nervürler boru profil seçilerek, tüm birleşimler moment aktaran (rijit) şekilde düzenlenecektir. Model 2 için ise boru profiller kullanılacak, birleşimler moment aktarmayan (mafsallı) şekilde düzenlenecektir. Kesit seçiminde kullanılacak malzeme aşağıda özellikleri verilen S275 çeliğinden imal edilmiş olacaktır:

- $E$ : Elastisite modülü = 210000 Mpa,
- $F_y$ : Karakteristik akma dayanımı = 275 MPa,
- $F_u$ : Karakteristik çekme dayanımı = 430 MPa,
- $F_{ye}$ : Hesap akma dayanımı = 302,5 MPa,
- $F_{ue}$ : Hesap çekme dayanımı = 473 MPa.

### 3.4.3. Modellerin oluşturulması

Uzay kafes sistemler zarif ve etkileyici görüntüsüne rağmen, geometri oluşturulması işi oldukça zordur. Surrey Üniversitesi, Uzay Kafes Yapılar Araştırmaları Bölümü tarafından geliştirilen Formex algoritması, kubbe biçimlendirme işlemini basit ve hızlı şekilde yapılmasını sağlar. Formex algoritması ile uzay kafes yapılar için çok farklı biçimlerde modeller üretmek mümkündür. Özellikle eleman ve birleşim sayıları, düğüm noktaları koordinatları gibi konular hakkında bilgi sağlar. Oluşturulan bilgi, yapıyı görselleştirmek veya analiz safhası için model verilerini elde etmek gibi çeşitli amaçlar için kullanılabilir. Üretilen her model mukavemet, rijitlik, ağırlık, elemanların yük dağılımı, geometrik ön kusurlar, birleşimlerin rijitliği, serbestlik derecesi ve ileride oluşması muhtemel göçme mekanizması açısından farklı özellikler gösterir. Program ile bu biçimler hızlıca üretilerek mühendislikte hedeflenen düşük maliyet-yüksek dayanım prensibine ulaşılmasında tasarımcıya yardımcı olmaktadır. Bu doğrultuda çalışmadaki modeller Formian2 programı ile üretilmiştir.

Model 2'yi üretmek için kullanılan Formex algoritması aşağıda verildiği gibidir:

(\*) Schwedler tipi kubbe (\*)

M=20; (\*) paralel doğrultuda nervür sayısı (\*)

N=12; (\*) meridyen doğrultuda nervür sayısı (\*)

S=40; (\*) açıklık (\*)

H=10; (\*) yükseklik (\*)

A=2\*atan | (2\*H/S); (\*) merkez açısı (\*)

R=S/(2\*sin | A); (\*) küresel yarıçap (\*)

E=rinit(M,N,1,1) | {[1,0,1;1,1,1], [1,0,1;1,0,2], [1,0,1;1,1,2]};

B=rin(2,M,1) | [1,0,N+1; 1,1,N+1];

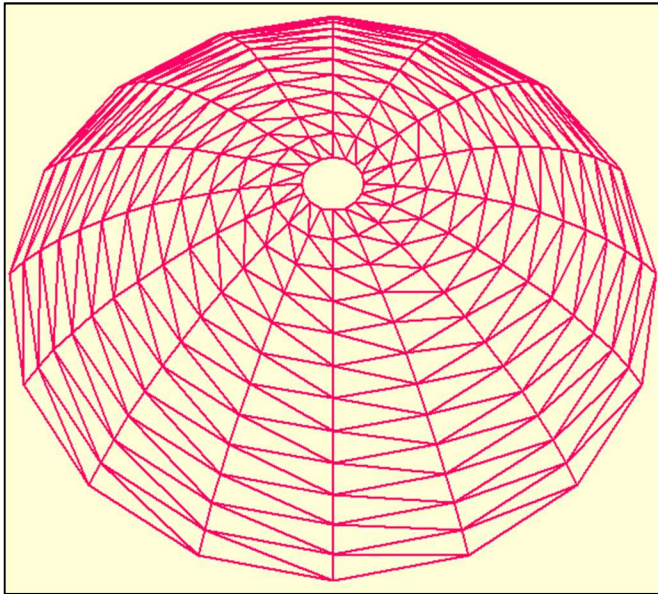
D=E#B;

DD=bs(R,360/M,A/(N+1)) |D;

use &,vm(2),vt(2),

vh(0,2\*R,4\*R, 0,0,0, 0,0,1);

clear; draw DD;



Şekil 3.32. Formex algoritması ile üretilen Model 2

SAP2000 paket programına aktarılan modelde, birleşim bölgeleri eğilme momenti ve kesme aktaran rijit birleşim olarak tanımlanmıştır. Paralel ve meridyen doğrultudaki nervürlerin arasında kalan trapez alanlara çubuklara yük aktarımını sağlamak amacıyla döşeme tanımlanmıştır. Bu döşemelerin tarifinde ağırlığı ve mukavemeti olmayan malzeme ile ihmal edilebilir kalınlık ve rijitlikte döşeme oluşturulmuştur. Döşemelerden çubuklara yükler iki yönlü aktarılacak ve çapraz çubuklar yük almayacak şekilde tasarlanmıştır.

#### 3.4.4. Yükler ve yük kombinasyonları

Yükler; yapı elemanlarının ağırlığı, çevresel etmenlerin, hareketlerin ve boyutsal dezavantajlardan kaynaklanan kuvvetler ve hareketlerden oluşur. Yapıyı etkilediği en çok bilinen yükler; zati yük, deprem yükü, akışkanların etkisi, yağmur yükü, kar yükü, rüzgâr yükü olarak sınıflandırılabilir. Bunlar arasında rüzgâr ve kar yükleri, stabilite kaybına sebep olduğu için, kubbe yapıları için daha kritiktir.

Bu çalışmada 29614 sayılı Resmî Gazete 'de yayınlanan Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (2016) Madde. 5.3'de belirtildiği üzere; yapı sistemlerinin tasarımında esas alınan karakteristik yük değerleri TS498 e uygun olarak belirlenmiş, kar yükleri için TS EN 1991-1-3 ve rüzgâr yükleri için TS EN 1991-1-4 standartlarında verilen koşullar göz önüne alınmıştır.

##### 3.4.4.1. Zati ve hareketli yük

Ölü yükler; elemanların, kaplama örtüsünün, aşıkların ve diğer kalıcı elemanların (aydınlatma sistemi, havalandırma tesisatı, asman tavan gibi servis yükleri de dahil) ağırlığıdır. Ölü yük, yüzeye etki eden düzgün yayılı yük olarak alınır.

Taşıyıcı elemanların kendi ağırlığı programda otomatik dahil edilmiştir. Kaplama olarak, alüminyum sandviç panel seçilmiştir. Bu kaplamanın yükü (tespiti için kullanılan parçaları dahil)  $0.20 \text{ kN/m}^2$  olarak alınmıştır.

Kubbe yapılarda hareketli yük; kaplama örtüsünün temizlenmesi, periyodik bakım gibi çeşitli amaçlarla çatıda yapılan çalışmalar esnasında oluşabilecek yüklere karşılık gelir. Bu doğrultuda çatıda çalışan kişinin ağırlığı olarak hareketli yük  $1 \text{ kN/m}^2$  olarak alınabilir. Ancak yük kombinasyonlarında, yapının aynı anda tüm yüklere maruz kalma olasılığının düşük olmasından dolayı, hareketli yük etkisi kar ve rüzgâr yükleriyle birlikte düşünülmez.

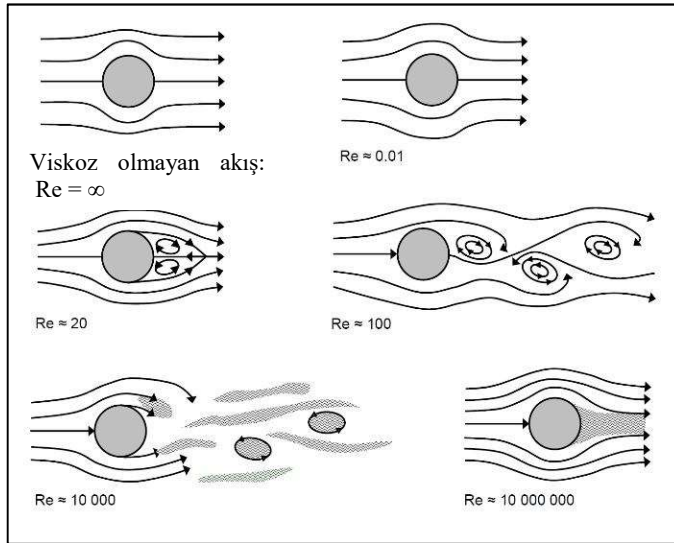
##### 3.4.4.2. Rüzgâr yükü

Kubbe gibi çift eğrilikli yüzeylerde rüzgâr dağılımının belirlenmesi bazı yaklaşık tahminlere dayanmaktadır. Rüzgâr tüneli testlerine dayanan deneysel çalışmalar, genellikle daha güvenilir bilgi sağlar. Yapılan araştırmalar, rüzgâr dağılımının yoğunluğunun, büyük ölçüde yükseklik açıklık oranına bağlı olduğunu ve birbirine yakın yapıların dağılım üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yapıdaki boşluklar, yüzey koşulları, havalandırma açıklıklar ve benzeri her şey akış koşulları ve basınç dağılımı üzerinde etkilidir. Geniş açıklıklı kubbe tasarımcıları, normal rüzgâr dağılımı formüllerinin kullanımının yalnızca ön tasarımda kullanılması gerektiğini

dikkate alınmalıdır; kesin tasarım rüzgâr tüneli deneylerine dayanmalıdır. Rüzgâr yükünü temsil etmek adına düşey yük tatbik edilmesi geleneksel bir yöntem olarak düşünülse de rüzgâr tüneli deneylerine dayanan ayrıntılı analizler gerçekte, rüzgâr yönündeki yüzeyde oluşan basınçla rüzgâra aksi yüzeyde emmenin birleşerek daha elverişsiz yük koşulları oluştuğunu göstermektedir. Bazı araştırmacılar, kubbe üzerinde simetrik yükleme mantığına dayanan yaklaşık yöntemlerin tamamen hatalı gerilme dağılımı oluşturacağını göstermektedir.

Büyük modellerde yapılan testler ve bazı durumlarda, gerçek yapılar üzerinde yapılan testler, birleşimlerin rijitliğinin gerilme dağılımı üzerinde önemli etkisinin olduğunu ve analizde göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir.

Araştırma sonuçları, rüzgâr tüneli testleri ile gerçek yapılardaki gerilme dağılımı arasındaki türbülans seviyesi, tünel hız profili ve prototiple gerçek yapı boyutları arasındaki uyum arasında güvenilir bir ilişki elde edilmesinin güç olduğunu göstermektedir. Ayrıca Reynolds sayısı ile sınır tabaka kalınlığı arasındaki ilişki önemlidir. Bu testler türbülanstaki artışın daha büyük basınç katsayısı  $C_p$  değerlerine yol açtığını ortaya koymaktadır. Bu etki açıklık-yükseklik oranı arttıkça daha da artmaktadır. Emmenin azalması ile Reynolds sayısı artar. Kısacası, yüzey basınçlarının esasında Reynolds sayısı, türbülans yoğunluğu ve uzunluk ölçeği, sınır tabakası derinliği ve yüzey pürüzüne bağlı olduğu sonucuna varılabilir.



**Şekil 3.33.** Silindirik yüzeylerde Reynolds katsayısı- akış ilişkisi

Rüzgâr yükleri genellikle kubbeler üzerinde etkili olan kuvvetlerin önemli bir kısmını teşkil eder. Tasarım yönetmelikleri, rüzgârın belirli tipteki yapılar üzerinde oluşması beklenen etkisini ortaya koyan basınç katsayıları hakkında bilgi sağlar. Bu katsayılar yoluyla, rüzgâr hızı ve yapı geometrisi kullanılarak tasarımdaki rüzgâr yükleri hesaplanır. Bu boyutsuz katsayılar rüzgâr tüneli sonucu tespit edilir. Bu katsayılar düz veya silindirik yüzeylerin için yeterli kabul edilebilir. Rüzgâr yükleri, rüzgâr türbülansının etkilerini karşılayan basınç ve kuvvetlerin basitleştirilmiş bileşkesi olarak temsil edilir. Karakteristik değerler, 50 yıllık döneme denk gelen, yıllık 0,002'yi aşan yıllık değişime dayanmaktadır.



Rüzgâr etkilerinin hesaplanmasında TS EN 1991-1-4 e göre çeşitli parametreler kullanılmaktadır: Temel rüzgâr hızı  $v_{b,0}$  iklim etkilerine bağlıdır. Ortalama rüzgâr hızı  $v_m$  ve tepe hız kaynaklı rüzgâr basıncı  $z_e$  yapının yüksekliğini dikkate alır. Aşağıda tarif edilen yöntemde rüzgâr basınçları, yapının boyutlarını dikkate alınarak hesaplanmıştır:

Esas rüzgâr hızı  $v_b$ , rüzgâr yönünden ve yılın herhangi bir döneminden bağımsız olarak, açık alanda, yer seviyesinden 10 metre yukarıdaki karakteristik 10 dakikalık esas rüzgâr hızının temel değeri  $v_{b,0}$ 'a dayanır.

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (4.1)$$

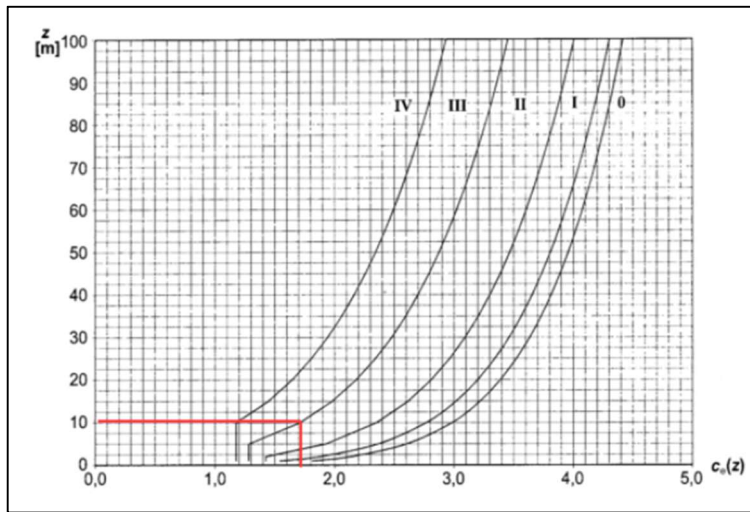
Doğrultu katsayısı  $c_{dir}$  ve mevsim katsayısı  $c_{season}$  için değer 1.0 olarak alınmıştır. Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik'e göre esas rüzgâr hızının temel değeri  $v_{b,0}$ , asgari 28 m/sn (100 km/sa) olarak verilmiştir.

Tepe hız kaynaklı rüzgâr basıncı, türbülans yoğunluğu ve ortalama rüzgâr hızını içeren denklem ile bulunmaktadır, bu değerlerin hesaplanmasında birkaç farklı parametre kullanılmaktadır. TS EN 1991-1-4 Bölüm 4.5'de tanımlanan tepe hız kaynaklı rüzgâr basıncı  $q_p(z)$  Denklem 4.2 tarafından basitleştirilmiş ifadesiyle tespit edilebilir.

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (4.2)$$

Hava yoğunluğu  $\rho$ , 1,25 kg/m<sup>3</sup> olarak alınmıştır. Maruz kalma katsayısı  $c_e(z)$  Şekil 3.34' den bulunur, bu değerler arazinin denizden yüksekliğine göre koşulları dikkate alan orografi katsayısı ve türbülans katsayısının bire eşit olduğu düz arazi için geçerlidir.

İnşa edilmesi planlanan kubbe, düzgün yaylı şekilde bir bitki örtüsüne veya binalara veya aralarında en az engel yüksekliğinin 20 katı kadar mesafe bulunan engellere sahip alanda olduğu için arazi kategorisi III olarak seçilmiştir. Yapının azami yüksekliği  $z$ , 10 metredir.



Şekil 3.34. Maruz kalma katsayısı,  $c_e(z)$

Şekil 3.34'e göre maruz kalma katsayısı 1.7 olarak tespit edilmiştir. Tepe hızı kaynaklı rüzgâr basıncı,

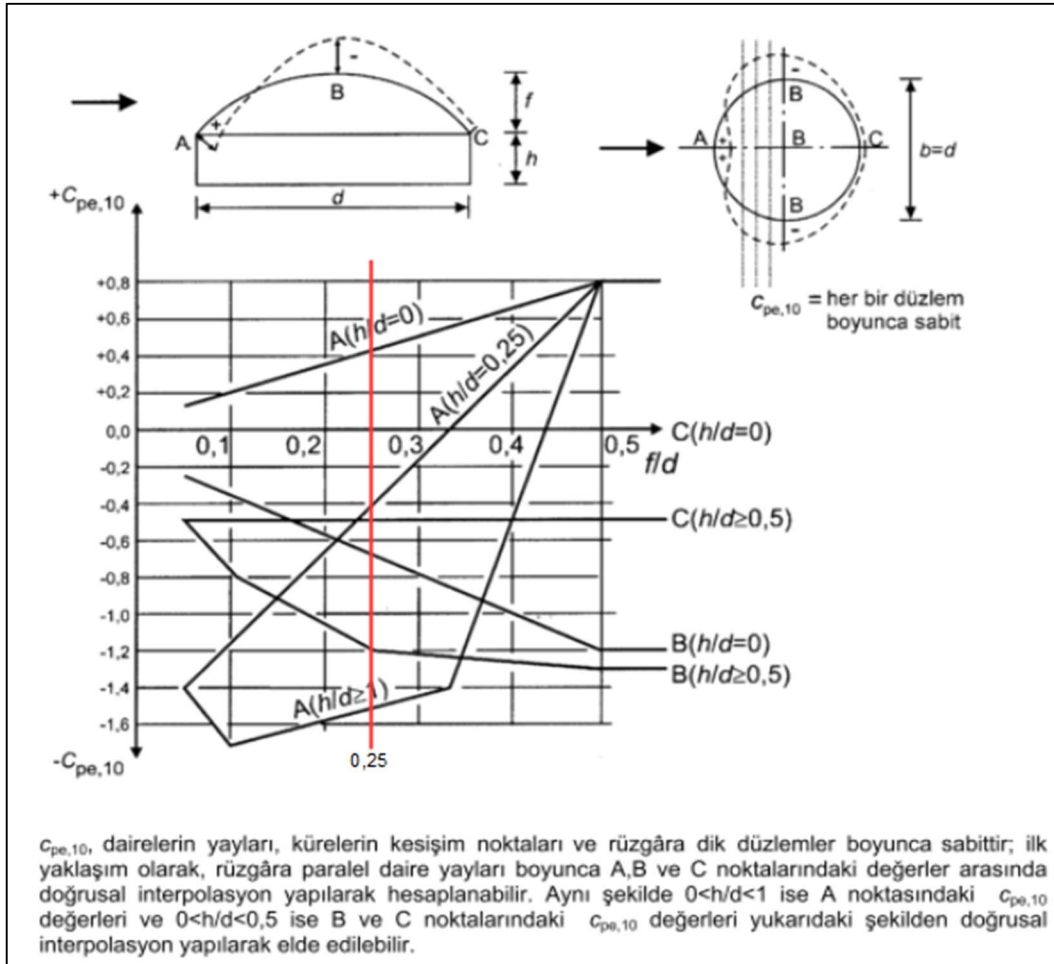
$$q_p(z) = c_e(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 1,7 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 28^2 = 833 \text{ kg/ms}^2 = 0,83 \text{ kN/m}^2 \quad (4.3)$$

olarak hesaplanır. Bu yüzey yükü, yapının geometrisine bağlı olarak basınç (veya emme) katsayıları,  $c_{pe}$  ile çarpılır. Dış yüzeylere etkiyen rüzgâr basıncı,  $w_e$  değeri,

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (4.4)$$

ifadesiyle belirlenir.

Tonoz ve kubbeler için dış basınç katsayısı  $c_{pe}$ 'nin belirlenmesinde, TS EN 1991-1-4 Bölüm 7.2.8 uygulanır. Buradan kubbeler için dış basınç katsayıları Şekil 3.35 kullanılarak belirlenir.



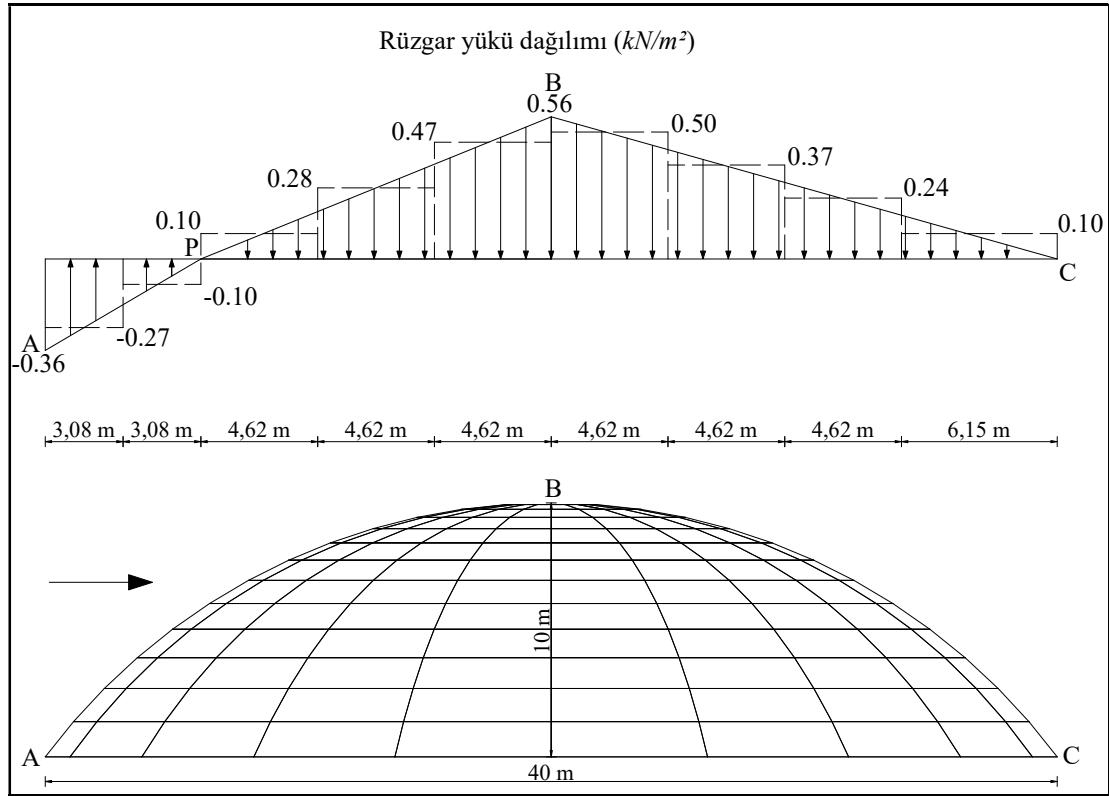
Şekil 3.35. Dairesel tabanlı kubbeler için tavsiye edilen  $c_{pe,10}$  dış basınç katsayıları

Kubbelerin yükseklik/açıklık oranı 0.25 değeri için A, B ve C noktalarında tespit edilen dış basınç katsayıları  $c_{pe,10}$  değerleri, tepe rüzgâr basıncı ile çarpılarak yük değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 3.1).

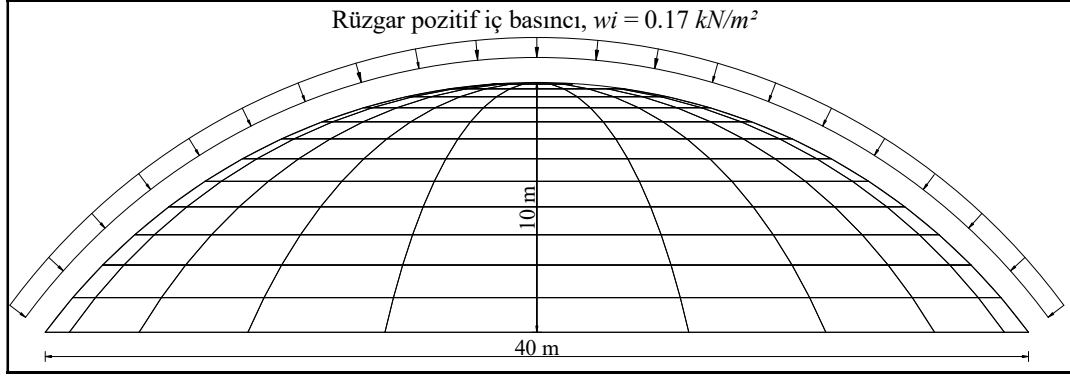
**Çizelge 3.1.** A, B ve C noktalarında  $c_p$  ve  $w_e$  değerleri

Nokta	A	B	C
$c_p$	0,43	-0,68	0
$w_e$ ( $kN/m^2$ )	0,36	-0,56	0

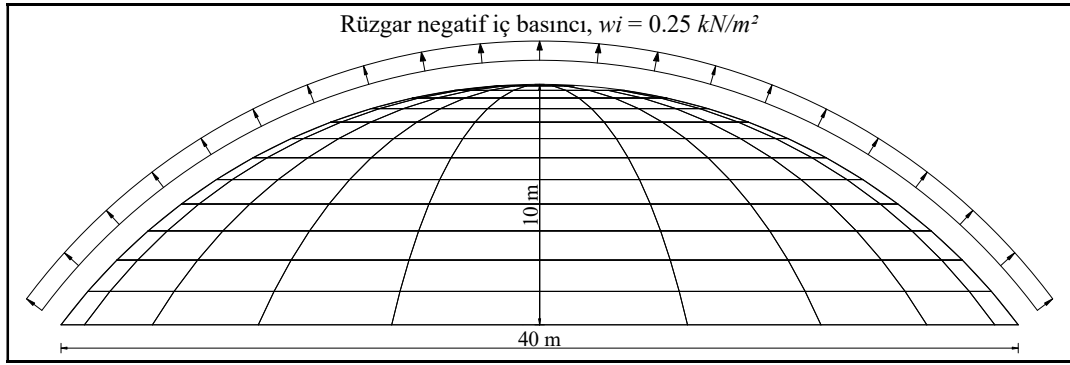
A, B ve C noktaları arasında kalan değerler için dış basınç katsayısı  $c_{pe}$  ve rüzgâr basıncı  $w_e$ , standartta belirtildiği üzere doğrusal interpolasyonla hesaplanarak, rüzgâra dik düzlemler boyunca sabit, kubbe yüzey normaline dik doğrultuda tatbik edilmiştir (Şekil 3.36).

**Şekil 3.36.** Rüzgâr dış basıncı  $w_e$ , kubbe yüzeyine dağılımı

İç basınç katsayısı  $c_{pi}$  bina cephesindeki açıklıkların boyutuna ve dağılımına bağlıdır. Bu modelde binanın geçirgenliği ve açılış oranının tahmin edilmesi mümkün olmadığı için standartta tavsiye edilen  $c_{pi}$  değeri +0,2 ve -0,3 değerlerinden en gayri müsait durumu oluşturanı alınmıştır.



Şekil 3.37. Rüzgâr pozitif iç basıncı,  $w_{ip} = 0.17 \text{ kN/m}^2$



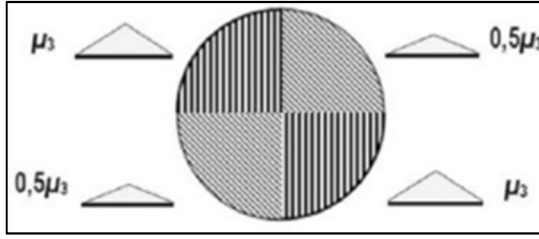
Şekil 3.38. Rüzgâr negatif iç basıncı,  $w_{in} = 0.25 \text{ kN/m}^2$

Sistemin çift eğrilikli şekli dolayısıyla yüzey açısının noktadan noktaya değişmesi nedeniyle rüzgâr yüklerinin kubbe yüzeyine dik olarak tatbik edilmesi gerektiğinden tasarım modelindeki rüzgâr yüklerinin doğru şekilde temsil edilmesi biraz daha zordur. Rüzgâr yüklerini olabildiğince doğru bir şekilde uygulayabilmek için, kubbedeki taşıyıcı elemanların arasında kalan trapez alanlara ağırlıksız kabuk elemanlar tanımlanarak modellenmiştir ve rüzgâr yükleri, yüzey basınç yükü olarak bu yüzey elemanlarına etki etmektedir. (Hasançebi vd. 2010)

#### 3.4.4.3. Kar yükü

Kar yükleri, kabuk yüzeyine dik olarak etki eden düzgün yayılı yük şeklinde gösterilir. Kubbe yapıların stabilitesinde önemli bir etkiye sahiptir. TS EN 1991-1-3 küresel çatıları dikkate almamaktadır. Silindirik çatılarda yük dağılımı Şekil 3.39'de gösterilmiştir. Tasarım ve hesaplarda, kar yüklerinin çatıda farklı şekillerde oluşabileceği göz önünde bulundurulmalıdır; çünkü kubbenin bir tarafında aşırı kar birikmesi yapının göçmesine sebep olabilir (Soare 1963). Bu olumsuzluğun önüne geçmek için yük dağılımı TS EN 1991-1-3 Madde 5.2'de belirtildiği üzere kar yükünün dağılımı sadece tüm kubbe yüzeyine (birikmemiş kar yükü = undrifted snow load) değil, aynı zamanda yapının yalnızca bir tarafına (birikmiş kar yükü = drifted snow load) dağılımı hesabı yapılmalıdır.





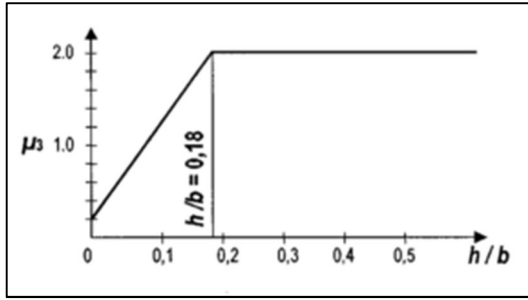
**Şekil 3.40.** Durum (II) için kubbede kar yükü şekil katsayısı dağılımı (Maten 2011)

Durum (ii) birikmiş kar yükü şekil katsayısı değeri,

$$\beta > 60^\circ \text{ için } \mu_3 = 0;$$

$$\beta \leq 60^\circ \text{ için } \mu_3 = 0,2 + 10 h/b$$

ifadesiyle belirlenir. Standartta tavsiye edilen üst sınır değeri 2.0'dır (Şekil 3.41).



**Şekil 3.41.** Farklı yükseklik/açıklık oranına sahip silindirik çatılar için tavsiye edilen kar yükü şekil katsayıları ( $\beta \leq 60^\circ$ )

Durum (i) birikmemiş kar yükü değeri hesabı:

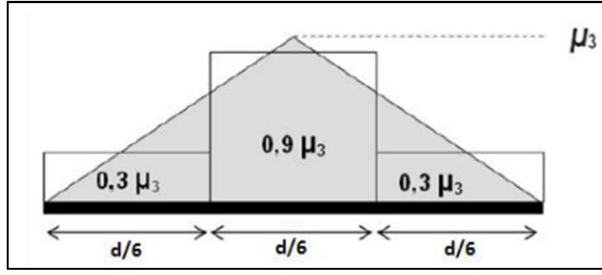
$$s = 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,35 = 1,08 \text{ kN/m}^2$$

Durum (ii) birikmiş kar yükü değeri hesabı:

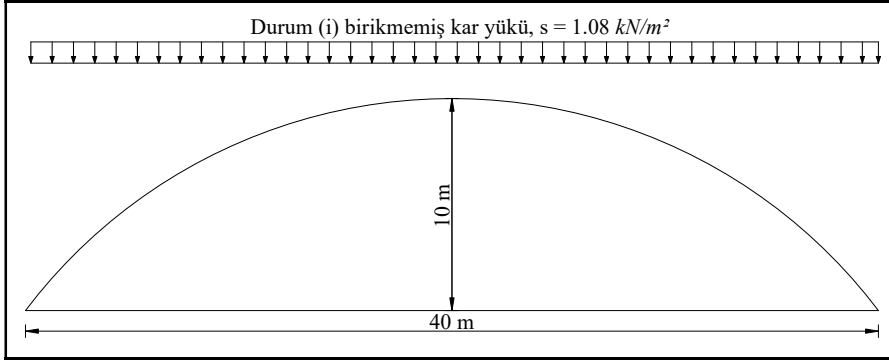
$$s(\mu_3) = 2 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,35 = 2,70 \text{ kN/m}^2$$

$$0,5 s(\mu_3) = 1,35 \text{ kN/m}^2$$

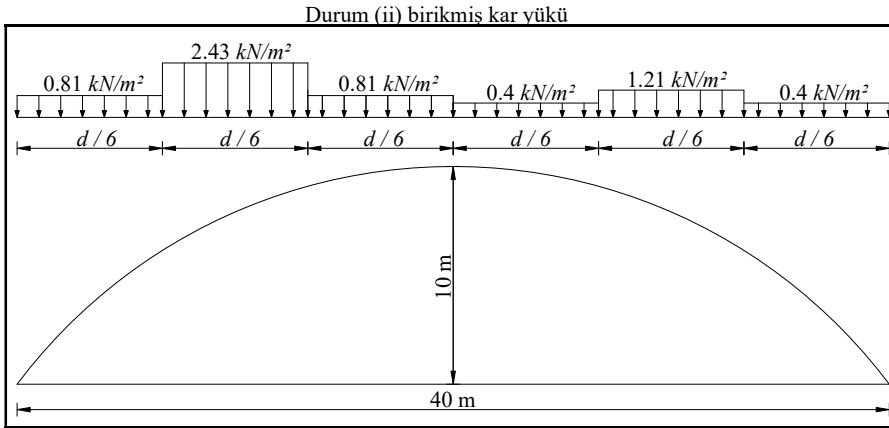
Şekil 3.40'de dağılımı gösterilen birikmiş kar yükü hem tam yüklü hem de yarım yüklü bölgeler için Şekil 3.42'de verilen yöntemle tatbik edilmiştir (Şekil 3.44).



Şekil 3.42. Durum (ii) birikmiş (drifted) kar yükü şekil katsayısı (Maten 2011)



Şekil 3.43. Durum (i) birikmemiş (undrifted) kar yükü dağılımı



Şekil 3.44. Durum (ii) birikmiş (drifted) kar yükü dağılımı

#### 3.4.4.4. Deprem yükü

Çaprazlı kubbeler betonarme yapılara kıyasla oldukça hafif olmasından dolayı, çoğu durumda deprem yükü, rüzgâr ve kar yüklerine kıyasla kritik olmayacaktır.

#### 3.4.4.5. Sıcaklık yükü

Çaprazlı kubbe elemanlarının ham maddesinin çelik olduğu için, sıcaklık değişimleri elemanlarda ve birleşimler üzerinde ilave yük oluşturabilir. Bu nedenle özellikle büyük açıklıklı kubbe analizlerinde sıcaklık değişimlerine bağlı etkinin dahil edilmesi tavsiye edilir.

Sıcaklık değişmesi etkisinin hesaplanmasında binanın ömrü boyunca etkileneceği en büyük pozitif ve negatif sıcaklık değişimleri (maksimum ve minimum sıcaklık ile binanın inşası sırasındaki ortam sıcaklığı arasındaki farklar) değeri  $\pm 25^\circ$  olarak programda çubuk elemanlara tatbik edilmiştir. Yönetmelik gereği sıcaklık değişmesi etkileri gerekli dayanımı arttıracak yönde ise 1.0 katsayısı ile tüm kombinasyonlara dahil edilmektedir.

#### 3.4.4.6. Yük kombinasyonları

Modellerde taşıyıcı elemanların yük ve dayanım katsayıları ile tasarımında (YDKT) ve doğrusallaştırılmış burkulma analizinde kullanılacak yük kombinasyonları aşağıda verilmiştir:

- (1)  $1.4G$
- (2)  $1.2G + 1.6SU$
- (3)  $1.2G + 1.6SD$
- (4)  $1.2G + 0.5SU + 1.6(WEP+WIP)$
- (5)  $1.2G + 0.5SU + 1.6(WEP+WIN)$
- (6)  $1.2G + 0.5SD + 1.6(WEP+WIP)$
- (7)  $1.2G + 0.5SD + 1.6(WEP+WIN)$
- (8)  $1.2G + 1.6SU + 0.8(WEP+WIP)$
- (9)  $1.2G + 1.6SU + 0.8(WEP+WIN)$
- (10)  $1.2G + 1.6SD + 0.8(WEP+WIP)$
- (11)  $1.2G + 1.6SD + 0.8(WEP+WIN)$
- (12)  $0.9G + 1.6(WEP+WIP)$
- (13)  $0.9G + 1.6(WEP+WIN)$

Kullanılabilirlik sınır durumu kontrolünde taşıyıcı elemanların düşey yer değiştirmeleri  $l/240$  olarak sınırlandırılmıştır. Tüm düğüm noktalarının, herhangi bir doğrultulardaki yer değiştirmeleri ise  $11.1\text{ cm } (s/360)$  olarak sınırlandırılmıştır (Hasançebi vd. 2009). Bu kontrollerde kullanılacak yük kombinasyonları aşağıda verilmiştir:

- (1)  $G + SD$
- (2)  $G + SU$
- (3)  $G + WEP+WIN$
- (4)  $G + WEP+WIP$

Burada; sabit yük  $G$ , birikmemiş (undrifted) kar yükü  $SU$ , birikmiş (drifted) kar yükü  $SD$ , rüzgâr dış basıncı  $WEP$ , rüzgâr iç pozitif basıncı  $WIP$ , rüzgâr iç negatif basıncı  $WIN$ , sıcaklık değişmesi ve/veya mesnet çökmesi  $T$  olarak gösterilmiştir.



### 3.4.5. Analiz ve boyutlandırma

Elamanların tasarım dayanımları, tarif edilen kombinasyonlar altında AISC 360-10 (LRFD) yönetmeliğine ve doğrusallaştırılmış burkulma analizinde elde edilen global burkulma yük faktörü ( $\lambda > 3$ ) kabulüne uygun olarak SAP2000 programında hesaplanmış ve boyutlandırılmıştır.

#### 4. BULGULAR

Çalışma kapsamında tek katmanlı uzay kafes kubbeler arasında imalat kolaylığı açısından en çok tercih edilen kubbe tiplerinden rijit birleşimli nervürlü kubbe ile schwedler tipi mafsalı kubbe; güncel yönetmeliklerde tarif edilen asimetrik yük kombinasyonlarında, eleman boyutlandırması esnasında güvenlik faktörü olarak global burkulma katsayısı değeri  $\lambda > 3$  kabulü esas alınarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

Model 1 için doğrusallaştırılmış burkulma analizinde elde edilen global burkulma yük faktörü ( $\lambda > 3$ ) kabulü ve yönetmelik şartlarını sağlayan boyutlandırma sonucu seçilen uygun kesit miktarı Çizelge 4.1’de; elemanların dağılımı Şekil 4.1’de verilmiştir. Bu doğrultuda Model 1 için uygun kesit miktarının kubbenin kapladığı alana oranı 30 kg/m<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Model 1 için uygun kesit miktarı

KESİT	ADET	UZUNLUK (m)	MİKTAR (ton)
IPE270	78	139.06479	5.0101
IPE300	162	288.8269	12.1965
D139.7x5	60	99.49314	1.6523
D168.3x6	100	549.84891	13.2032
D159x5	80	278.94936	5.2964
TOPLAM	480.00	1356.18	37.36

Model 2 için doğrusallaştırılmış burkulma analizinde elde edilen global burkulma yük faktörü ( $\lambda > 3$ ) kabulü ve yönetmelik şartlarını sağlayan boyutlandırma sonucu seçilen uygun kesit miktarı Çizelge 4.2’de; elemanların dağılımı Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu doğrultuda Model 2 için uygun kesit miktarı kubbenin kapladığı alana oranı 34 kg/m<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Model 2 için uygun kesit miktarı

KESİT	ADET	UZUNLUK (m)	MİKTAR (ton)
D139.7x5	620	1723.2992	28.6197
D159x6	120	634.35065	14.3595
TOPLAM	740	2357.65	42.98

Model 1 için doğrusallaştırılmış burkulma analizi sonucunda tespit edilen en düşük kritik burkulma katsayıları:

- Kombinasyon (10) için 1. burkulma mod şeklinde;  $\lambda = 3.55$  (Şekil 4.3),
- Kombinasyon (3) için 1. burkulma mod şeklinde;  $\lambda = 3.77$  (Şekil 4.4),
- Kombinasyon (8) için 1. burkulma mod şeklinde;  $\lambda = 3.95$  (Şekil 4.5),

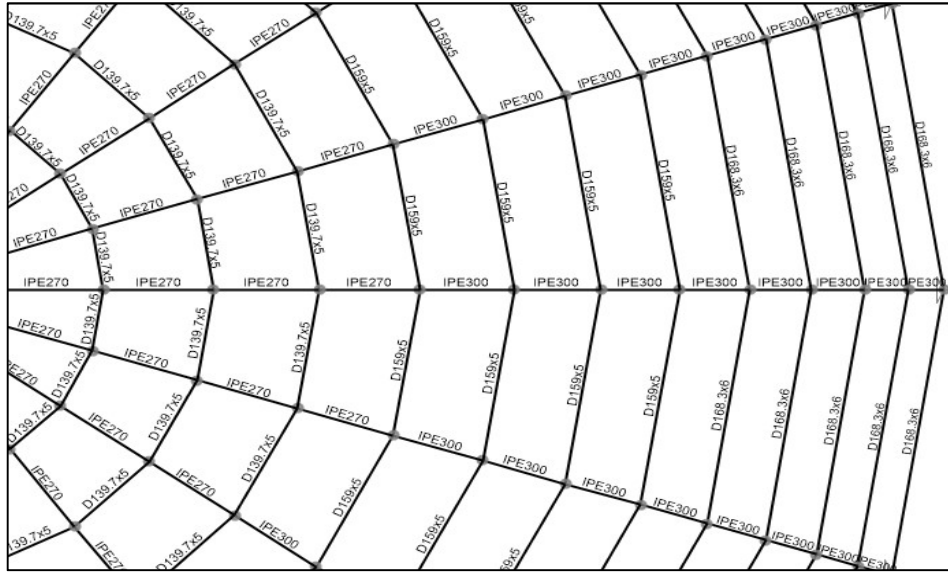
olarak tespit edilmiştir.

Model 2 için doğrusallaştırılmış burkulma analizi sonucunda tespit edilen en düşük kritik burkulma katsayıları:

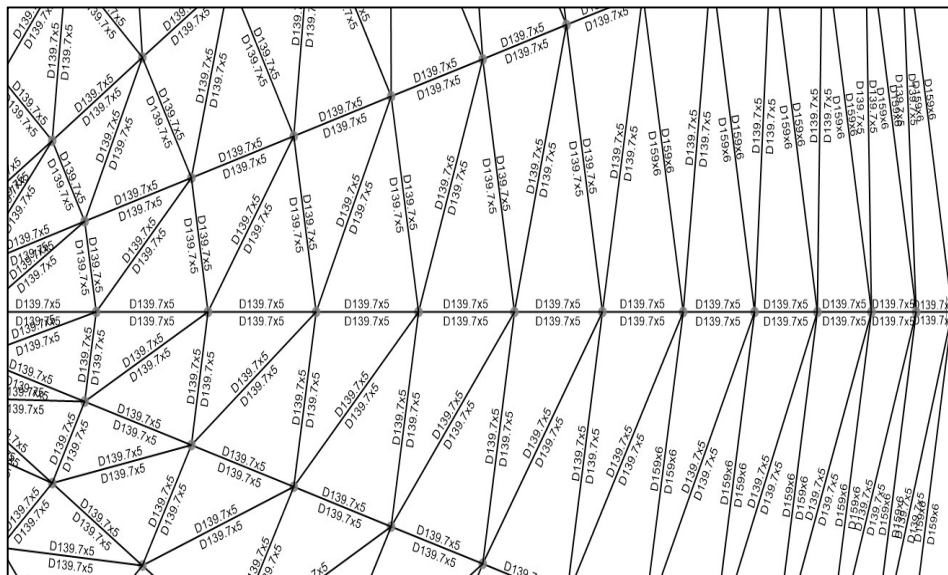
- Kombinasyon (8) için 1. burkulma mod şeklinde;  $\lambda = 3.11$  (Şekil 4.6),
- Kombinasyon (10) için 1. burkulma mod şeklinde;  $\lambda = 3.45$  (Şekil 4.7),
- Kombinasyon (9) için 1. burkulma mod şeklinde;  $\lambda = 3.47$  (Şekil 4.8),

olarak tespit edilmiştir.

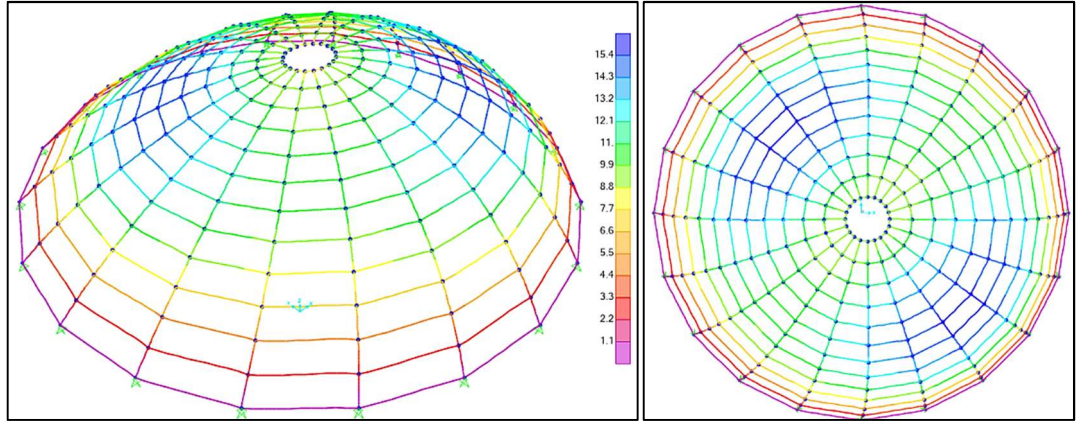
Model 1 için en yüksek sehim, en elverişsiz sehim kombinasyon (3) ( $G + WEP + WIN$ ) altında 11 cm (Şekil 4.9); Model 2 için en yüksek sehim, en elverişsiz sehim kombinasyon (1) ( $G + SD$ ) altında 1.45 cm (Şekil 4.10) olarak hesaplanmıştır.



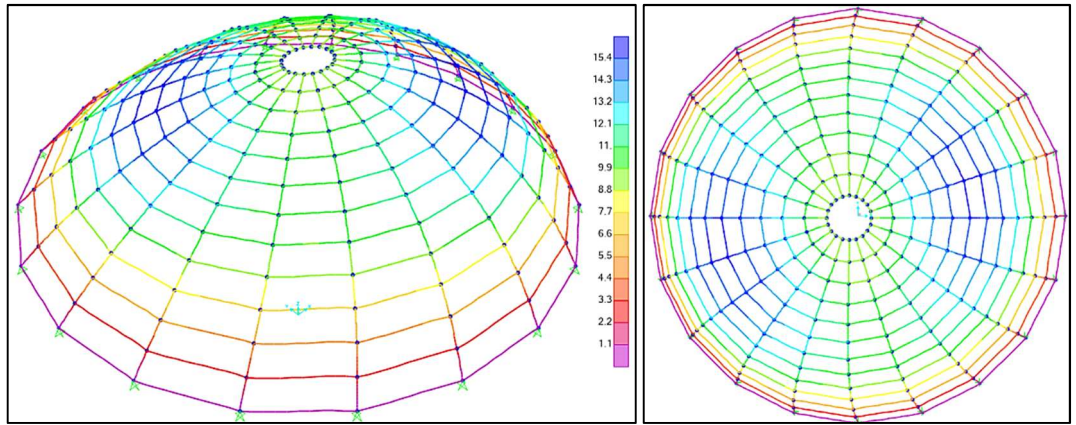
Şekil 4.1. Model 1 için seçilen kesitler



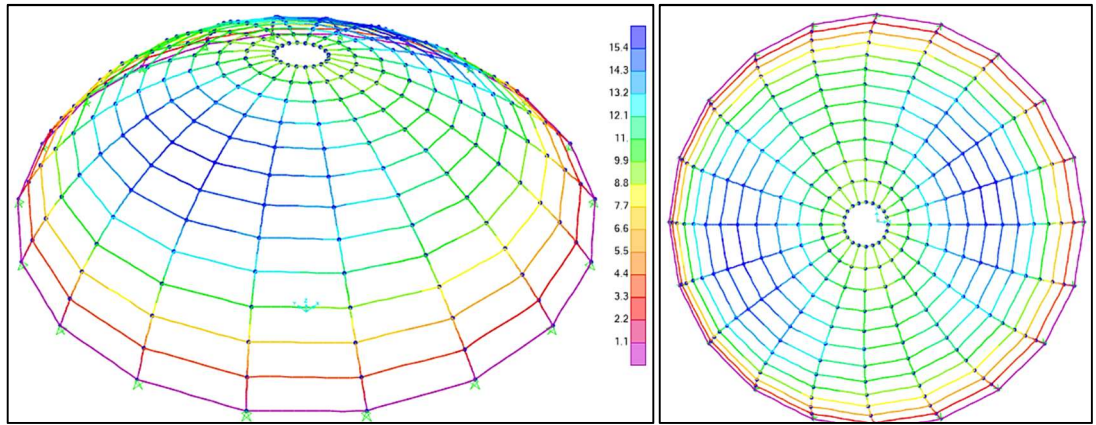
Şekil 4.2. Model 2 için seçilen kesitler



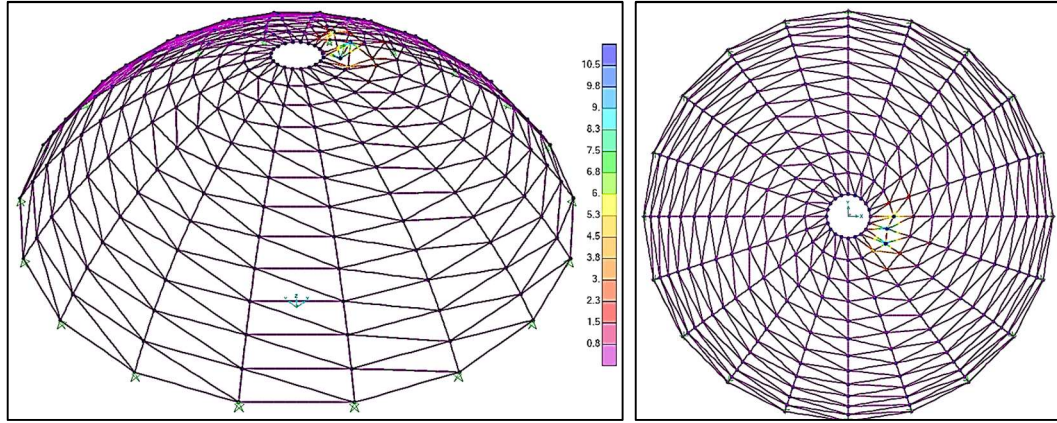
Şekil 4.3. Kombinasyon (10) için 1. burkulma mod şekli ( $\lambda = 3.55$ )



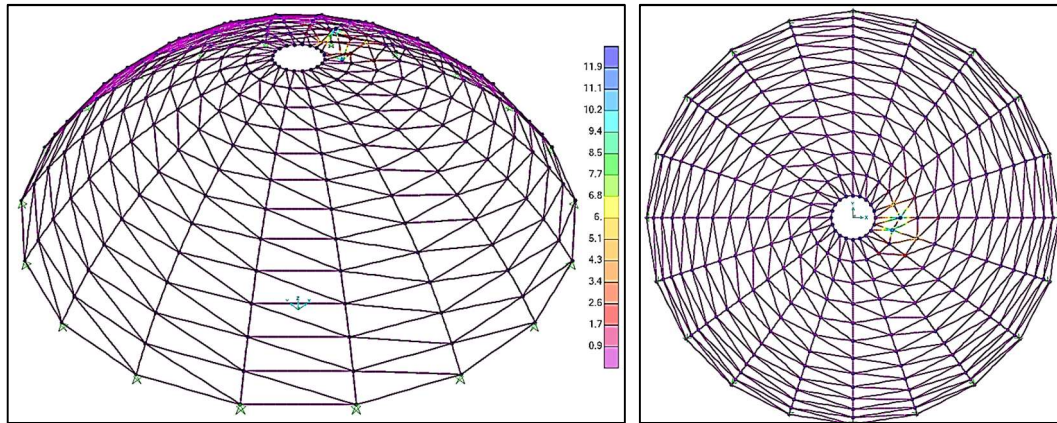
Şekil 4.4. Kombinasyon (3) için 1. burkulma mod şekli ( $\lambda = 3.77$ )



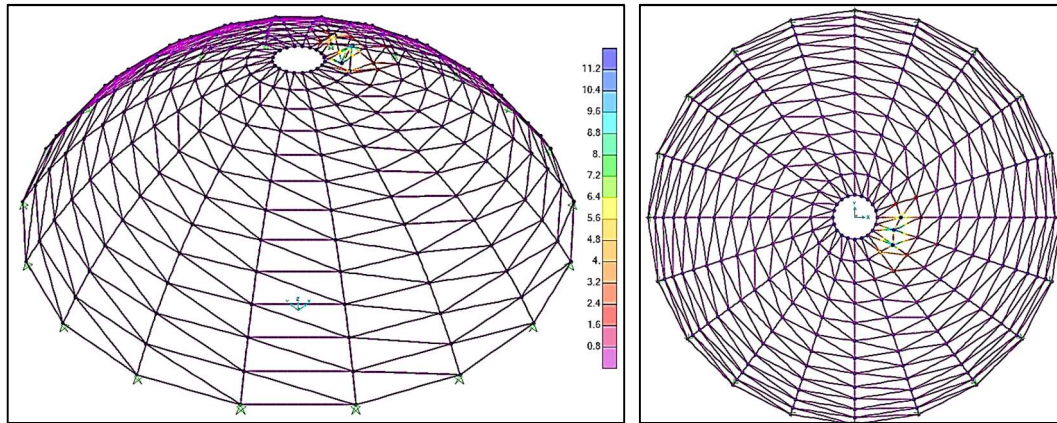
Şekil 4.5. Kombinasyon (8) için 1. burkulma mod şekli ( $\lambda = 3.95$ )



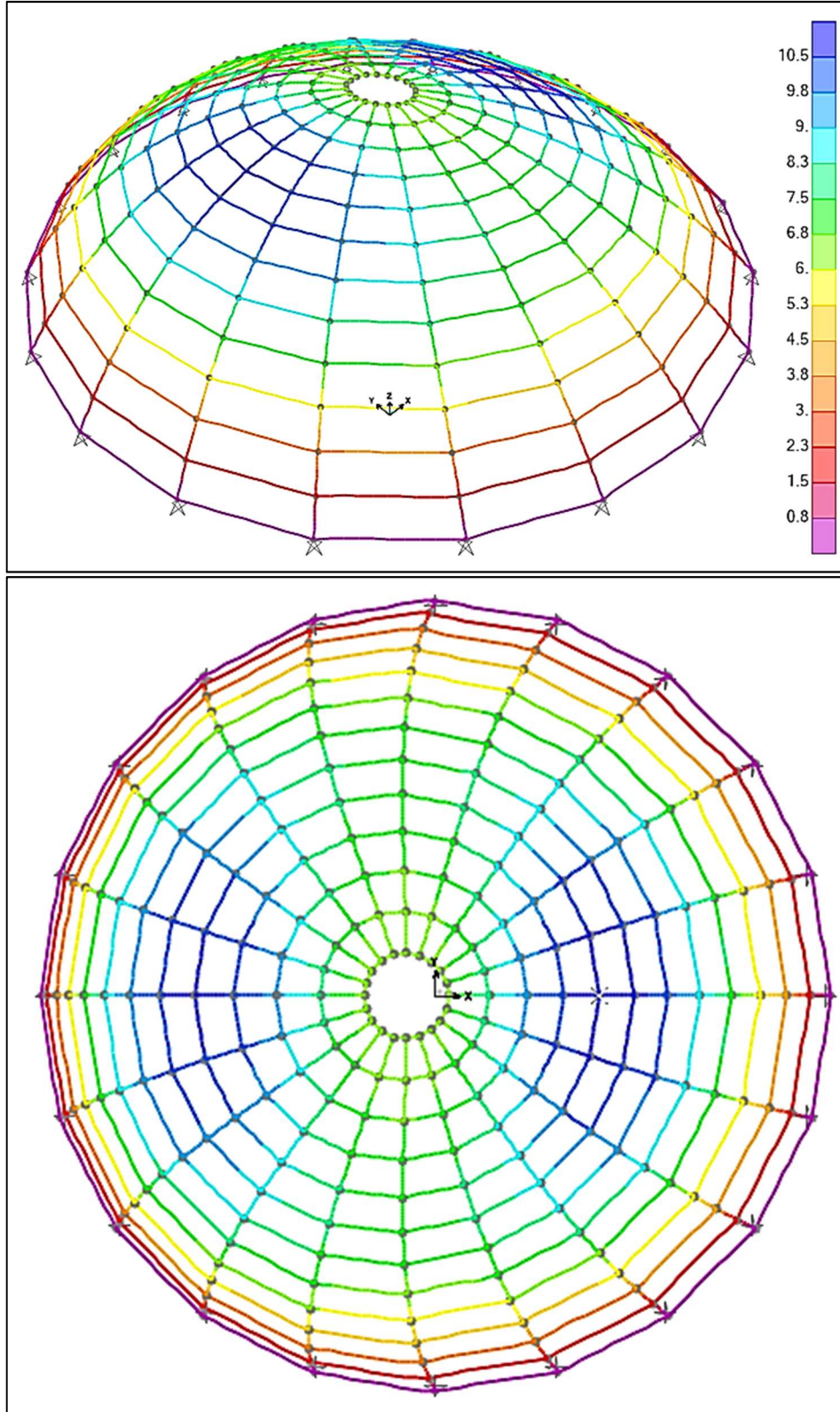
Şekil 4.6. Kombinasyon (8) için 1. burkulma mod şekli ( $\lambda = 3.11$ )



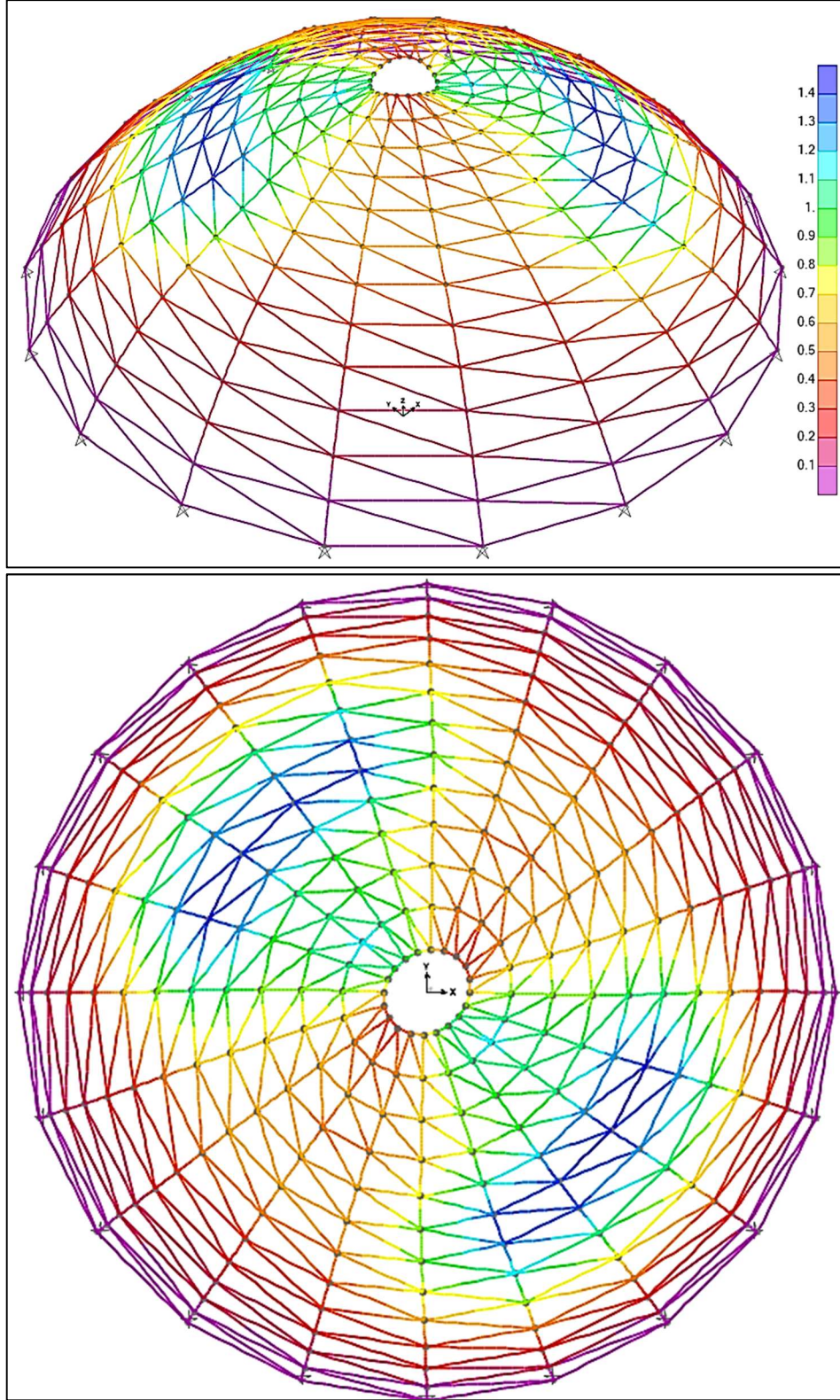
Şekil 4.7. Kombinasyon (10) için 1. burkulma mod şekli ( $\lambda = 3.45$ )



Şekil 4.8. Kombinasyon (9) için 1. burkulma mod şekli ( $\lambda = 3.49$ )



Şekil 4.9. Model 1’de en elverişsiz sehim kombinasyonu (3) için deformasyon dağılımı,  $\delta_{max} = 11$  cm.



**Şekil 4.10.** Model 2’de en elverişsiz sehim kombinasyonu (1) için deformasyon dağılımı,  $\delta_{max} = 1.45$  cm

## 5. TARTIŞMA

Hesap ve boyutlandırma sonucunda bulgular, her iki modelde de kullanılan malzeme miktarı ve burkulma katsayısı değerlerinin birbirine yakın olduğunu göstermektedir. Ancak sehim miktarı açısından bakıldığında modeller arasında büyük fark olduğu görülmektedir. Sehim miktarı özellikle kaplamanın esnekliği açısından önemlidir; esnekliği yüksek olmayan bir kaplama seçildiğinde nervürlü kubbede rijitliği sağlamak için daha büyük kesit ihtiyacı doğacaktır. Mafsallı birleşimli kubbedeki sehim değeri ise makul düzeyde olduğu görülmektedir. Bu doğrultuda schwedler tipi kubbenin daha rijit olduğu görülmüştür.

En elverişsiz global burkulma katsayısı değeri asimetric yük kombinasyonları sonucu oluştuğu görülmektedir; 1961 yılında Bükreş'te yerel burkulma sonucu tersine dönerek göçen kubbenin üzerinde kar yükünün dengesiz birikmesi ve göçme esnasında kar fırtınasının olması, bu durumu doğrulamaktadır. Bu nedenle rüzgâr ve kar yüklerinin etkisi tasarımın başlangıcından itibaren iyi bilinmelidir. İnşa edilecek yörenin yerel koşulları ve imalat yöntemi bu etkilerin her durumda farklı dağılım ve yoğunluk göstermesine neden olmaktadır. Örneğin bölgede hâkim rüzgârların varlığı yapıda beklenmeyen kar birikmelerine yol açarak, yapıyı yerel burkulmaya elverişli hale getirmektedir. Ayrıca küresel kabukların tasarımında homojen rüzgâr yükü dağılımının gerçekten oldukça uzak olduğu rüzgâr tüneli testlerinden de anlaşılmaktadır. Bu doğrultuda yönetmeliğin rüzgâr yükleri için kullanılmasını işaret ettiği TS EN 1991-1-4 standartında rüzgâr etkileri hesabında bölgelere özel parametre verilmesi, özellikle bu yüklere karşı hassas olan tek katmanlı uzay kafes kubbelerin tasarımı açısından zaruridir.

Burkulma mod şekilleri incelendiğinde nervürlü kubbede meydana gelen burkulma tipi, genel kaykılma modudur. Mafsallı kubbede ise stabilite kaybı düğüm noktasında yerel burkulma olarak başladığı görülmektedir. Nervürlü kubbenin burkulma katsayısının schwedler tipi kubbeninkinden bir miktar daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak schwedler tipi kubbede, tepe noktası civarında yerel burkulma gözlenmiştir. Bu sebeple tepe noktasında rijit bir halka oluşturulması düşünülebilir. Bu durumda burkulma katsayısı artacaktır. Bunun yanı sıra birleşimlerin yeterli rijitliğe sahip olması halinde yerel burkulmanın diğer düğümlere yayılması engellenerek tersine dönme hareketinin önüne geçilebilir. Ayrıca, mafsallı kubbede tabana yakın bölgede frekans sayısı artırılarak diyagonal uzunluğu azaltılabilir. Bu doğrultuda basınca maruz bu elemanların kesit ihtiyacı da azalır.



## 6. SONUÇLAR

Tek katmanlı uzay kafes kubbeler farklı biçimleri ile günümüzdeki etkileyici ve estetik taşıyıcı sistemler arasında yerini almıştır. Yapı malzemelerindeki gelişmelerle birlikte yapılarda daha hafif ve narin kesitler kullanılmaktadır. Hafif ve narin kesitlerin kullanılması yapıları hafifleterek kolonlara gelen yükleri, temel boyutlarını ve deprem yükünü azaltmaktadır. Ancak bu durum tek katmanlı uzay kafes yapılarda stabilite sorununu ortaya çıkarmaktadır. Yönetmeliklerde kesitlere belirli sınırlar getirilerek eleman bazında narinlik sorunu aşılmakta ancak yapının tamamını ilgilendiren global stabilite tasarımcının öngörüsüne kalmaktadır. Bu nedenle çalışmada tek katmanlı uzay kafes yapıların tasarımında elemanların gerilme kontrolünün veya sehim şartlarının sağlanması dışında global burkulma kontrolünün önemine işaret edilmiştir.

Tez kapsamında tek katmanlı uzay kafes kubbeler arasında imalat kolaylığı açısından en çok tercih edilen kubbe tiplerinden rijit birleşimli nervürlü kubbe ile schwedler tipi mafsallı kubbe; güncel yönetmeliklerde tarif edilen asimetrik yük kombinasyonlarında, eleman boyutlandırması esnasında güvenlik faktörü olarak global burkulma katsayısı değeri  $\lambda > 3$  kabulü esas alınarak incelenmiştir. Verilen geometri ve yükleme şartlarında schwedler tipi kubbenin daha rijit olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak çaprazlı kubbe tasarımında üç etken göz önünde bulundurulmalıdır: iklimsel yüklerin etkisi, kritik burkulma yükü ve mod şekilleri, birleşimlerin rijitliği. Tek katmanlı uzay kafes kubbe tasarımında nervürlü kubbe kullanılması durumunda geometri seçiminde yükseklik-açıklık oranı daha yüksek seçilmesi veya asimetrik yüklerin etkisini azaltacak önlemler alınması tavsiye edilir. Malzeme seçiminde ise nervürlü kubbeye özellikle meridyen doğrultudaki taşıyıcı elemanlar eğilme rijitliği yüksek elemanlar kullanılması, schwedler tipi kubbeye ise aksel rijitliği yüksek elemanlar kullanılması tavsiye edilir. Ancak burada tekrar hatırlatılması gereken nokta da tüm elemanların gerilme ve sehim kontrollerini sağlaması, sistemin stabil olduğu anlamına gelmediğidir. Bu nedenle özellikle basık kabuklarda asimetrik yükler altında global stabilite ve tekil yüke bağlı yerel burkulma kontrolleri yapılmalıdır. Bu yorum tek katmanlı tonozlar ve serbest formlu sistemler için de geçerlidir.

Doğrusallaştırılmış burkulma analizi sonucunda elde edilen global burkulma katsayısı ön tasarım amacıyla kullanılabilir. Tek katmanlı uzay kafes kubbelerin tasarımında doğrusal olmayan burkulma analiz sonuçları dikkate alınmalıdır.

İleriye yönelik çalışmalarda, doğrusallaştırılmış burkulma analizi ile yapılan burkulma katsayısı kontrolü farklı tipteki kubbeler için farklı geometrilerde incelenebilir. Doğrusallaştırılmış burkulma analizi sonucu hesaplanan burkulma katsayısı değeri ile doğrusal olmayan analizde tespit edilen simetrik burkulmaya (tersine dönerek burkulma) neden olan sınır yük arasındaki oran, farklı tip ve geometrideki tek katmanlı uzay kafes kubbeler arasında araştırılabilir. Bu yolla tek katmanlı uzay kafes yapılar stabilite problemini doğrusallaştırılmış burkulma analizinde hesaplanan katsayı belirlenerek sınırlandırılabilir. Bu kontrollere ek olarak deprem yükünün global burkulmaya etkisi ve deprem yükünün asimetrik yüklere kıyasla burkulma mod şeklini nasıl değiştireceği araştırılabilir.

## 7. KAYNAKLAR

- ANSI/AISC 360-10. 2010. Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, pp. 1–612.
- Baker, S. 1984. A comparison of the codes of practice used in different countries for the determination of wind loads on domes. In: Makowski, Z.S. (Ed.), Analysis, Design and Construction of Braced Domes. Nichols Publishing Company, New York, pp. 315–333.
- Behnamasl, M. 2010. Comparison of the Behaviour of Curved and Straight Types of Steel Shell Roof Structures. MSc Thesis, Eastern Mediterranean University, Gazimağusa, North Cyprus, 119 p.
- Chacko, P., Dipu, V.S., Manju, P.M. 2014. Finite Element Analysis of Ribbed Dome. *International Journal of Engineering Research and Applications*, January, 25–32.
- Computers and Structures Inc. 2013. Steel Frame Design Manual AISC 360-10 for Etabs 2013, Berkeley, California, USA, 173 p.
- Computers and Structures Inc. 2014. None property. <https://wiki.csiamerica.com/display/kb/None+property> [Son erişim tarihi: 26.12.2018]
- Computers and Structures Inc. 2013. Remove bracing from area load. <https://wiki.csiamerica.com/display/sap2000/Remove+bracing+from+area+load> [Son erişim tarihi: 31.12.2018]
- Computers and Structures Inc. 2014. Shells with no stiffness. <https://wiki.csiamerica.com/display/kb/Shells+with+no+stiffness> [Son erişim tarihi: 31.12.2018]
- Computers & Structures Inc. 2016. CSI Analysis Reference Manual. Berkeley, California, USA, pp. 556.
- Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik. 2016. T. C. Resmî Gazete, 29614, 4 Şubat 2016.
- Çiftçi, C. 2009. Stability Of Steel Dome Structures. MSc Thesis, Boğaziçi University, İstanbul, 129 p.
- Dragone, G. 1979. Wind Effect on Hemispherical Domes. MSc Thesis, University of Surrey, London.
- Eldhose M., Rajesh A. K., Ramadass S. 2015 Finite Element Analysis and Parametric Study of Schwedler Dome Using ABAQUS Software. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 28(7), 333–338.
- European Standard, Eurocode 3. 2007. Design of Steel Structures, Part 1-6, Strength and Stability of Shell Structures, prEN 1993-1-6:2007. Brussels, Belgium.
- Fiouz, A. 2012. Effect of Wind Loading on Spherical Single Layer Space Truss Steel Domes. *International Journal of Physical Sciences*, 7 (16): 2493-2505.
- Fu, F. 2015. Advanced Modeling Techniques in Structural Design. Wiley Blackwell, London, s.277.

- Gioncu, V. 1995. Buckling of Reticulated Shells: State-of-the-Art. *International Journal of Space Structures*, 10(1), 1–46. <https://doi.org/10.1177/026635119501000101>
- Görün, A. 1983. Kabuklarda Geometrinin İç Kuvvetler Dağılımına Etkisi. Doktora tezi, Yıldız Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, İstanbul, 113 s.
- Gürses, P. 2012. Yapılara Etki Eden Rüzgâr Yüklerinin Eurocode 1-4 Ve ASCE 7-05 Standartları Kullanılarak Karşılaştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 195 s.
- Hasançebi, O., Çarbaş, S., Doğan, E., Erdal, F. and Saka, M.P. 2009. Performance evaluation of metaheuristic search techniques in the optimum design of real size pin jointed structures. *Computers and Structures*, 87(5–6), 284–302. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2009.01.002>
- Hasançebi, O., Erdal, F. and Saka, M.P. 2010. Optimum Design of Geodesic Steel Domes Under Code Provisions Using Metaheuristic Techniques., (January), pp. 88–103.
- Hwang, K., Knippers, J., Park, S. 2009. Influence of various types node connectors on the buckling loads of grid shells. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009 Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures*, pp. 1841–1852.
- Hosseini, M., Hajnasrollah, S., Herischian, M. 2012. A comparative study on the seismic behavior of ribbed, schwedler and diamatic space domes by using dynamic analyses. *Wcee 15*.
- Jones, R.M. 2006. Buckling of Bars, Plates, and Shells. Bull Ridge Publishing, Virginia.
- Kanta, N. 2015. Design of a Thin Concrete Shell Roof. MSc Thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, pp. 111.
- Lan, T. 2005. Space Frame Structures. In: Chen, W.F. and Lui, E. (Eds.), *Handbook of Structural Engineering*, CRC Press, New York.
- Makowski, Z.S. 1966. *Steel Space Structures*. London.
- Makowski, Z.S. 1984. Shell analogies applied to the analysis of stress distribution in braced domes. In: Makowski, Z. S. (Ed.), *Analysis, Design and Construction of Braced Domes*. Nichols Publishing Company, New York, pp. 129–131.
- Maten, R.N. 2011. Ultra High Performance Concrete in Large Span Shell Structures. Master Thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, pp. 266.
- Mullord, P. 1984. Introduction of the Analysis of the Braced Domes. In: Makowski, Z.S. (Ed.), *Analysis, Design and Construction of Braced Dome*. Nichols Publishing Company, New York, pp. 87-95.
- Narayanan, S. 2006. *Space Structures: Principles and Practice*. Multi-Science Publishing Co. Ltd, Brentwood.
- Nooshin, H. and Disney, P. 2000. Formex Configuration Processing I. *International Journal of Space Structures*, 15 (1): 1-52.
- Öz, V. 2012. Tek Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 201 s.

- Ramaswamy, G.S., Eekhout, M., Suresh, G.R. 2002. Analysis, Design and Construction of Steel Space Frames. Thomas Telford Publishing, London, pp.262.
- Saraç, Y. 2005. Optimum Design of Pin-Jointed 3-D Dome Structures Using Global Optimization Techniques. Yüksek lisans tezi, ODTÜ, Ankara, 204 s.
- Soare, M.V. 1984. Investigation of the collapse of a large-span braced dome. In: Makowski, Z. S. (Ed.), Analysis, Design and Construction of Braced Domes. Nichols Publishing Company, New York, pp. 161-173.
- Soare, V.M. and Răduică, N. 1985. A Comparison of the Structural Efficiency of Some Braced Domes. *International Journal of Space Structures*, 1(3), 137–142. <https://doi.org/10.1177/026635118500100301>
- Soykan, K. 2007. Çelik Uzay Kubbe Sistemlerin Ağırlıkça Optimum Dizaynı. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Stephan, S., Knebel, K., Sanchez-Alvarez, J. 2004. Reticulated Structures On Free-Form Surfaces. *Stahlbau*, 73, 562–572. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00340-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00340-3)
- Supple, W.J. 1984. Stability and Collapse Analysis of Braced Domes. In: Makowski, Z. S. (Ed.), Analysis, Design and Construction of Braced Dome. Nichols Publishing Company, New York, pp. 144-159.
- Timoshenko, S.P and Gere, J.M. 1963. Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill Book Company, London.
- TS EN 1991-1-3. 2007. Yapılar Üzerindeki Etkiler- Bölüm 1-3: Genel Etkiler – Kar Yükleri (Eurocode 1). Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara, 52 s.
- TS EN 1991-1-4. 2007. Yapılar Üzerindeki Etkiler- Bölüm 1-4: Genel Etkiler – Rüzgâr Etkileri (Eurocode 1). Türk Standartlar Enstitüsü, Ankara, 126 s.
- TS 498. 1997. Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri Türk Standartlar Enstitüsü. Ankara, 24 s.
- Tzourmakliotou, D.C. 1993. Computer Aided Design Of Braced Domes. Ph.D. Thesis, University Of Surrey, London, pp. 414.
- Ülker, M., Savaş, S. 2018. AISC 360-10 ve Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Çelik Yapıların Tasarımı. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 30(1), 21–32.
- Walker, H.B. 1984. Design and construction of braced domes. In: Makowski, Z.S. (Ed.), Analysis, Design and Construction of Braced Domes. Nichols Publishing Company, New York, USA, pp. 461-478.
- Wright, D.T. 1965. Membrane forces and buckling in reticulated shells, *Journ. Struct. Div. Proc. ASCE*, vol. 91, pp. 173–201.
- Anonim 1: <http://www.altinyaldiz.com.tr> [Son erişim tarihi: 31.12.2018]
- Anonim 2: <http://www.icosasystems.com.tr> [Son erişim tarihi: 31.12.2018]

## ÖZGEÇMİŞ

**MUSTAFA ÖZCAN**

*07mustafaozcan@gmail.com*



### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2011-	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2006-2010	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya

### MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Statiker 2011-2017	Hulki Çakıcı Mühendislik ve Müşavirlik Bürosu, Alanya, Antalya
-----------------------	---