

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**TEK KATMANLI UZAY KAFES KUBBELERDE BERKİTME ELEMANI
KULLANIMININ TASARIMA ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**

GÜRHAN YILMAZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2021

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**TEK KATMANLI UZAY KAFES KUBBELERDE BERKİTME ELEMANI
KULLANIMININ TASARIMA ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**

GÜRHAN YILMAZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2021

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEK KATMANLI UZAY KAFES KUBBELERDE BERKİTME ELEMANI
KULLANIMININ TASARIMA ETKİSİNİN BELİRLENMESİ**

GÜRHAN YILMAZ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 16/07/2021 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Prof. Dr. Özgür ANIL

Doç. Dr. Ferhat ERDAL

ÖZET

TEK KATMANLI UZAY KAFES KUBBELERDE BERKİTME ELEMANI KULLANIMININ TASARIMA ETKİSİNİN BELİRLENMESİ

GÜRHAN YILMAZ

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Temmuz 2021; 54 sayfa

Geniş açıklıkların hem estetik hem de ekonomik olarak örtülebilmesi sebebiyle en eski yapı tiplerinden olan kubbeler, malzeme biliminin gelişmesiyle daha büyük açıklıkları daha küçük kesitlerle örtebilmiştir. Daha küçük kesitler ile daha hafif kubbeler oluşmuş, bu sayede daha az deprem kuvvetine maruz kalmış, ana taşıyıcı elemanlara daha az yük gelmiştir. Ancak eleman kesitlerinin küçülmesi aynı zamanda stabilite problemlerini doğurmuştur.

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, tek katmanlı uzay kafes kubbeler kısaca incelendikten sonra stabilite problemleri ele alınmıştır. Tek katmanlı uzay kafes kubbelerde stabilite kaybının önemli etkeni olan yapı düzleminde kayma rijitliğinin artırılması ve düğüm noktalarının güvenliği için berkitme eleman kullanımı araştırılmıştır. Rijit birleşimli nervürlü kubbe ile düğümler civarında berkitilmiş mafsallı birleşimli kubbe doğrusallaştırılmış burkulma analizi ile tespit edilen burkulma katsayısı değeri ($\lambda > 10$) esas alınarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu inceleme sırasında, modellenen kubbelere güncel yönetmeliklere uygun kar, rüzgar, deprem yüklemeleri ile birlikte kubbelerde burkulmaya sebebiyet verebilecek asimetrik yüklemeler uygulanmış ve kombine edilmiştir. Aynı şartlar altında, 2 kubbenin bilgisayar destekli analizi SAP2000 programı ile yapılmış, boyutlandırılmış ve karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışmada tek katmanlı uzay kafes kubbenin düğümler civarında berkitilmesiyle yapı ağırlığında %20 gibi ciddi bir azalma tespit edilmiştir. Aynı zamanda sehim miktarı açısından da modeller arasında büyük fark oluşmamıştır. Lineer analiz ile yapılan tasarımlara göre daha ağır olmasına rağmen, $\lambda > 10$ sınırlaması sayesinde yapı güvenliği istisnasız bir şekilde sağlanmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: berkitme, doğrusallaştırılmış burkulma analizi, kubbe, stabilite, tek katmanlı uzay kafes

JÜRİ: Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Prof. Dr. Özgür ANIL

Doç. Dr. Ferhat ERDAL

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE EFFECT OF THE USE OF STIFFENING MEMBERS ON THE DESIGN IN SINGLE LAYERED DOME

Gürhan YILMAZ

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

July 2021; 54 pages

Domes, which are one of the oldest building types, can be covered both aesthetically and economically. With the development of materials science, domes were able to cover larger openings with smaller sections. Lighter domes were formed with smaller sections, thus, they were exposed to less earth quake force and less load was placed on the main bearing elements. However, the reduction of element sections also created stability problems.

In this study, stability problems are discussed after a brief analysis of braced domes. The use of stiffening elements has been investigated for the safety of the joint points, which is an important factor in the loss of stability in braced domes. The rigid jointed ribbed dome and the dome which stiffened around the nodes were examined and compared based on the buckling coefficient value ($\lambda > 10$) determined by linearized buckling analysis. In this study, snow, wind, earth quake loads and asymmetrical loads that can cause buckling in the domes were applied to the modeled domes and combined. This two domes were analyzed with the SAP2000 computer program, then dimensioned and compared.

In this study, a decrease of %20 in the weight of the structure was determined by stiffening the braced dome around the nodes. At the same time, there was no big difference between the models in terms of deflection. Although it is heavier than the designs made with linear analysis, construction safety is ensured without exception thanks to the $\lambda > 10$ limitation.

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

COMMITTEE: Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ

Prof. Dr. Özgür ANIL

Assoc. Prof. Dr. Ferhat ERDAL

ÖNSÖZ

Tarihin en eski yapılarında dahi görebildiğimiz kubbeler, ekonomik malzeme kullanımı ile geniş açıklıkların geçilmesinin en estetik yoludur. Bu sayede, dünyanın neresine bakarsak bakalım tarihin kalıntıları içerisinde görebiliriz. Bu tarihi serüven içerisinde bilgi ve birikimin artmasıyla günümüzde tek katmanlı uzay kafes kubbelerle büyük açıklıklar örtülebilmekte ancak stabilite problemleri yaşanmaktadır.

Tek katmanlı uzay kafes kubbelerin stabilite problemini aşmak için bir çok çalışma yapılmış, bu çalışmalar sonucunda farklı kubbe tipleri ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, asimetrik yükler altında tek katmanlı uzay kafes kubbelerde, global burkulma kontrolü ile berkitme elemanlarının yapı ağırlığı üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma ile birlikte, yeni bir kubbe tipi ortaya konmuyor ancak, daha ekonomik tasarımlar sağlanarak kısıtlı dünya kaynaklarının daha ekonomik kullanılması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, bilgi ve birikimi ile yol gösteren danışman hocam sayın Prof. Dr. İzzet Ufuk ÇAĞDAŞ ile sayın Prof. Dr. Özgür ANIL ve sayın Doç. Dr. Ferhat ERDAL'a; maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1. Literatür Taraması	4
2.2. Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbeler	6
2.2.1. Gelişimi ve tarihçesi	6
2.2.2. Kubbe çeşitleri	6
2.2.2.1. Nervürlü kubbe	7
2.2.2.2. Schwedler tipi kubbe.....	8
2.2.2.3. Üç doğrultuda çaprazlı kubbe	8
2.2.2.4. Lamella tipi kubbe	8
2.2.2.5. Jeodezik kubbe	8
2.2.3. Türkiye'den kubbe örnekleri	8
3. MATERYAL VE METOD	11
3.1. Kubbe Davranışı.....	11
3.3. Tasarım Yükleri.....	11
3.4. Analiz	12
3.4.1. Giriş	12
3.4.2. Stabilitate problemi.....	13
3.4.2.1. Eleman burkulması	14
3.4.2.2. Yerel burkulma	15
3.4.2.3. Global burkulma	16
3.4.3. Çalışmada kullanılan analiz programı	17
3.5. Çalışma hakkında bilgiler.....	17
3.6. Modellemeler.....	18
3.7. Modellerin Oluşturulması.....	19

3.8. Yapıya Etkiyen Yükler	22
3.8.1. Ölü yük	22
3.8.2. Hareketli yük	23
3.8.3. Rüzgar yükü.....	23
3.8.4. Kar yükü	32
3.8.5. Deprem yükü	35
3.8.6. Sıcaklık değişimi etkisi.....	37
3.8.7. Yük kombinasyonları.....	37
3.8.8. Analiz ve elemanların boyutlandırılması.....	39
4. BULGULAR.....	41
5. TARTIŞMA	49
6. SONUÇLAR	52
7. KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbelerde Berkitme Elemanı 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.

16/07/2021

Gürhan YILMAZ

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

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
I	: Atalet momenti
I_v	: Türbülans şiddeti
K_l	: Elastik yapısal rijitlik matrisi
K_g	: Geometrik rijitlik matrisi
L	: Eleman boyu
P_{cr}	: Kritik burkulma yükü
Re	: Reynolds sayısı
SD	: Birikmiş (drifted) kar yükü
SU	: Birikmemiş (undrifted) kar yükü
W	: Rüzgar yükü
WEP	: Rüzgardışıyükü
WIP	: Rüzgar iç pozitif yükü
WIN	: Rüzgar iç negatif yükü
E_X	: X doğrultusunda deprem yükü
E_Y	: Y doğrultusunda deprem yükü
c_e	: Maruz kalma katsayısı
c_p	: Rüzgar basınç katsayısı
c_{season}	: Mevsim katsayısı

c_t	: Isı katsayısı
h	: Kubbe taban yüksekliği
f	: Kubbe yüksekliği (tabanından itibaren)
q_p	: Tepe hız kaynaklı rüzgar basıncı
r	: Atalet yarıçapı
s	: Çatı kar yükü (kN/m^2)
s_k	: Karakteristik zemin kar yükü (kN/m^2)
v_b	: Esas rüzgar hızı
$v_{b,0}$	: Esas rüzgar hızının temel değeri
v_m	: Ortalama rüzgar hızı
w_e	: Dış rüzgar basıncı
w_{ip}	: İç pozitif rüzgar basıncı
w_{in}	: İç negatif rüzgar basıncı
z_e	: Dış rüzgar için referans yükseklik
Δ	: Burkulmuş sistemin yer değiştirme vektörü
λ	: Burkulma katsayısı
μ	: Kar yükü şekil katsayısı
ρ	: Hava yoğunluğu (1.25 kg/m^3)
σ_{cr}	: Kritik burkulma gerilmesi
σ_y	: Akma gerilmesi

Bu tezde, ondalık ayıraç olarak nokta (.) kullanılmıştır.

Kısaltmalar

AISC : Amerikan Çelik Konstrüksiyon Enstitüsü (American Institute of Steel Construction)

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

AÜ : Akdeniz Üniversitesi

EN : Avrupa Standartları (European Norms)

kN : Kilonewton

m : Metre

mm : Milimetre

MPa : Megapascal

TBDY : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)

TS : Türk Standartları Enstitüsü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Önemli tarihi kubbeler: a) Pantheon, Roma; b) Les Invalides, Paris; c); d) Ayasofya, İstanbul.....	1
Şekil 1.2. St. Peter's Basilica, Vatikan.....	2
Şekil 1.3. Centennial Hall, Wrocław, Polonya.....	2
Şekil 1.4. Zeiss Gözlemevi, Almanya.....	3
Şekil 1.5. Harris County Spor Salonu, Teksas, ABD.....	3
Şekil 1.6. Superdome, New Orleans, ABD.....	3
Şekil 2.1. Tek katmanlı uzay kafes kubbe türleri: a) Nervürlü kubbe; b) Schwedler tipi kubbe; c) Üç doğrultuda çaprazlı kubbe; d); e) Lamella tipi kubbe; f) Jeodezik kubbe...	7
Şekil 2.2. a) Swindon Leisure Centre, İngiltere; b) Bell's Sport Centre, İskoçya.....	8
Şekil 2.3. Çiçek Pasajı, İstanbul.....	9
Şekil 2.4. Kuş kafesi, Bursa.....	9
Şekil 2.5. Panora AVM, Ankara.....	9
Şekil 2.6. Terzi Baba Camisi, Erzincan.....	10
Şekil 2.7. Nihat Zeybekçi Kongre ve Kültür Merkezi, Denizli.....	10
Şekil 2.8. Akçansa Klinker Deposu, Çanakkale.....	10
Şekil 2.9. Konya Bilim Merkezi Planetarium Binası, Konya.....	10
Şekil 3.1. Kubbede eksenel yük dağılımı.....	11
Şekil 3.2. Lineer ve nonlinear burkulma davranışı.....	13
Şekil 3.3. Kubbe veya tonoz yapıda asimetrik burkulma.....	14
Şekil 3.4. Tekil yüklemeler altında eleman burkulması.....	15
Şekil 3.5. Tekil yüklemeler altında düğüm noktası burkulması.....	16
Şekil 3.6. Tekil yüklemeler altında düğüm noktası ve eleman burkulması.....	16
Şekil 3.7. Model 1'e ait plan ve cephe görünüşleri.....	18
Şekil 3.8. Model 2'ye ait plan ve cephe görünüşleri.....	18
Şekil 3.9. Berkitme elemanlarının yerleşimi.....	20
Şekil 3.10. Çekme ve basınç altındaki 4 berkitmeli düğüm noktası.....	20
Şekil 3.11. Çekme altındaki 2 berkitmeli düğüm noktası.....	21
Şekil 3.12. Berkitme elemanlarının atalet momentlerinin büyütülmesi.....	22
Şekil 3.13. Dairesel çatılarda Reynolds katsayısı ile akış ilişkisi.....	24
Şekil 3.14. Arazi kategorileri ve arazi parametreleri.....	25
Şekil 3.15. Maruz kalma katsayısı ($c_e(z)$).....	26
Şekil 3.16. TS EN 1991-1-4'te tavsiye edilen $c_{pe,10}$ dış basınç katsayıları.....	27
Şekil 3.17. Rüzgar basıncı (w_e) dağılımı.....	28
Şekil 3.18. Yük aktaran kaplamaların numaralandırılması.....	29
Şekil 3.19. 20 numaralı alanın rüzgar basıncı w_e	30
Şekil 3.20. Pozitif iç rüzgar basıncının kubbeye etki ettirilmesi.....	32
Şekil 3.21. Negatif iç basıncının kubbeye etki ettirilmesi.....	32
Şekil 3.22. TS EN 1991-1-3'e göre silindirik çatılar için kar yükü şekil katsayısı (μ)...	33
Şekil 3.23. Kubbede birikmiş kar yükü şekil katsayısı dağılımı (Maten 2011).....	34

Şekil 3.24. Birikmemiş ve birikmiş kar yükü dağılımı.....	34
Şekil 3.25. Deprem ivme spektrumu.....	37
Şekil 4.1. Model 1 analiz sonucu seçilen kesitler	41
Şekil 4.2. Model 2 analiz sonucu seçilen kesitler	42
Şekil 4.3. Model 1 ve C3 için burkulma modu ($\lambda = 10.09$)	44
Şekil 4.4. Model 1 ve C6 için burkulma modu ($\lambda = 14.20$)	45
Şekil 4.5. Model 1 ve C12 için burkulma modu ($\lambda = 13.72$)	45
Şekil 4.6. Model 2 ve C3 için burkulma modu ($\lambda = 10.05$)	45
Şekil 4.7. Model 2 ve C12 için burkulma modu ($\lambda = 13.79$)	46
Şekil 4.8. Model 2 ve C15 için burkulma modu ($\lambda = 11.14$)	46
Şekil 4.9. Model 2 ve C23 için burkulma modu ($\lambda = 11.35$)	46
Şekil 4.10. Model 2 ve C27 için burkulma modu ($\lambda = 11.12$)	47
Şekil 4.11. Model 2 ve C31 için burkulma modu ($\lambda = 11.30$)	47



ÇİZELGELER DİZİNİ

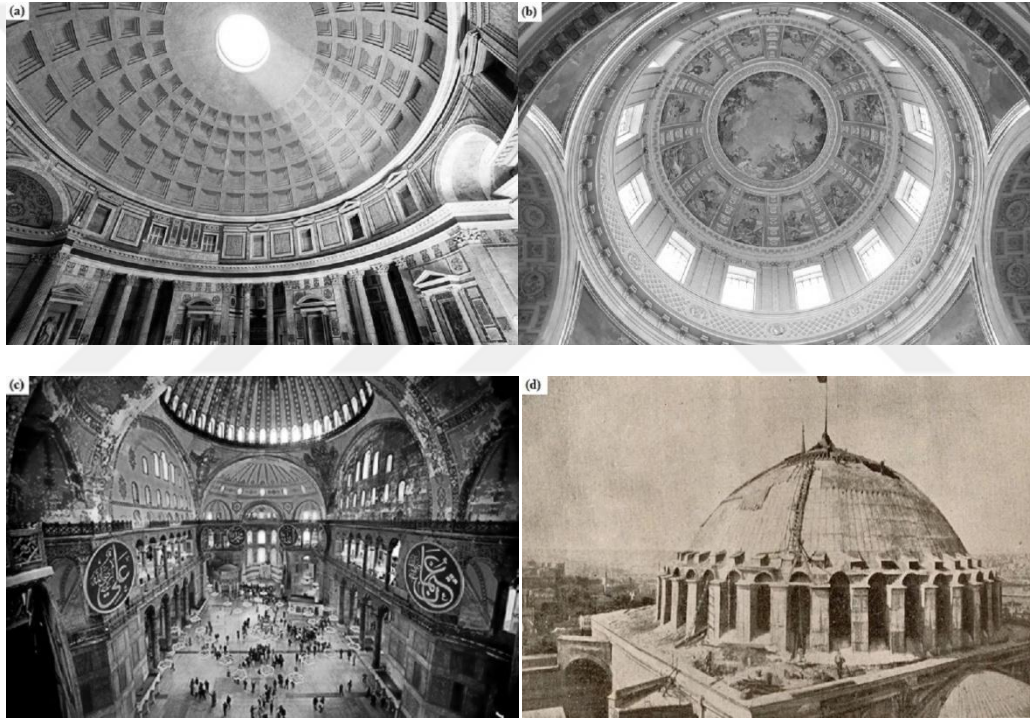
Çizelge 3.1. Modellerde kullanılan profil tipleri	19
Çizelge 3.2. Düğüm noktalarının koordinatları	19
Çizelge 3.3. A,B ve C noktalarındaki dış basınç katsayıları ve rüzgar basınçları	27
Çizelge 3.4. Tanımlanan alanların dış yüzeyine etkiyen rüzgar basınçları.....	31
Çizelge 3.5. Kubbenin iç basınç katsayıları ve rüzgar basınçları	31
Çizelge 3.6. Kısa periyod bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayıları.....	35
Çizelge 3.7. 1.0 saniye periyod için Yerel Zemin Etki Katsayıları	36
Çizelge 4.1. Boyutlandırma sonucu Model 1 kesitleri ve ağırlıkları	42
Çizelge 4.2. Boyutlandırma sonucu Model 2 kesitleri ve ağırlıkları	43
Çizelge 4.3. Doğrusallaştırılmış burkulma analizi sonucu kritik burkulma katsayıları..	44

1. GİRİŞ

Toplum ihtiyaçları göz önüne alındığında geniş açıklıklar her zaman mühendislik problemlerinden birisi olmuştur. Stadyumlar, etkinlik salonları, spor tesisleri, üretim tesisleri, alışveriş merkezleri gibi yapıların kullanım amaçları doğrultusunda geniş açıklıklar bugünün mühendislik ihtiyaçlarıdır.

Açıklık problemi bugün olduğu gibi tarihte de olmuştur. Geniş alanları hem ekonomik malzeme kullanımı, hem de geniş açıklıkların üzerini örtebilmesi sebebiyle kubbeler taşıyıcı sistemler arasında en eskiler arasındadır.

Kaynaklara göre ilk kubbe yapısı İtalya'daki Pantheon Tapınağı olmakla birlikte; Avrupa ve Rusya'da çok sayıda örneği bulunmaktadır. Ülkemizde de 537 yılında tamamlanan Ayasofya Kilisesi/Camisi tarihi kubbeler arasındadır.



Şekil 1.1. Önemli tarihi kubbeler: **a)** Pantheon, Roma; **b)** Les Invalides, Paris; **c); d)** Ayasofya, İstanbul

Yapılarda kullanılan malzemeler geliştikçe kubbeler de gelişmiştir. İlk örneklerde malzeme olarak taş kullanılırken, zamanla ahşap kubbelerle geçildiğini görüyoruz. Bu malzeme değişimi ile daha hafif bir kubbe oluşturuluyor, daha geniş bir alan örtülüyor ve imalat kolaylığı sağlanmıştır.



Şekil 1.2. St. Peter's Basilica, Vatikan

Zamanla daha fonksiyonlu hale gelen kubbeler, 18. yy.dan sonra büyük kapsamda yapılan her yapıda kubbelere yer verildi. Özellikle dini yapılarda ve devlet yapılarında örnekleri halen korunmaktadır.

Çeliğin yapısal malzeme olarak kullanılmaya başlanması sonrası kubbelerde kapatılan açıklık arttığı gibi, kubbenin kaplaması içerisine konularak da kaplamanın incelmelerini sağlamıştır. 19. yy.da İngiltere ve Fransa'da çelik konstrüksiyon kubbeler yapı biliminde örnek teşkil etmiştir.

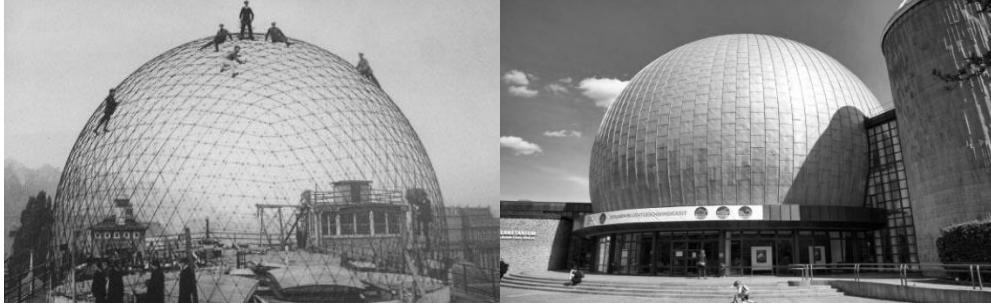
Betona çelik donatı eklenerek 20. yy.da betonarme kubbeler yapılmaya başlanmıştır. İlk ve hala en büyük olan nervürlü kubbe, 1912 yılında Polonya'da 65 metre çapında alanı örtecek şekilde yapılmıştır.



Şekil 1.3. Centennial Hall, Wrocław, Polonya

1922'de Dr. Walter Bauersfeld, Almanya'da 40 metre çapında alanı kapatacak olan, dünyanın ilk hafif çelik çerçeveli kubbesini tasarladı. İnşa edilen bu kubbe, 60 mm kabuk kalınlığı ile dünyanın en ince kabuk beton yapısına sahiptir. Ancak uygulama

zorluğu ve malzeme alanındaki gelişmeler, beton kabuk uygulamalarının devam etmemesine sebep olmuştur.



Şekil 1.4. Zeiss Gözlemevi, Almanya

Çeliğin işlenebilirliği ve uygulama kolaylığı sebebiyle sonraki süreçlerde kubbelerin çelik uzay kafes kubbe olarak tasarlanmıştır. Bu gelişme ile birlikte kapatılabilen açıklıklar çok daha büyümüştür. ABD'deki Harris County Spor Salonu 200 m çapında, Superdome Stadyumu da 213 m çapında bir alanı örten günümüzün mühendislik harikalarıdır.



Şekil 1.5. Harris County Spor Salonu, Teksas, ABD



Şekil 1.6. Superdome, New Orleans, ABD

Bu çalışmada, tek katmanlı uzay kafes kubbeler arasından rijit birleşimli nervürlü kubbelerin tasarımında, düşey ve yatay eleman birleşimlerinde kullanılan berkitmelerin taşıma kapasitesine etkisi incelenecektir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Literatür Taraması

S. Timoshenko ve W. Krieger (1959), "Theory of Plates and Shells" kitabında kubbelerde yük dağılımları ve deformasyonlar için çözümler ortaya koymuşlardır.

Benjamin (1959), Schwedler kubbelerin analizini irdemiş, rijitlik matrisi ile kabuk analojisini kıyaslamıştır. Çalışma sonucunda birleşimlerin rijitliğinin gerilmeleri etkilediği, asimetrik yüklemelerin deformasyonları artırdığı ortaya çıkmıştır.

S. Timoshenko (1961), "Theory of Elastic Stability" kitabında kabukların burkulma problemleri üzerine çalışılmış, teorik çözümler ortaya koyulmuştur. Kabukların, burkulma dışındaki mod şekilleri de incelenmiştir.

Kloppel ve Schardt (1962), tek katmanlı kubbeler üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalarda stabilite problemi ilk kez incelenmiştir.

Soare (1963), Romanya'da 1963'te asimetrik yük altında kalarak tersine dönerek burkulma 94 m çapındaki 19 metre yüksekliğindeki kubbenin göçmesini araştırılmıştır. Raporda, yapının üzerinde kar yükünün asimetrik birikmesi sonucu, kar biriken bölgede eleman birleşimlerinin gerilmeye dayanamaması ve bu gerilmelerin etrafa yayılması sonucunda kubbenin ters dönerek burkulduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, tek katmanlı kubbe tasarımcılarının yüklemeleri asimetrik olarak da hesaplamasını, bu yüklemeler altında birleşimlerin tasarlanmasını ve lokal/global burkulma kontrollerini yapmaları tavsiye edilmiştir.

Huang (1964), kabuklarda asimetrik yüklemeler sonucu oluşan burkulmalar incelenmiş, $\lambda > 5.5$ sağlandığında tersine dönerek burkulma sınır yükü, diğer burkulma modlarının sınır yüklerinden daha büyük olduğu ortaya konmuştur.

Nooshin (1975), uzay kafes yapıların tasarımını sağlayan Formex algoritmasını oluşturmuş ve programlamıştır.

Dragone (1979), kubbelere etkiyen rüzgar yükleri ve dağılımları incelenmiş, rüzgarın geldiği tarafta kubbede basınç kuvveti olduğu, rüzgarın gittiği tarafta kubbede emme kuvveti olduğu ortaya konmuştur.

Allen ve Bulson (1980), kubbelerde kapasite yüklerin azalmasının bir nedeninin eleman kusurları olduğunu ve tasarımcıların güvenli tarafta kalmalarını belirtmiştir.

Constantinou (1980), 3 tip (Schwedler, Lamella ve Grid sistemli) kubbenin hem mafsallı hem de rijit birleşimli durumlarını, asimetrik yükler altında, Kabuk Analojisi Yöntemi ve Rijitlik Matrisi Yöntemi ile çalışmalar yapmıştır. Schwedler tipi kubbede gerçeğe yakın sonuçlar bulmuş, Lamella ve Grid tipi kubbelerde kayda değer farklar olduğunu ortaya koymuştur.

Soare ve Raduica (1985), 4 tip kubbenin (Basit çaprazlı Schwedler, Çift çaprazlı Schwedler, Şaşırtmalı Schwedler, Nervürlü) çeşitli yüklemeler altında davranışını incelemiş ve en olumsuz yüklemenin yarım kar yüklemesi olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, nervürlü kubbenin Schwedler tipi kubbelerden daha dezavantajlı olduğunu, çaprazların yönünün öneminin olmadığını belirtmiştir.

Tzourmakliotou (1993), uzay kafes yapıların tasarım aşamasında kolaylık sağlayan, geometrinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan Formex algoritmasını kullanarak Formian yazılımını oluşturmuştur.

Saraç (2005), tek katmanlı uzay kafes kubbelerin kar ve rüzgar yüklemeleri altında optimum tasarımını yapmıştır. Çalışmada kubbeler için optimum yükseklik/açıklık oranının 0.20-0.25 aralığında olması gerektiği, bu aralık dışında farklı çözüm yollarının denenmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, rijit birleşim kullanılmadığı takdirde stabilite problemleri ile karşılaşmamak için geometrinin üçgenlere ayrılması gerektiği, yüklemelerde asimetrik yüklemelerin de dahil edilmesi gerektiği gösterilmiştir.

Hwang, Knippers ve Park (2009), ızgara tipi yapılarda bulonlu birleşimlerdeki delik özelliklerinin stabilite üzerindeki etkisi birleşimlerin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenerek incelenmiştir. Global burkulmanın temel sebeplerinin birleşimlerin rijitliği ve yükseklik/açıklık oranına bağlı olduğunu belirtilmiştir.

Çifçi (2009), 72 m çapındaki lamella tipi kubbe üzerinde nonlinear burkulma analizi yaparak geometri üzerindeki etkilerini gözlemlemiştir.

Gürses (2012), rüzgar yükleri kapsamında Eurocode 1-4 ve ASCE 7-05 standartlarını değerlendirmiş ve değerlerin çok yakın çıkmadığı durumlarda Eurocode 1-4 standardının daha büyük yükleme değerleri verdiğini ortaya koymuştur.

Hosseini, Hajnasrollah ve Herischian (2012), zati yük ve deprem yükü altında 3 tip (nervürlü, diametrik ve schwedler) kubbenin optimum geometrisini araştırılmıştır. Sabit 40 m açıklıkta farklı yükseklikler araştırılmış ve nervürlü kubbelerin sismik performansının daha iyi olduğu ortaya konmuştur.

Fiouz ve Karbaschi (2012), 2 tip (nervürlü ve schwedler) kubbenin ANSI ve ECCS standartlarına göre rüzgar yükü altındaki davranışları araştırılmıştır. Çalışmada rüzgar yüklerinin oluşturduğu deformasyonun kubbe yüksekliği ile ilişkisi ortaya konmuş, sabit açıklıkta yüksekliğin artmasının mesnetlerde oluşan kesme kuvvetini azalttığı belirtilmiştir.

Eldhose, Rajesh ve Ramadass (2015), rijit birleşimli, farklı yükseklik ve açıklıklarda schwedler tipi kubbeleri ele alarak analiz ve burkulma hesapları yapmıştır. Çalışmada yükseklik/açıklık oranının 0.25 ile 0.35 arası olmasının bütün kıstaslarda avantaj sağladığı belirtilmiştir.

Özcan (2018), tek katmanlı uzay kafes kubbelerde çapraz eleman kullanımının tasarıma etkisini araştırmak için rijit birleşimli nervürlü kubbe ile mafsallı birleşimli çapraz elemanla Schwedler tipi kubbeyi kıyaslamıştır.

2.2. Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbeler

2.2.1. Gelişimi ve tarihçesi

Geniş açıklıkların kubbeler ile örtülebilmesiyle birlikte tasarımcıların gelişen hayal gücü, çelik malzemesinin yapılarda kullanılacak biçimde işlenebilmesiyle daha da arttı. Bu gelişmeler, Avrupadaki tasarımcıları ve araştırmacıları Schwedler'in çalışmalarına yoğunlaştırdı. Schwedler'in çalışmalarından etkilenen Mohr, Scharowsky, Zimmerman, Ritter ve Henneberg gibi araştırmacılar da kubbelerin davranışları üzerine çalışmıştır.

19.yüzyılda geniş açıklıklı kubbeler, merkezinde kare veya sekizgen bir çekirdek yapısı ve bu çekirdeğe mesnetlenmiş kafes kirişler ile oluşturulmuştur.

İlerleyen süreçte daha geniş açıklıkların daha az yükseklikler ile örtülmesi için yapılan çalışmalar, mühendisleri nervürlü kubbeleri araştırmaya itti ve sonucunda bugünkü çerçeve sistem türleri ortaya çıktı.

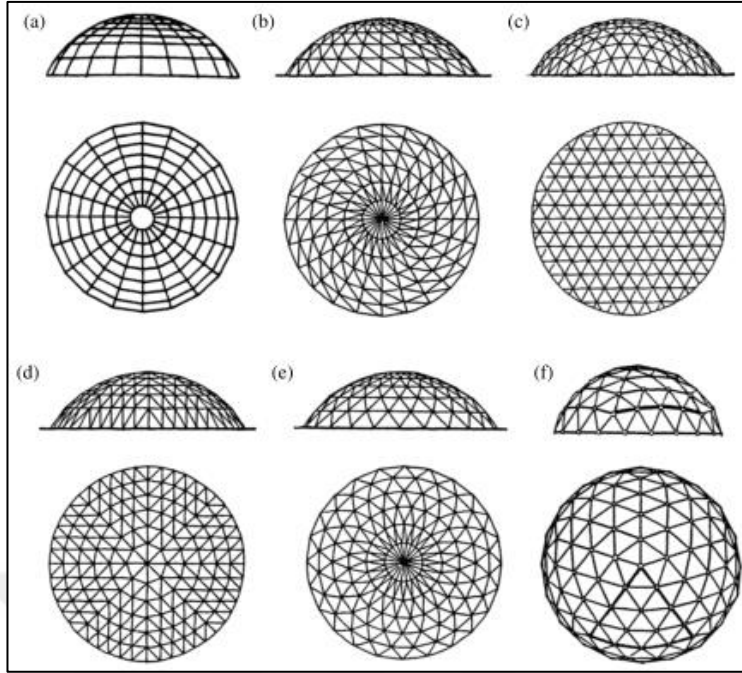
2.2.2. Kubbe çeşitleri

Çaprazlı kubbeler, üzerine gelen yükleri elemanlarına iletme ve taşıma konusunda 4 gruba ayrılmaktadır.

1. Tek katmanlı kubbeler (çerçeve ya da iskelet tipi)
2. Çift katmanlı ve kafes kiriş sistemli kubbeler
3. Asma-Germe Sistemler (yapı örtüsü yapı elemanlarına bağlı olduğu ve üzerine yük alan sistemler)
4. Yüzey Taşıyıcılı Sistemler (kaplama elemanının taşıyıcı eleman olarak tasarlanıp monte edildiği sistemler)

Kubbeler günümüz için küçük sayılabilecek açıklıkları örtmek için tasarlandığı için genelde tek katmanlı olarak tasarlanmaktadır ve açıklığı 100 m'ye varan örnekleri mevcuttur. 100 m'den büyük açıklıklar için eğilme rijitliği daha yüksek çift katmanlı kubbeler kullanılmaktadır.

Makowski (1985), kitabında tek katmanlı çerçeve tipi kubbeleri 5'e ayırmıştır:



Şekil 2.1. Tek katmanlı uzay kafes kubbe türleri: **a)** Nervürlü kubbe; **b)** Schwedler tipi kubbe; **c)** Üç doğrultuda çaprazlı kubbe; **d); e)** Lamella tipi kubbe; **f)** Jeodezik kubbe

2.2.2.1. Nervürlü kubbe

Nervürlü kubbeler, imalat ve montaj kolaylığı sağlaması sebebiyle eski tarihlerden beri tercih edilen kubbe tipi olmuştur. Tepede, basıncı dağıtan rijit bir halkada birleşen makaslar ile bu makaslar arasındaki rijit kirişler ile oluşan sistemdir (Şekil 2.1.a). Bütün örneklerine baktığımızda, genellikle yapısal çelik kullanılmış olmakla birlikte, ahşabın kullanıldığı örnekleri de mevcuttur.

Çelik kullanılan örnekler arasında Swindon Leisure Centre, 7 halka bulunmasına rağmen rijitleştirmek için temelden 4.halkaya kadar çapraz elemanlar koyulan 45 metre çapta ve 9 metre yükseklikte tasarlanmıştır (Şekil 2.2.a).

Ahşap kullanılan örneklerde ise Bell's Sport Center bulunmakta. 67 metre çapındaki alanı örten kubbe, 36 adet ahşap düşey eleman kullanılarak tasarlanmıştır (Şekil 2.2.b).



Şekil 2.2. a) Swindon Leisure Centre, İngiltere; **b)** Bell's Sport Centre, İskoçya

2.2.2.2. Schwedler tipi kubbe

Nervürlü kubbelerin asimetrik yükler karşısında güçlendirilmesi fikriyle Alman Mühendis J. W. Schwedler tarafından yapılan araştırmalar sonucu yatay ve düşey elemanlar arasında çapraz eleman kullanımı sonucu oluşan kubbe tipidir (Şekil 2.1.b). Ayrıca, yatay ve çapraz elemanların birleşiminin mafsallı olması statik olarak kolaylık sağlıyor, imalat ve montaj kolaylığı da sağlıyor.

2.2.2.3. Üç doğrultuda çaprazlı kubbe

Öncüsü Prof. Lederer olan kubbe tipi, baklava dilimi deseninde elemanların üç doğrultuda gruplandırılmasıdır (Şekil 2.1.c). Bu kubbe tipi tasarım karmaşıklığı sebebiyle fazla tercih edilmese de 94 metre açıklığı örten örneği oldukça ilgi görmektedir.

2.2.2.4. Lamella tipi kubbe

Baklava desenine benzeyen, eşkenar ya da ikizkenar üçgenlerden oluşan Lamella tipi Kubbeler, ilk olarak Alman Mimar Zollinger tarafından tasarlanmıştır (Şekil 2.1.d, e). Halkalar arası düzenli ve eş üçgenler oluşacak şekilde düzenlenen çapraz elemanlar asimetrik ve dengesiz yükler altında stabilite konusunda tasarımcının elini güçlendirmektedir.

2.2.2.5. Jeodezik kubbe

Küresel eşkenar üçgenlerin halkasız bir şekilde bir araya gelmesi üzerine çalışan Amerikan Tasarımcı Buckminster Fuller tarafından ortaya konan kubbe tipidir (Şekil 2.1.f). Eleman uzunlukları kısaldıkça eleman sayısı ve birleşim sayısı arttığı için kubbenin maliyeti artmaktadır; eleman uzunlukları uzadığında ise eleman kesitleri çok artmak zorunda kalabilmektedir. Bu sebeple, küçük açıklıkların örtülmesinde bu kubbe tipi avantajlı olabilirken, geniş açıklıklarda büyük maliyetler ortaya çıkabilmektedir.

2.2.3. Türkiye'den kubbe örnekleri

Türkiye'de Osmanlı Döneminde kubbe kullanımı yaygın olsa da bunlar küçük alanları örten taş, ahşap gibi o zamanların malzemeleri ile yapılmıştır. Çelik malzeme

ile yapılan uzay kafes kubbeler ise Avrupadaki gibi yaygın değildir, yapılanlar da son yıllarda yapılmıştır.



Şekil 2.3. Çiçek Pasajı, İstanbul



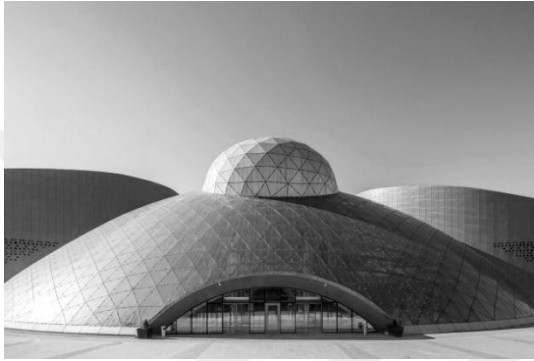
Şekil 2.4. Kuş kafesi, Bursa



Şekil 2.5. Panora AVM, Ankara



Şekil 2.6. Terzi Baba Camisi, Erzincan



Şekil 2.7. Nihat Zeybekçi Kongre ve Kültür Merkezi, Denizli



Şekil 2.8. Akçansa Klinker Deposu, Çanakkale

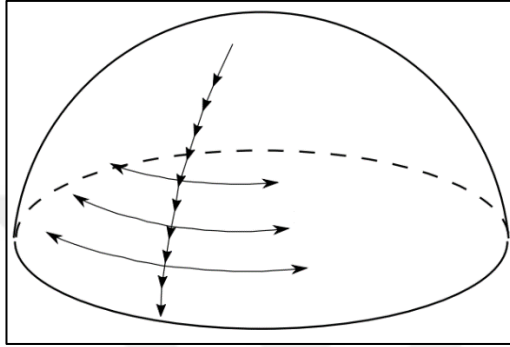


Şekil 2.9. Konya Bilim Merkezi Planetaryum Binası, Konya

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Kubbe Davranışı

Her yapı tipinin üzerine gelen yükler altında davranışları kendi özgü olduğu için, öncelikle kubbelerin mukavemetinin anlaşılması gerekmektedir. Kubbelerin modellenirken elemanların yerleştiriliş ve bağlantı şekilleri etkili olmakla birlikte, kabuk davranışı sebebiyle düşey elemanlar basınca çalışırken yatay elemanlar çekmeye çalışmaktadır.



Şekil 3.1. Kubbede eksenel yük dağılımı

Kubbeler modellenirken sadece yatay ve düşey elemanlarla değil, bu elemanlar arasında çapraz şekilde yerleştirilen elemanlarla ya da sadece çapraz elemanlarla da modellenebilir. Bu tarz kubbelerde yatay elemanlar olmaması durumunda yapı davranışında kararlılık sağlanması zorlaşıyor ve burkulma problemleri ortaya çıkıyor. Benzer şekilde çapraz eleman kullanılmaması ve birleşimlerin yeterli rijitlikte tasarlanmaması durumunda da burkulma problemleri ortaya çıkmaktadır.

Kubbe modellenmesinde yapı davranışının anlaşılabilmesi için yapının yaşayabileceği burkulma problemlerinin iyi anlaşılması ve üzerine gelen yüklerin stabiliteye etkisinin doğru tespit edilmesi çok önemlidir.

3.3. Tasarım Yükleri

Yapılar, kullanım yükleri ve kendi ağırlığı ile birlikte çevresel etkiler sebebiyle oluşan yükleri de taşıyacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu sebeple, modelleme yaparken yüklerin doğru tespit edilmesi ve model üzerine uygulanması çok önemlidir.

Bu çalışmada, yapının karşılaşılabileceği yükler tespit edilirken yapının Antalya'nın Korkuteli ilçesinde olacağı varsayılmıştır. Kar yükleri tespit edilirken TS EN 1991-1-3, deprem kuvveti tespit edilirken TBDY 2018, rüzgar yükleri tespit edilirken TS EN 1991-1-4 standartları ele alınmış ve EN standartlarına göre stabilitesi incelenmiştir.

3.4. Analiz

3.4.1. Giriş

Yapıların kullanım süresi içerisinde güvenle hizmet etmesi için en önemli faktör doğru yapı analizidir. Günümüzde yapılarda lineer (doğrusal) ve nonlinear (doğrusal olmayan) analiz yöntemleri kullanılmaktadır.

Basit yapılarda elemanların akma, kopma, burkulma ve yorulması ile birleşimlerin dayanımı lineer analizler ile tespit edilebilir ve bu yeterli görülebilir. Bu analizlerdeki denge denklemleri elemanın deforme olmamasını temel alır ve yapı üzerine tasarım yüklerinden daha az yük geleceği için elemanlar elastik bölgede kalırlar.

Ancak karmaşık geometrideki, stabilite kaybı ihtimali olan ve elemanların kalıcı deformasyonlara uğrayabileceği yapılarda nonlinear analiz yapılması gereklidir. Bir dizi lineer analiz çözümü ile yapılan bu analizlerde, her iterasyon bir önceki iterasyonun sonucu üzerine kurulur ve aranılan sonuca yakınsanır.

Tek katmanlı uzay kafes kubbelerde, geometrisi ve yükler altındaki davranışı sebebiyle burkulma tehlikesi altındadır. Bu deformasyonla birlikte, geometride değişiklikler meydana geleceği ve yüklerin doğrultularında değişiklikler oluşturacaktır. Ayrıca, malzeme özellikleri sebebiyle akma sınırı aşılsa plastik bölgeye geçilir ve elemanlarda kalıcı deformasyonlar meydana gelir. Tüm bu etkileri nedeniyle, ikinci mertebe etkilerinin hesaplamalara dahil edilerek nonlinear analiz yapılması gerekmektedir.

Nonlinear analizlerde, yapının tümünün davranışı incelenmelidir. Analiz esnasında elemanların plastikleşmesi ile yük dağılımlarının değişmesi gözlenir. Bu değişimleri gözlemlemek için, diğer analiz yöntemlerinden daha kesin hesap yapılmasını sağlayan, ikinci mertebe etkilerinin analizlerinden biri olan P-Delta yöntemi kullanılabilir.

Tek katmanlı uzay kafes kubbeler gibi karmaşık geometrilerdeki yapılarda nonlinear analizlerin yapılabilmesi büyük önem teşkil etmektedir ancak bu yapılarda bu analizlerin gerçekleştirilmesi oldukça zordur.

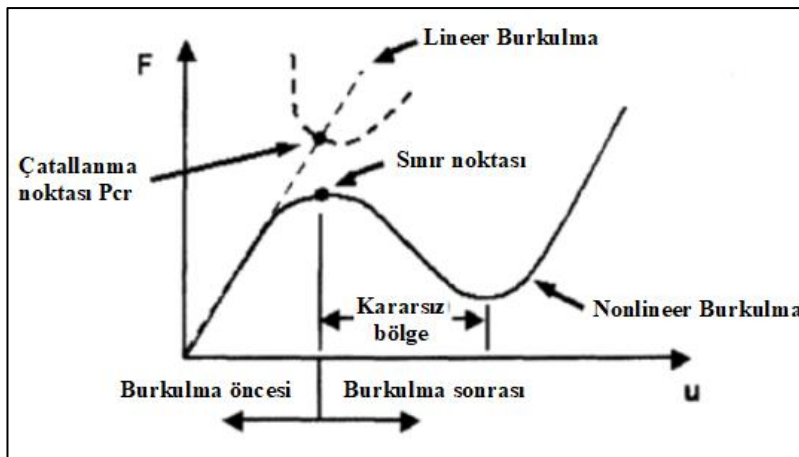
Yapılarda deformasyon olması durumunda, onarım ve kullanım durumları ön plana çıkmaktadır. Bazı yapıların, kullanım amacına yönelik olarak bina önem katsayısı değerleri yüksektir ve bu yapıların dayanımları daha yüksektir. Aynı zamanda, bazı yapılar da onarım maliyetleri sebebiyle daha yüksek dayanıma sahip olmalıdır. Tek katmanlı uzay kafes kubbelerde, oluşan deformasyonlar sonucunda yük dağılımlarının değişmesi ve yapının burkulma davranışının ön plana çıkması sebebiyle deformasyon yapının kullanılamaz ve onarılamaz hale gelmesine sebep olur.

Günümüz yönetmeliklerinde yapılan çalışmaların sonuçları ele alınmış ve tasarımcıların sadece lineer analiz ile tasarım yapabilmeleri için kısıtlamalar getirmişlerdir. Bunlara geometrik düzensizlik kısıtlamaları, hesap dayanımını azaltan güvenlik katsayıları, deplasman kısıtlamaları örnek olarak gösterilebilir. Ancak bazı yapılar, geometrisi ve özellikleri gereği büyük dikkat gerektirmektedir. Bu sebeple, tek katmanlı uzay kafes kubbelerin tasarımında hem deformasyon sonrası yapı davranışları hem de nonlinear analiz yöntemlerinin uygulanmasının güç olması sebebiyle burkulma parametrelerinin artırılması gerçekçi bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu şekilde daha rijit bir yapı ortaya çıkar, yapı daha az deforme olur ve geometrik nonlinearite göz ardı edilebilir.

3.4.2. Stabilité problemi

Tek katmanlı uzay kafes kubbelerde tasarım aşamasında kontrol edilmesi gereken en önemli kararsızlık burkulma tipleridir. Sistemin güvenliğinin sağlanmasında birleşimlerin önemi yüksektir, çünkü eleman burkulması dışında burkulma tiplerinin kubbelerde oluşmasının ana sebebi birleşimlerin göçmesidir.

Yapıların göçme güvenliği için elemanlarının taşıyabileceği yükün tespiti önemlidir. Bu elemanların kapasitelerinin tespiti için kritik burkulma yükünün bulunması gereklidir. Elemanın deforme olmadığı varsayılarak idealleştirilmiş lineer burkulma analizi (özdeğer analizi) ile teorik burkulma dayanımı hesaplanabilir. Elemanın deformasyonu da göz önüne alınarak nonlinear burkulma analizi ile daha gerçekçi bir sonuç elde edilebilir. Her iterasyonda artan yüklemeler ile burkulma sonrası hakkında da veri elde etmemizi sağlar. Bu sayede sadece burkulmaya kadar olan değil, burkulma sonrası dayanım da elde edilir.

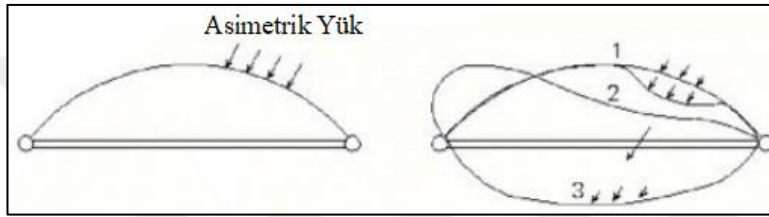


Şekil 3.2. Lineer ve nonlinear burkulma davranışı

Burkulma sonrası öncelikle gerçekleşen deformasyon ile birlikte rijitlik ciddi seviyede düşer, sonrasında ani bir şekilde büyük deformasyon gerçekleşir.

Yüksekliğin açıklığa oranının düşük olduğu tonoz ve kubbelerde, burkulma sonrası oluşan stabilite kaybına tersine dönerek burkulma (snap-through buckling) denir. Tersine dönerek burkulma, kabuk davranışı ile eksenel yük ile momentin birlikte yoğunlaştığı yerde kubbe eğriliğinin tersine dönmesiyle oluşmaktadır. Burkulmanın olduğu yerde, lokal olarak sarkma oluşur ve göçme gerçekleşir. Kabuk yapısının yük dağıtım mekanizması bozulur. Yapılan araştırmalar, yükseklik/açıklık oranının 0.20-0.25 arasında olmasının stabilite kaybı açısından ideal olduğunu göstermektedir.

Yüksekliğin açıklığa oranının düşük olduğu tonoz ve kubbelerde, burkulma sonrası nonlinear rijitlik kaybı ile burkulma gerçekleştiğinde ani bir göçme ile stabilite kaybı yaşanır. Kubbelerde, üzerindeki asimetrik yükler sebebiyle asimetrik dönme gerçekleşir ve bu burkulma mod şekline asimetrik burkulma denir.



Şekil 3.3. Kubbe veya tonoz yapıda asimetrik burkulma

Bu çalışma kapsamında, tek katmanlı uzay kafes kubbeler için kritik öneme sahip olan 3 burkulma çeşidi üzerine araştırma yapılmıştır:

3.4.2.1. Eleman burkulması

Yapı taşıyıcı sistemi içerisindeki her bir elemanın üzerine gelen yükler altında bireysel olarak değerlendirilmesidir. Günümüz yönetmeliklerinin, Leonhard EULER tarafından bulunan Euler Burkulma Teorisini baz alarak uyguladığı kısıtlamalar sayesinde bu tip burkulmanın olması engellenir. Bu burkulma tipinin en temel haliyle ele alındığı Euler Burkulma Teorisinde kritik yük hesaplanabilmesi için şu şartlar sağlanmalıdır:

1. Eleman lineerdir.
2. Yük ağırlık merkezinden uygulanır, eksantriklik yoktur.
3. Yük dik bir açı ile uygulanır.
4. Kolon uçları mafsallıdır.

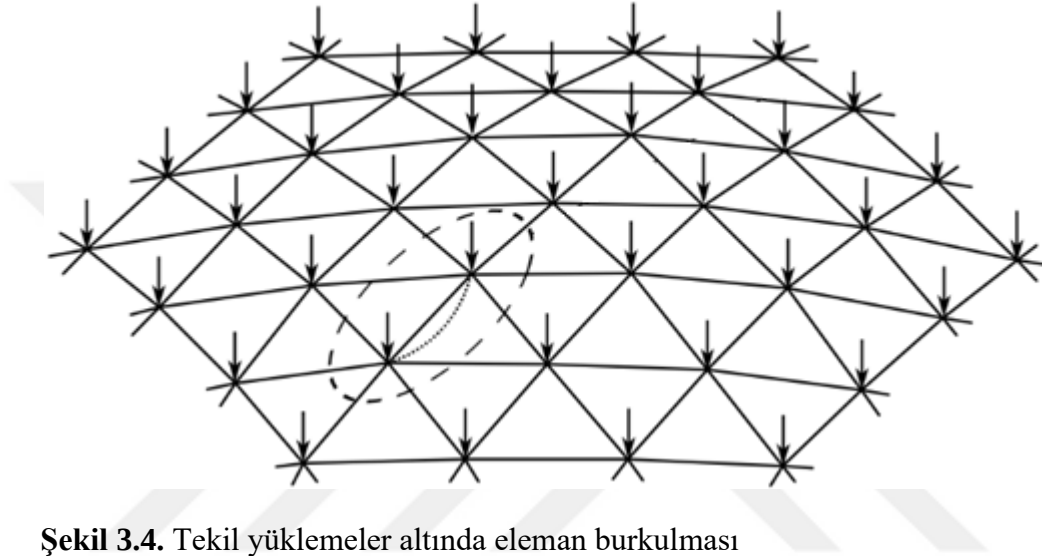
Bu şartlar sağlandığında Euler Burkulma teorisinde kritik burkulma yükü P_{cr} denklemi:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.1)$$

şeklindedir. Burada; E elastisite modülü, L etkili uzunluk, I atalet momentidir. Formül irdelenirse;

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (3.2)$$

halini alır. Burada K burkulma boyu katsayısı, r atalet yarıçapıdır.

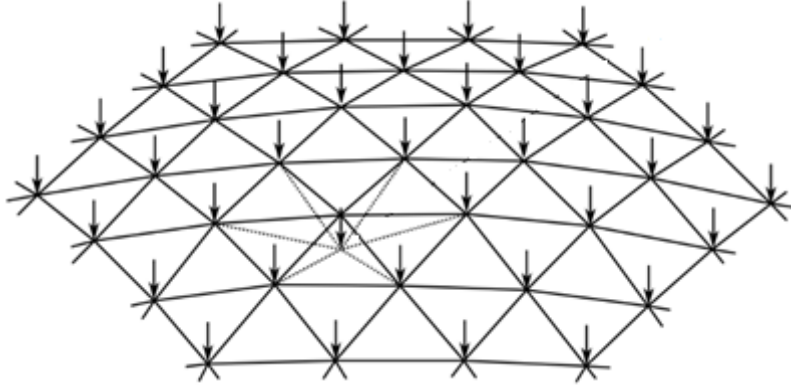


Şekil 3.4. Tekil yüklemeler altında eleman burkulması

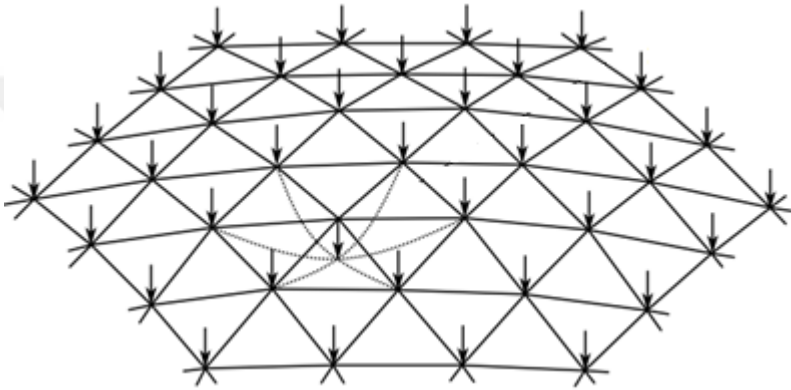
Bu çalışmada, elemanların yükler altındaki burkulma davranışlarının yönetmeliklerin kısıtlamalarına uygunluğu, çalışmada kullanılan SAP2000 programı ile kontrol edilecektir.

3.4.2.2. Yerel burkulma

Kabuk davranışı sebebiyle, düğüm noktalarının yetersiz kalarak tersine dönerek burkulması ya da asimetrik yüklemeler gibi sebeplerle, sadece sınırlı bir alanın etkilendiği burkulma tipidir. Taşıyıcı elemanların üzerindeki yüklerin, kritik burkulma yükünü aşması ya da düğüm noktalarının yetersiz kalması sebebiyle yerel burkulma gerçekleşir.



Şekil 3.5. Tekil yüklemeler altında düğüm noktası burkulması



Şekil 3.6. Tekil yüklemeler altında düğüm noktası ve eleman burkulması

Çaprazlı kubbelerde taşıyıcı sistem üzerine asılı yükler ölü tekil yük olarak tasarımda göz önüne alınmalıdır. Tek katmanlı uzay kafes kubbeler, tekil yüklerin taşınması konusunda zayıftır ve her yükleme kombinasyonunda beklenmedik sonuçlar verebilirler. Bu sebeple, her yük kombinasyonu altında, her tekil yük uygulanan nokta dikkatle incelenmelidir çünkü bu tekil yüklerin oluşturacağı stabilite kayıpları tersine dönerek burkulma açısından çok önemlidir (Walker 1984).

3.4.2.3. Global burkulma

Tek katmanlı uzay kafes kubbelerde, çift katmanlılara göre çok daha kolay bir şekilde gerçekleşebilen global burkulma hadisesinin tahkiki, ilgili özdeğer probleminin çözümü ile yapılır.

$$0 = ([K]_l - \lambda[K]_g) \{\Delta\} \quad (3.5)$$

Burada, $[K]_l$ yapının elastik rijitlik matrisi, $[K]_g$ geometrik rijitlik matrisi, $\{\Delta\}$ yer değiştirme vektörü ve λ burkulma katsayısıdır. Global burkulmanın oluşması için yapıya etkiyen yüklerin λ katının etki etmesi gerekir. Bu sebeple λ , güvenlik faktörü ya da güvenlik katsayısı olarak görülebilir. λ , 1'den küçükse, yapıda mevcut yükler altında global burkulma gerçekleşecektir, ancak 1'den büyükse mevcut yükler altında burkulma

gerçekleşmeyecektir. Örneğin, λ 'nın 2 olduğu bir yük kombinasyonu için, yapıda yüklerin 2 katı uygulanırsa global burkulma gerçekleşecektir.

Yapı üzerindeki yüklerle her zaman burkulma davranışı göstermeyebilir. Bu gibi durumlarda, λ negatif bir değer alır.

Bu çalışmada, global burkulma analizi SAP2000 programı ile yapılacaktır.

3.4.3. Çalışmada kullanılan analiz programı

SAP2000 (Structural Analysis Program), Amerikan CSI (Computers & Structures Inc.) tarafından çıkarılan tasarım ve analiz programıdır. SAP2000, çok basit bir geometriden çok kompleks bir geometriye kadar modelleme, analiz ve optimizasyon imkanı tanırken tasarım süreçlerini hızlandırır.

SAP2000 ile statik ve dinamik, lineer ve nonlinear rahatlıkla yapılabilir. Her türlü malzeme girişi yapılabilir, sonlu elemanlar yöntemini kullanması sayesinde pek çok analiz çıktısı alınabilir. Küresel bütün şartnamelerin tanımlı olması işlevselliğini yükseltmektedir.

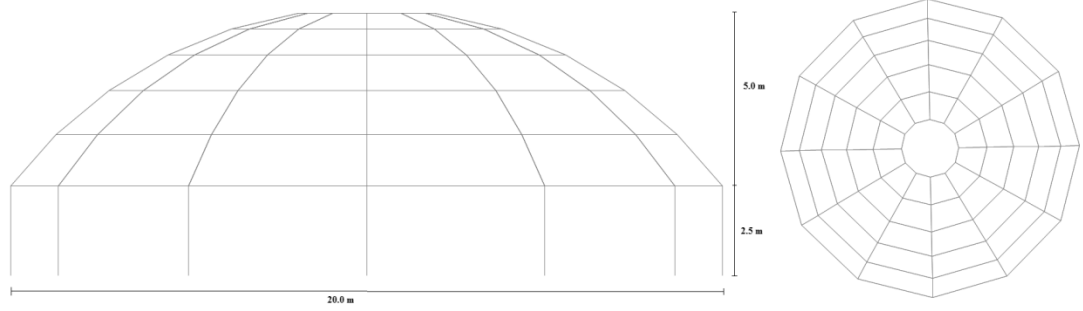
3.5. Çalışma hakkında bilgiler

Bu çalışmada, Antalya'nın Korkuteli ilçesinde inşa edilecek tek katmanlı uzay kafes kubbeye sahip bir yapının stabilite araştırması yapılmıştır. Tek katmanlı uzay kafes kubbeler, yapı düzlemindeki kayma rijitliğinin asimetric yükler altında bazı bölgelerde yetersiz kalması sonucunda kubbelerde önemli olan stabilite problemlerini doğurur. Bu sebeple, kubbelerde daha stabil, daha büyük yük dayanımına sahip olmak için yapı düzleminde kayma rijitliği artırılmalıdır. Bunun da en eski ve en yaygın yöntemlerinden birisi diyagonal eleman kullanımıdır ve farklı bir kubbe tipi olarak (Schwedler tipi kubbe) literatüre girmiştir. Bu çalışmada ise yapı düzleminde kayma rijitliğini artırmak için berkitme elemanları kullanılacaktır. Kıyaslama yapmak için hazırlanan 2 modelden ilki, en yaygın kullanılan kubbe türü olan rijit birleşimli nervürlü kubbe olarak, ikincisi paralel elemanları mafsallı birleşime sahip berkitme elemanları ile desteklenmiş kubbe olarak modellenmiştir. Bu 2 modelin stabilite kriteri sabit tutularak yük tanımlaması, analiz, boyutlandırma ve stabilite tahkiki yapılmıştır. Sonuç olarak, güvenli burkulma katsayısı sağlanarak tek katmanlı uzay kafes kubbede berkitme kullanımının yapı ağırlığı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

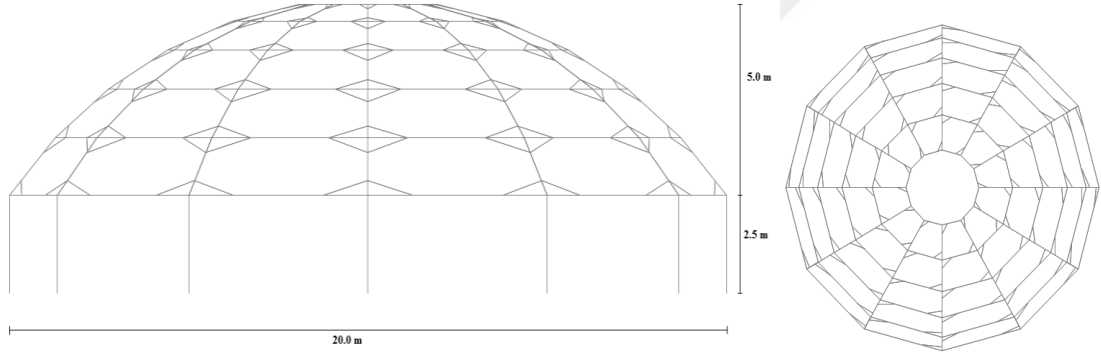
Çalışma içerisinde, tek katmanlı uzay kafes çelik kubbe üzerine uygulanacak yüklerin tespiti için EN temelli Türk Standartları kullanılmıştır. Ülkemizde kullanılan Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik içeriğinin stabilite konusunda yetersiz kalması sonucunda, EN esaslarına dayanarak çalışılmıştır.

3.6. Modellemeler

Çalışmada üzerine araştırma yapılacak, kabuk davranışına sahip tek katmanlı uzay kafes kubbeler için plan ve cephe görünüşleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.7. Model 1'e ait plan ve cephe görünüşleri



Şekil 3.8. Model 2'ye ait plan ve cephe görünüşleri

Modellenen kubbeler, 20 m çapında ve 5 m yüksekliğindedirler ve 2.5 m yüksekliğinde rijit kolonlar üzerine rijit birleşimlerle mesnetlenmiş oldukları varsayılmıştır, bu sebeple çelik kubbe ankastre mesnetlerle mesnetlenmiştir. Kubbelerin tepesindeki basınç halkası 3.85 m çapındadır. Kubbeler toplam 12 meridyen ve 6 paralelden oluşmaktadır.

Modellerde kullanılacak malzeme, S275 çeliği olarak seçilmiştir. Malzeme özellikleri aşağıdaki gibidir:

$$E \text{ (Elastisite modülü)} = 210000 \text{ MPa}$$

$$F_y \text{ (Karakteristik akma dayanımı)} = 275 \text{ MPa}$$

$$F_u \text{ (Karakteristik kopma dayanımı)} = 430 \text{ MPa}$$

$$F_{ye} \text{ (Hesap akma dayanımı)} = 302 \text{ MPa}$$

$$F_{ue} \text{ (Hesap kopma dayanımı)} = 473 \text{ MPa}$$

Elemanlar için seçilen profil tipleri aşağıdaki gibidir:

Çizelge 3.1. Modellerde kullanılan profil tipleri

MODEL 1			MODEL 2		
Eleman	Profil tipi	Birleşim	Eleman	Profil tipi	Birleşim
Meridyen	IPE	Rijit	Meridyen	IPE	Rijit
Paralel	2L	Rijit	Paralel	2L	Mafsallı
			Berkitme	Plaka	Mafsallı
* Basınç halkasındaki paralel elemanlar rijit birleşime sahiptir.					

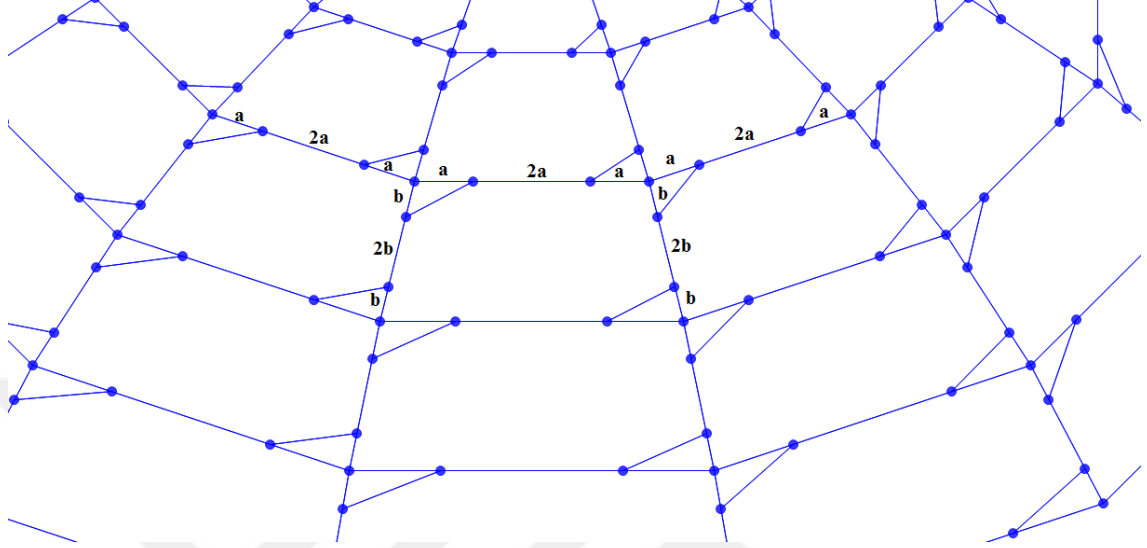
3.7. Modellerin Oluşturulması

Küresel yapı formunun oluşması için yapılan hesaplamalar ile elde edilen düğüm noktaları koordinatları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Düğüm noktalarının koordinatları

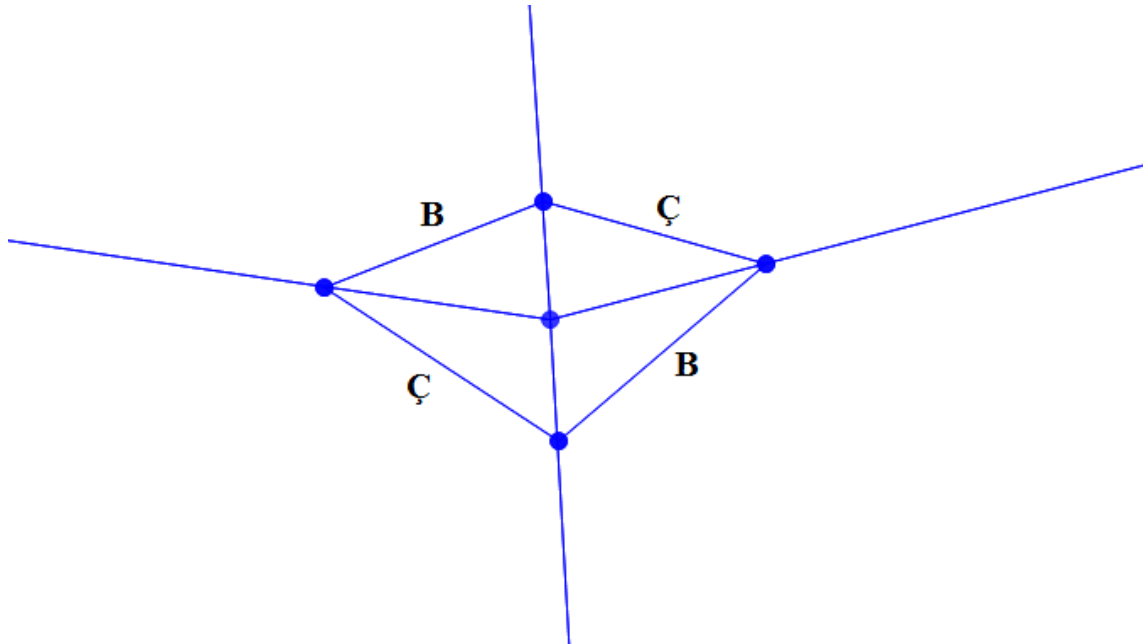
Halka	X (m)	Y (m)	Z (m)	Halka	X (m)	Y (m)	Z (m)	Halka	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0.000	10.000	2.500	3	2.755	10.000	5.187	5	6.198	10.000	6.908
1	20.000	10.000	2.500	3	17.245	10.000	5.187	5	13.803	10.000	6.908
1	1.340	5.000	2.500	3	3.726	6.378	5.187	5	6.707	8.099	6.908
1	18.660	15.000	2.500	3	16.274	13.622	5.187	5	13.293	11.901	6.908
1	5.000	1.340	2.500	3	6.378	3.726	5.187	5	8.099	6.707	6.908
1	15.000	18.660	2.500	3	13.622	16.274	5.187	5	11.901	13.293	6.908
1	10.000	0.000	2.500	3	10.000	2.755	5.187	5	10.000	6.198	6.908
1	10.000	20.000	2.500	3	10.000	17.245	5.187	5	10.000	13.803	6.908
1	15.000	1.340	2.500	3	13.622	3.726	5.187	5	11.901	6.707	6.908
1	5.000	18.660	2.500	3	6.378	16.274	5.187	5	8.099	13.293	6.908
1	18.660	5.000	2.500	3	16.274	6.378	5.187	5	13.293	8.099	6.908
1	1.340	15.000	2.500	3	3.726	13.622	5.187	5	6.707	11.901	6.908
2	1.274	10.000	3.950	4	4.410	10.000	6.180	6	8.076	10.000	7.351
2	18.726	10.000	3.950	4	15.590	10.000	6.180	6	11.924	10.000	7.351
2	2.443	5.637	3.950	4	5.159	7.205	6.180	6	8.334	9.038	7.351
2	17.557	14.363	3.950	4	14.841	12.795	6.180	6	11.666	10.962	7.351
2	5.637	2.443	3.950	4	7.205	5.159	6.180	6	9.038	8.334	7.351
2	14.363	17.557	3.950	4	12.795	14.841	6.180	6	10.962	11.666	7.351
2	10.000	1.274	3.950	4	10.000	4.410	6.180	6	10.000	8.076	7.351
2	10.000	18.726	3.950	4	10.000	15.590	6.180	6	10.000	11.924	7.351
2	14.363	2.443	3.950	4	12.795	5.159	6.180	6	10.962	8.334	7.351
2	5.637	17.557	3.950	4	7.205	14.841	6.180	6	9.038	11.666	7.351
2	17.557	5.637	3.950	4	14.841	7.205	6.180	6	11.666	9.038	7.351
2	2.443	14.363	3.950	4	5.159	12.795	6.180	6	8.334	10.962	7.351

Bu düğüm noktaları SAP2000 programına tanımlanarak Model 1 oluşturulmuştur. Paralel ve meridyen elemanların, boylarının 0.25'i mesafelerden düğüm noktaları tanımlanmış ve bu düğüm noktaları arası berkitme elemanları koyularak Model 2 oluşturulmuştur.



Şekil 3.9. Berkitme elemanlarının yerleşimi

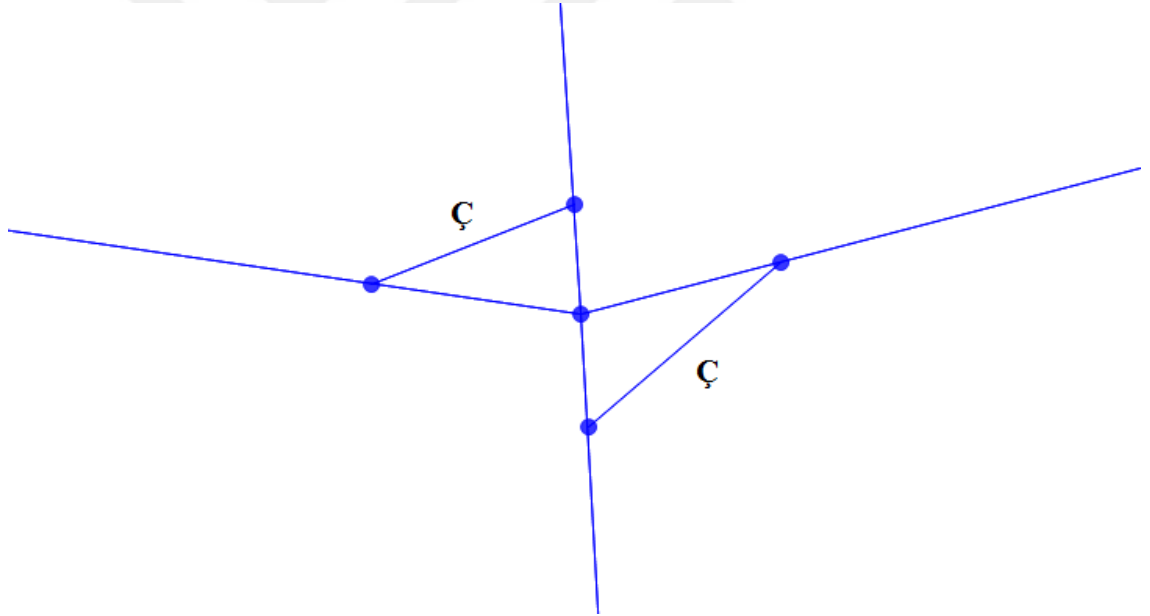
Yapılarda berkitme elemanları hem basınca hem de çekmeye çalışabilirler, ancak bunun öngörülmesi zor olduğu için tasarımcılar Şekil 3.9'daki gibi berkitme yerleşiminde bulunurlar. Çelik malzemesinin basınç altında burkulma davranışı göz önünde bulundurulduğunda, yükler altında rijitliği sağlayan elemanların çekme etkisi altındaki elemanlar olduğu bilinmektedir.



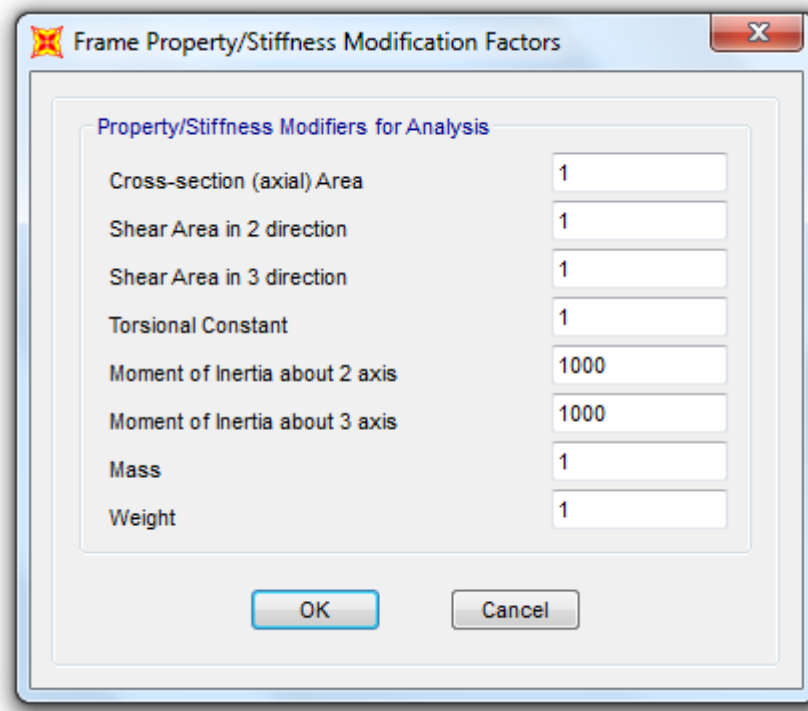
Şekil 3.10. Çekme ve basınç altındaki 4 berkitmeli düğüm noktası

Bu çalışmada, berkitme elemanlarının atalet momentleri basınç altında yetersiz olacağı için Şekil 3.10'da gösterildiği gibi çekme etkisi altında olan karşılıklı berkitme elemanları kullanılmıştır.

Benzer amaçla, 4 berkitmeli bir model ya da diyagonal elemanlar ile desteklenmiş (Schwedler tipi kubbe) bir model de oluşturulabilirdi. Ancak; diyagonal elemanların boyları sebebiyle burkulma dayanımları düşük olacaktır, bu sebeple eleman kesitleri büyük olacak ve ekonomiklikten uzaklaşılacaktır. Düğüm civarında 4 berkitme olması durumunda ise berkitme elemanlarının 2 tanesi çekmeye çalışacak ve yükün büyük bir bölümünü karşılayacaktır. Gerçek yapıda düğümler civarında 4 berkitme vardır ama sadece çekmeye çalışan karşılıklı 2 tanesi yapı rijitliğine katkıda bulunmakta olduğundan modelde rijitliğe katkısı olmadığı varsayılan karşılıklı 2 berkitme elemanı Şekil 3.11'de gösterildiği gibi ihmal edilmiştir. Bu durumda modelde bulunan berkitmelerin, burkulma sırasında basınç altında olsalar bile, burkulmamaları için atalet momentlerinin sonsuz büyük değer alması gerekir. Bu sebeple, berkitme elemanlarının kesit özellikleri tanımlanırken Şekil 3.12'de gösterildiği şekilde atalet momentleri 1000 kat büyütülmüştür.



Şekil 3.11. Çekme altındaki 2 berkitmeli düğüm noktası



Şekil 3.12. Berkitme elemanlarının atalet momentlerinin büyütülmesi

Model 1'de tüm elemanlar birbirine rijit bağlantılarla modellenmiştir. Model 2'de ise paralel elemanlar (basınç halkası dışındaki) ve berkitme elemanları mafsallı bağlantılarla modellenmiştir. Basınç halkasındaki elemanlar her iki modelde de rijit bağlantılarla modellenmiştir.

Çalışmada her 2 modelde de meridyen elemanlarında IPE profiller, paralel elemanlarda ise çift korniyer (2L) profiller kullanılmıştır. Model 2'de berkitme elemanları olarak 8x40 mm kesitlerinde plaka kullanılmıştır.

Her iki modelde de, ardışık paralel ve meridyenler arasında dörtgen alanlara taşıyıcı elemanlara yük aktarması için ağırlık ve mukavemeti olmayan, rijitliği ihmal edilebilecek kadar küçük kaplamalar modellenmiştir. Bu kaplamalar, üzerine gelen yükü hem paralel hem de meridyen elemanlara aktaracak ancak berkitmelere aktarmayacak şekilde modellenmiştir.

3.8. Yapıya Etkiyen Yükler

3.8.1. Ölü yük

Yapılarda, sürekli olarak etki eden yükler (taşıyıcı sistemin zati ağırlığı, döşeme ve kaplama ağırlıkları, aydınlatma sistemi, tesisat ağırlıkları vb.) ölü yük olarak adlandırılır. Bu çalışmada, elemanların kendi ağırlığı SAP2000 programı içerisinde otomatik olarak etki ettirilmiştir. Kubbenin üzerine örtülecek alüminyum sandviç panel de 0.25 kN/m^2 olarak etki ettirilmiştir.

3.8.2. Hareketli yük

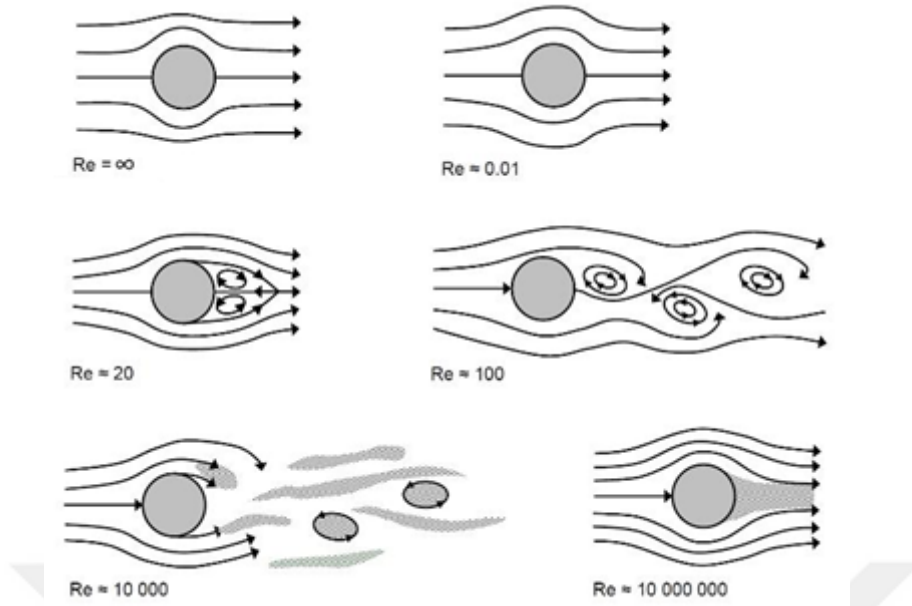
Yapılarda, kullanım süresi boyunca uzun süreli kalmayacak olan yüklere hareketli yük denir. Kubbeler, çok düşük ihtimaller dışında hareketli yük altında kalmamaktadır. Eski tarihlerde, kubbe dış yüzeyinde ve iç yüzeyinde temizlik ve bakım gibi amaçlarla bu yük uygulanabilirken; günümüzde bu işler için hareketli hidrolik liftler ve vinçler ile yapılabildiği için bu çalışmada hareketli yük uygulanmamıştır.

3.8.3. Rüzgar yükü

Yüksek yapılar, liman yapıları, düşük eğimli çelik konstrüksiyon yapılar yüksek gerilim hattı direkleri, çift eğrilikli uzay kafes kubbeler ve tonoz yapıları gibi yapılarda rüzgar yükü yapıların stabilitesi üzerinde çok ciddi etkiler yaratabilmektedir. Bu sebeple, bu yapılarda rüzgar yüklemeleri için çok dikkat edilmelidir. Günümüz teknolojisinde, rüzgar tüneli testleri ile deneysel çalışmalar yapılabilmektedir ancak maliyeti sebebiyle sadece çok büyük ölçekli projelerde bu yol tercih edilmektedir.

Yapılarda çok ciddi etkileri olan rüzgar yüklerinin tek katmanlı uzay kafes kubbeler üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir çok çalışma gerçekleşmiş, bu çalışmalar sonucunda kubbelerin davranışları ve yük dağılımları tahmin edilebilecek düzeye gelmiştir. Ancak, büyük açıklıkların örtülmesinde mutlaka rüzgar tüneli testlerine başvurulmalıdır çünkü rüzgar yüklerinin oluşturabileceği asimetrik yük dağılımlarının tahmin edilmesi oldukça zordur.

Rüzgar kuvvetlerinin rüzgar tüneli testi gerektirmesinin en önemli sebebi, rüzgarın oluşturacağı türbülansın belirlenmesinin zorluğudur. Türbülans oluşan akımda, görece daha büyük basınç katsayı (C_p) değerleri oluşmaktadır. Kubbelerde, açıklık-yükseklik oranının artması basınç katsayısı değerlerini yükseltmektedir; emme kuvvetlerinin azalması ise Reynolds değerini artırır. Sonuç olarak, rüzgar kuvvetlerinin oluşturduğu yüzey basınçları birçok etkene bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3.13. Dairesel çatılarda Reynolds katsayısı ile akış ilişkisi

Rüzgar kuvvetleri, tek katmanlı uzay kafes kubbelerde asimetric ve tersinebilir etki yaratması sebebiyle büyük bir önem teşkil eder. Geçmişte yapılan çalışmaları baz alan günümüz yönetmelikleri, rüzgar kuvvetleri için belirli kısıtlamalar ile yaklaşık basınç katsayılarının hesaplanmasını sağlar. Bu basınç katsayıları ile yapı üzerine rüzgar kuvvetleri etki ettirilebilmektedir.

Rüzgar kuvvetlerinin hesaplanmasında ülkemizde TS EN 1991-1-4 kullanılmaktadır. Bu yönetmelikte, rüzgar yükünün hesaplanmasında çeşitli parametreler vardır. Aşağıda, bu çalışmada modellere uygulanacak rüzgar yükleri hesaplanırken bu parametreler kullanılmıştır.

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

Esas rüzgar hızı v_b , TS EN 1991-1-4'e göre yılın herhangi bir gününde, herhangi bir yönde, açık alanda, yer seviyesinden 10 metre yükseklikte karakteristik 10 dakikalık esas rüzgar hızının temel değeri $v_{b,0}$ ile hesaplanır.

Doğrultu katsayısı c_{dir} , TS EN 1991-1-4 Bölüm 4.2'de bulunan Not 2 uyarınca 1.00 alınmıştır.

Mevsim katsayısı c_{season} , TS EN 1991-1-4 Bölüm 4.2'de bulunan Not 3 uyarınca 1.00 alınmıştır.

Esas rüzgar hızı temel değeri $v_{b,0}$, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları uyarınca 28 m/sn (100 km/sa) alınmıştır.

Tepe hız kaynaklı rüzgar basıncının hesaplanacağı, farklı parametreler içeren denklem, TS EN 1991-1-4 Bölüm 4.5'te tanımlanmış ve şu şekildedir:

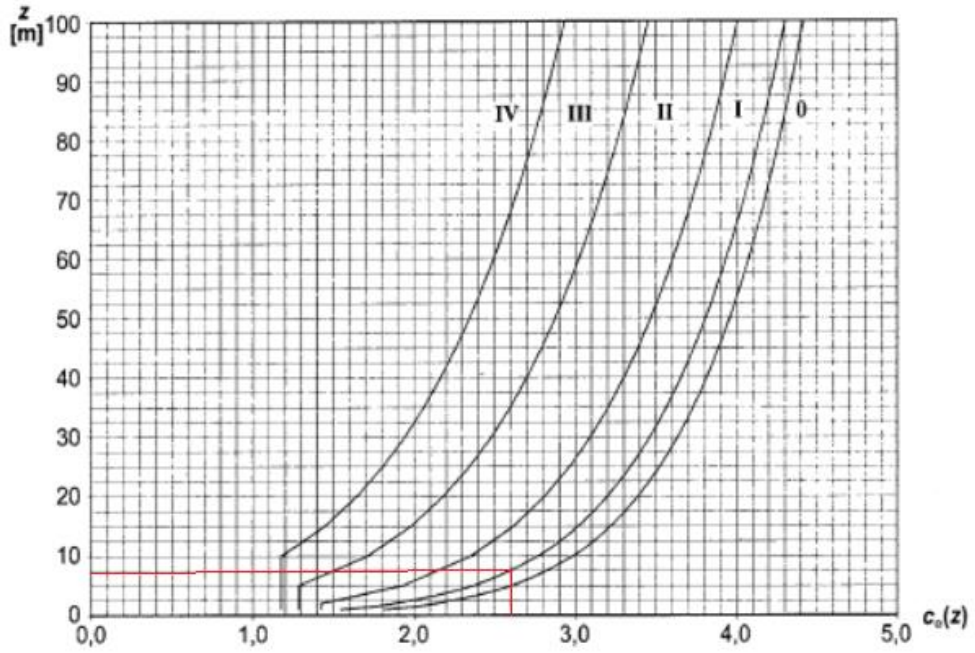
$$q_p(z) = \left[1 + 7 \cdot I_v(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \right] = c_e(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (4.2)$$

Hava yoğunluğu ρ , TS EN 1991-1-4 Bölüm 4.5 Not 2 uyarınca 1.25 kg/m^3 olarak alınmıştır.

Maruz kalma katsayısı $c_e(z)$, Şekil 3.15 ile bulunur. Burada kullanılan parametrelerden parabolik değer, TS EN 1991-1-4 Çizelge 4.1'e göre, yapının yapılacağı yerin I numaralı kategoride (yapı etrafında ihmal edilebilecek düzeyde bitki örtüsü olan ve engebeli olmayan düz ve yatay alan) olmasına göre seçilir (Şekil 3.14). Diğer parametre (z) ise, yapının toplam yüksekliğidir. Bu çalışmada, 2.5 m perdeler üzerine mesnetlenen 5 m yüksekliğinde kubbe analiz edildiği için yapı yüksekliği 7,5 m alınmıştır.

Arazi kategorisi	z_0 m	z_{en} küçük m
0 Açık deniz etkisine maruz deniz veya kıyı alanı	0,003	1
I Göller veya ihmal edilebilecek seviyede bitki örtüsü olan ve engebeli olmayan düz ve yatay alan	0,01	1
II Çayır gibi az seviyede bitki örtüsü olan ve aralarında en az engel yüksekliğinin 20 katı kadar mesafe bulunan engellere (ağaçlar, binalar) sahip alan	0,05	2
III Düzgün yayılı şekilde bir bitki örtüsüne veya binalara veya aralarında en az engel yüksekliğinin 20 katı kadar mesafe bulunan engellere sahip alan (kasabalar, yörekent, ormanlık alan gibi)	0,3	5
IV Yüzeyinin en az % 15'i, yükseklik ortalaması 15 m'yi aşan binalarla kaplı alan	1,0	10
Not: Arazi kategorileri Madde A.1'de şekiller ile gösterilmiştir.		

Şekil 3.14. Arazi kategorileri ve arazi parametreleri



Şekil 3.15. Maruz kalma katsayısı ($c_e(z)$)

Şekil 3.15'de de görüldüğü gibi, maruz kalma katsayısı $c_e(z)=2.6$ olarak tespit edilmiştir.

Tepe hızı kaynaklı rüzgar basıncı;

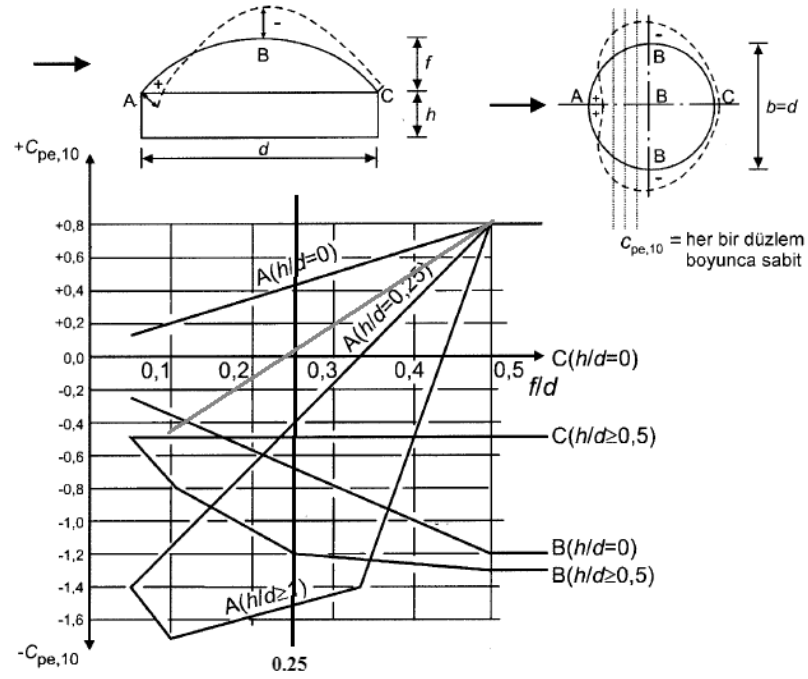
$$q_p(z) = c_e(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 2.6 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot 28^2 = 1274 \text{ kg/ms}^2 = 1.274 \text{ kN/m}^2$$

olarak hesaplanır. Bu yüzey yükünün, yapının geometrisi sebebiyle oluşan basınç katsayıları, c_{pe} ile çarpılması ile yapıya etki ettirilecek rüzgar basıncı, w_e değeri bulunur. Yapıya etkiyen rüzgar basıncı, w_e değeri,

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (4.3)$$

formülü ile hesaplanır.

Kubbelerde dış basınç katsayısı c_{pe} , TS EN 1991-1-4 Bölüm 7.2.8'e göre belirlenir. Burada, dış basınç katsayıları Şekil 3.16 ile hesaplanır.

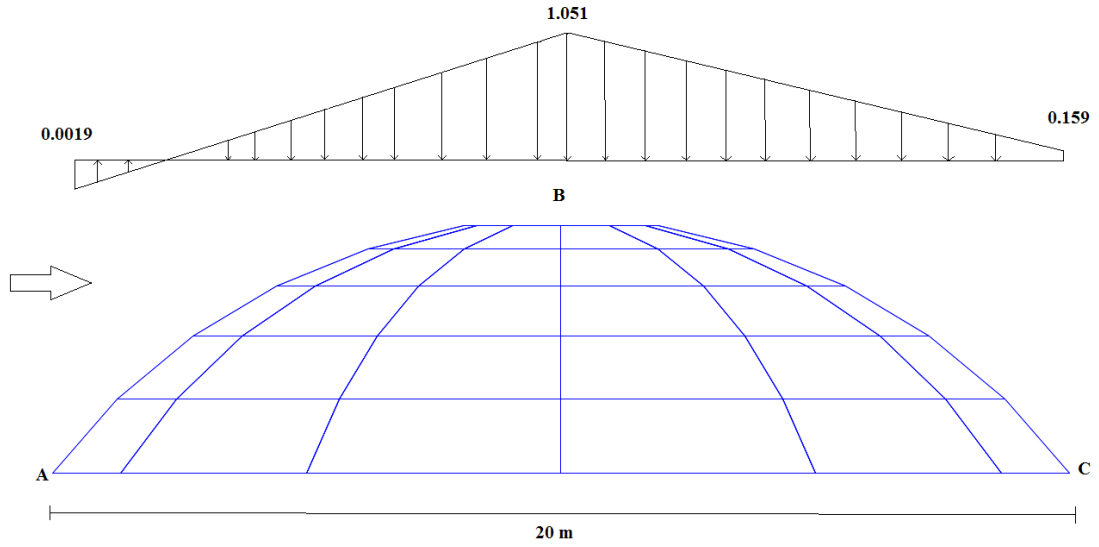


Şekil 3.16. TS EN 1991-1-4'te tavsiye edilen $c_{pe,10}$ dış basınç katsayıları

Modellenen kubbeler için $h/d=0,125$ ve $f/d=0,25$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler ile A,B ve C noktalarında tespit edilen dış basınç katsayıları ve rüzgar basınçları Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. A,B ve C noktalarındaki dış basınç katsayıları ve rüzgar basınçları

	A	B	C
c_p	0.0015	-0.825	-0.125
$w_e(\text{kN/m}^2)$	0.0019	-1.051	-0.159

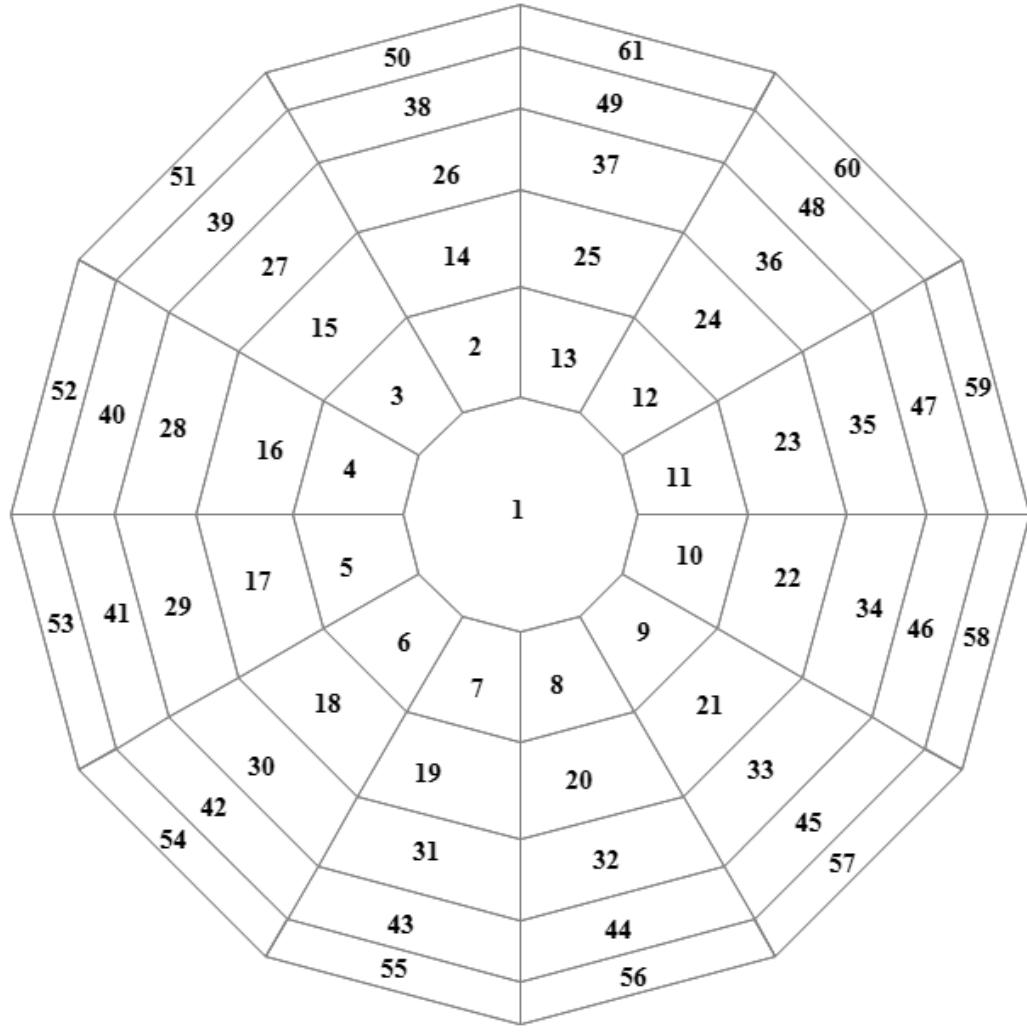


Şekil 3.17. Rüzgar basıncı (w_e) dağılımı

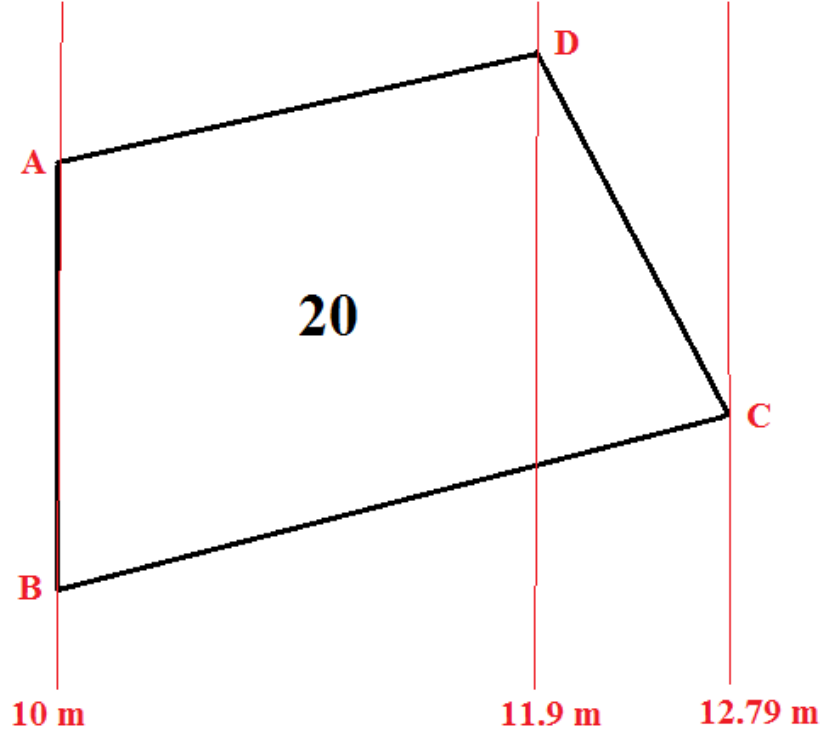
Kubbe üzerindeki yük uygulama amaçlı olan ağırlıksız kaplama elemanlarının köşelerinin olduğu düğüm noktalarının rüzgar basıncı değerleri, A,B ve C noktalarının rüzgar basıncı değerleri baz alınarak interpolasyonla hesaplanmış ve bu 4 rüzgar basıncı değerinin ortalamaları hesaplanarak kaplama elemanına kubbe yüzey normaline dik olacak şekilde etki ettirilmiştir.

Kubbe yapılarının çift eğrilikli yapısı sebebiyle yüzey açısı her bir noktada birbirinden farklıdır. Bu açıların tahkikinin zor olması sebebiyle tasarım modelinde rüzgar yüklerinin gerçeğe en yakın uygulanabilmesi için taşıyıcı sistem arasındaki trapez alanlara ağırlıksız kabuk elemanlar modellenmiş ve rüzgar yükleri bu yüzey elemanlarına etki ettirilmiştir (Hasançebi vd.2010).

Bu yüzey elemanlarının alanlarının yerleşimi Şekil 3.18 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Yük aktaran kaplamaların numaralandırılması



Şekil 3.19. 20 numaralı alanın rüzgar basıncı w_e

Şekil 3.19'da gösterildiği şekilde, rüzgar kuvvetinin etki ettirileceği her alanın köşe noktaları isimlendirilmiştir ve rüzgar basınçlarının hesaplandığı doğrultudaki koordinatları alınmıştır ($x_A = 10$ m, $x_B = 10$ m, $x_C = 12.79$ m, $x_D = 11.9$ m). Köşe noktalarının koordinatlarının ortalaması alınır ($x_{ort} = 11.17$ m) ve bu ortalama göre basınç katsayısı interpolasyon yöntemi ile hesaplanır ($w_{e,20} = -0.95$ kN/m²). Bu yöntem ile her alanın basınç katsayısı hesaplanmış ve Çizelge 3.4 ile gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Tanımlanan alanların dış yüzeyine etkiyen rüzgar basınçları

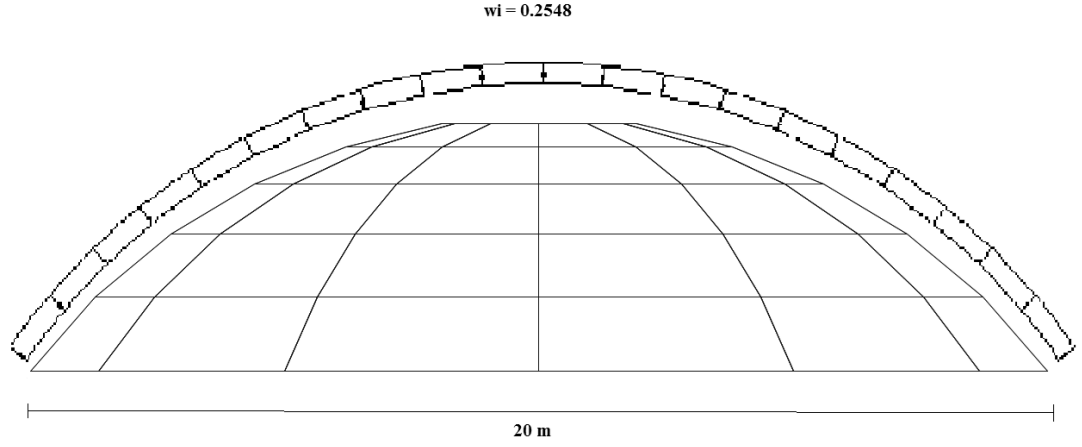
Alan	Ortalama	w_e (kN/m ²)	Alan	Ortalama	w_e (kN/m ²)	Alan	Ortalama	w_e (kN/m ²)
1	10	-1.051	22	14.38	-0.66	42	4.55	-0.48
2	9.29	-0.98	23	14.38	-0.66	43	8.01	-0.84
3	8.05	-0.85	24	13.21	-0.77	44	12	-0.87
4	7.33	-0.77	25	11.17	-0.95	45	15.45	-0.56
5	7.33	-0.77	26	8.4	-0.88	46	17.45	-0.39
6	8.05	-0.85	27	5.62	-0.59	47	17.45	-0.39
7	9.29	-0.98	28	4.02	-0.42	48	15.45	-0.56
8	10.72	-0.99	29	4.02	-0.42	49	12	-0.87
9	11.96	-0.88	30	5.62	-0.59	50	7.66	-0.8
10	12.67	-0.81	31	8.4	-0.88	51	3.61	-0.38
11	12.67	-0.81	32	11.61	-0.91	52	1.26	-0.13
12	11.96	-0.88	33	14.38	-0.66	53	1.26	-0.13
13	10.72	-0.99	34	15.99	-0.52	54	3.61	-0.38
14	8.83	-0.93	35	15.99	-0.52	55	7.66	-0.8
15	6.8	-0.71	36	14.38	-0.66	56	12.34	-0.84
16	5.62	-0.59	37	11.61	-0.91	57	16.4	-0.48
17	5.62	-0.59	38	8.01	-0.84	58	18.74	-0.27
18	6.8	-0.71	39	4.55	-0.48	59	18.74	-0.27
19	8.83	-0.93	40	2.55	-0.27	60	16.4	-0.48
20	11.17	-0.95	41	2.55	-0.27	61	12.34	-0.84
21	13.21	-0.77						

İç basınç katsayısı C_{pi} yapı cephelerindeki elemanlara bağlı olarak hesaplanır. Bu yapıda, bu etki tespit edilemeyeceği için TS EN 1991-1-4 uyarınca tavsiye edilen C_{pi} değerleri (+0,2 ve -0,3) değerleri kullanılmıştır.

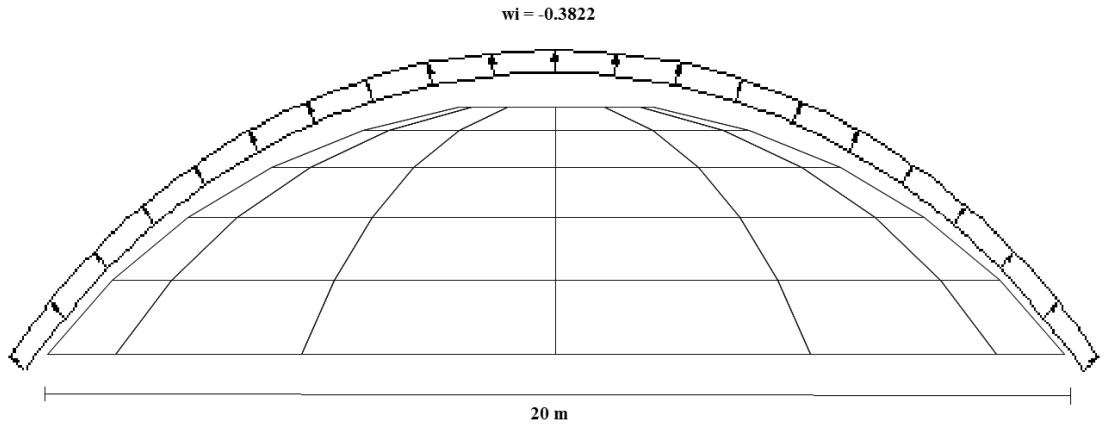
Çizelge 3.5. Kubbenin iç basınç katsayıları ve rüzgar basınçları

	C_{pi}	w_i (kN/m ²)
Pozitif	0.2	$w_{ip} = 0.2548$
Negatif	-0.3	$w_{in} = -0.3822$

Pozitif ve negatif iç rüzgar basınçlarının kubbeye uygulandığı Şekil 3.20 ve Şekil 3.21 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Pozitif iç rüzgar basıncının kubbeye etki ettirilmesi



Şekil 3.21. Negatif iç basıncının kubbeye etki ettirilmesi

3.8.4. Kar yükü

Tek katmanlı uzay kafes kubbelerin stabilitesinde bir diğer büyük tehdit de kar yüküdür. Çift eğimli yapısı sebebiyle kubbelerde, yağan kar düzgün yayılı olarak birikebileceği gibi rüzgar gibi etkenlerle asimetrik yüklemelere de sebep olabilir. Bunun sonucunda kubbe üzerinde asimetrik basınç dağılımları kubbenin global ya da yerel

burkulma tehlikesi olasılığını artırır. Bu sebeple, tasarım ve hesaplarda kar yüklerinin farklı şekillerde oluşabileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Soare 1963).

Bu çalışmada, TS EN 1991-1-3 uyarınca birikmiş kar yükü ile birlikte birikmemiş kar yükü de uygulanacaktır.

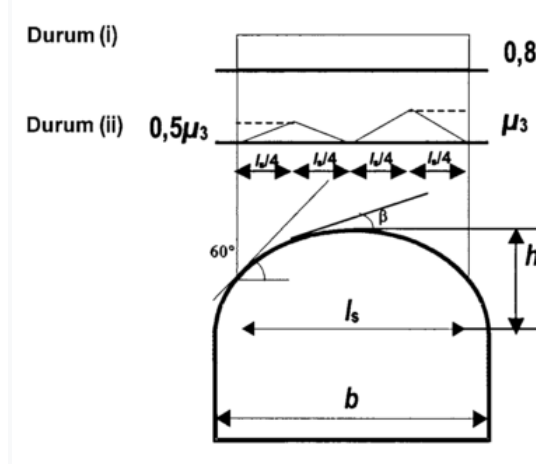
TS EN 1991-1-3 uyarınca çatı kar yükü şu şekilde hesaplanır:

$$s = \mu_i C_e C_t s_k \quad (4.4)$$

Karakteristik zemin kar yükü değeri, $s_k = 1,155 \text{ kN/m}^2$ TS EN 1991-1-3 Ek MA.1 uyarınca Antalya Korkuteli III. bölge ve 1020 rakım değerleri ile tespit edilmiştir.

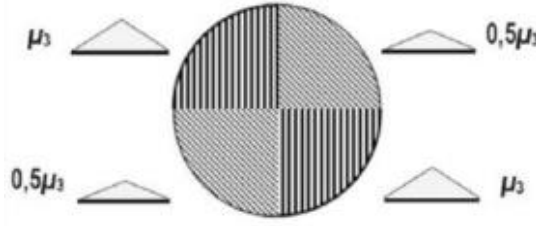
Maruz kalma katsayısı, $C_e = 1,00$ TS EN 1991-1-3 Çizelge 5.1 uyarınca tespit edilmiştir.

I_{s1} katsayısı, $C_t = 1,00$ TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.2 Madde 8 uyarınca tespit edilmiştir.



Şekil 3.22. TS EN 1991-1-3'e göre silindirik çatılar için kar yükü şekil katsayısı (μ)

Bu çalışmada, TS EN 1991-1-3 yönetmeliğinde kubbeler için bilgi verilmediği için silindirik çatılar için uygulanan esasları temel alınmıştır. Burada durum (i) birikmemiş yük düzenlemeleri için kullanılırken, durum (ii) birikmiş yük düzenlemeleri için kullanılır. Ancak, durum (i) için kubbe geometrisine uygun yükleme yapılabılırken, durum (ii) için kubbe geometrisine uygun yükleme yapılamamaktadır; bunun sebebi de silindirik çatıların tek doğrultuda, kubbelerin ise iki doğrultuda eğrisel olmasıdır. Bu sebeple, durum (ii) birikmiş kar yükü hesabı için geçmişte yapılan çalışmalar baz alınarak alternatif bir yük dağılımı yapılmıştır.



Şekil 3.23. Kubbeye birikmiş kar yükü şekil katsayısı dağılımı (Maten 2011)

Durum (ii) birikmiş kar yükü şekil katsayısı değeri, TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.5 uyarınca,

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

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

eşitlikleri ile elde edilir. TS EN 1991-1-3 Bölüm 5.3.5 Not 1 uyarınca, tavsiye edilen üst sınır değeri 2,00'dır.

Durum (i) birikmemiş kar yükü değeri hesabı:

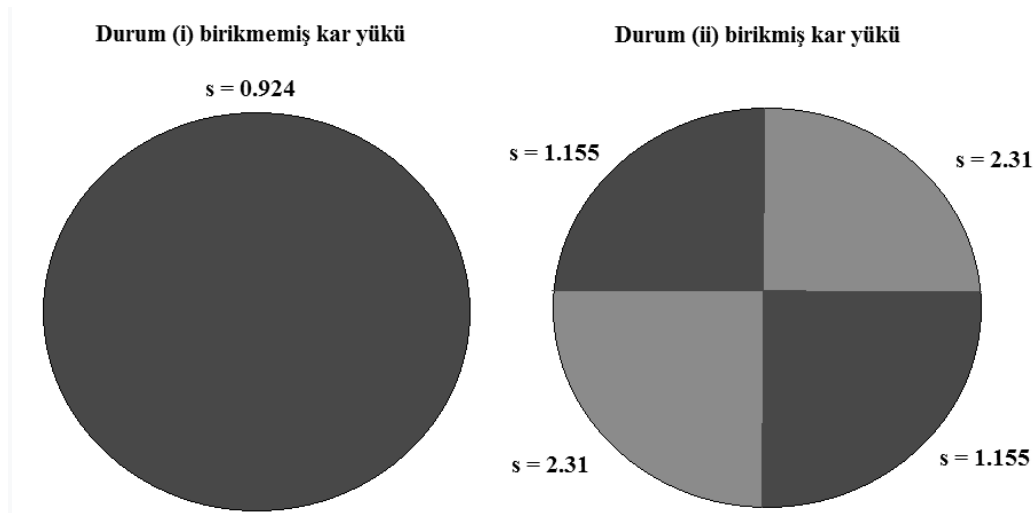
$$s = 0,8 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,155 = 0,924 \text{ kN/m}^2$$

Durum (ii) birikmiş kar yükü değeri hesabı:

$$s(\mu_3) = 2 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,155 = 2,31 \text{ kN/m}^2$$

$$0,5 s(\mu_3) = 1,155 \text{ kN/m}^2$$

Birikmiş ve birikmemiş kar yükünün kubbeler üzerinde dağılımı Şekil 3.24 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Birikmemiş ve birikmiş kar yükü dağılımı

3.8.5. Deprem yükü

Tek katmanlı uzay kafes kubbelerde, rüzgar ve kar yüklerine göre kıyasla daha az kritik olan deprem yüklerinin, yük kombinasyonları içerisinde etkisi olabileceği ihtimali dahilinde bu çalışmada Antalya'nın Korkuteli ilçesi için modellere deprem kuvvetleri TBDY 2018 doğrultusunda uygulanmıştır.

Deprem kuvveti, TBDY 2018 Bölüm 2.2 uyarınca yapının 50 yılda aşılma olasılığının %10 ve buna karşı gelen tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu seyrek deprem yer hareketi olan DD-2 deprem yer hareketi esasınca hesaplanmıştır.

DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için, kısa periyot (S_S) ve 1.0 saniye periyot (S_1) harita spektral ivme katsayıları Türkiye Deprem Tehlike Haritaları kapsamında verilmiştir. Harita spektral ivme katsayıları, her bir deprem yer hareketi düzeyi için referans zemin koşulu $[(V_S)_{30} = 360 \text{ m/s}]$ esas alınarak %5 sönüm oranı için harita spektral ivmelerinin yerçekimi ivmesine bölünmesi ile boyutsuz katsayılar olarak tanımlanmıştır (TBDY 2018).

Harita spektral ivme katsayıları, yerel zemin etki katsayıları ile çarpılarak tasarım ivme spektral katsayılarına dönüştürülür.

$$S_{DS} = S_S * F_S$$

$$S_{D1} = S_1 * F_1$$

Çizelge 3.6. Kısa periyod bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyod bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_S					
	$S_S < 0.25$	$S_S = 0.5$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.00$	$S_S = 1.25$	$S_S > 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılmalıdır.					

Çizelge 3.7. 1.0 saniye periyod için Yerel Zemin Etki Katsayıları

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyod için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 < 0.25$	$S_1 = 0.5$	$S_1 = 0.75$	$S_1 = 1.00$	$S_1 = 1.25$	$S_1 > 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılmalıdır.					

Antalya Korkuteli bölgesinde yapılan araştırmalar sonucunda, yerel zemin sınıfının ZC zemin sınıfı (çok sıkı kum, çakıl) olduğu tespit edilmiştir.

Türkiye Deprem Tehlikeleri Haritaları ile 37.073049° enlem ve 30.223099° boylam değerleri ile elde edilen harita spektral ivme katsayıları ve yerel zemin etki katsayıları şu şekildedir:

$$S_s = 0.566 \text{ için } F_s = 1.274$$

$$S_1 = 0.156 \text{ için } F_1 = 1.500$$

Harita spektral ivme katsayıları ve yerel zemin etki katsayılarının çarpılması ile elde edilen tasarım spektral ivme katsayıları şu şekildedir:

$$S_{DS} = S_s * F_s = 0.566 * 1.274 = 0.721$$

$$S_{D1} = S_1 * F_1 = 0.156 * 1.500 = 0.234$$

Yatay elastik tasarım spektrumunun ordinatları, TBDY 2018 Bölüm 2.3.4'te doğal titreşim periyoduna bağlı olarak şu şekilde verilmiştir:

$$S_{ae}(T) = (0.4 + 0.6 * T / T_A) * S_{DS} \quad (0 \leq T \leq T_A)$$

$$S_{ae}(T) = S_{DS} \quad (T_A \leq T \leq T_B)$$

$$S_{ae}(T) = S_{D1} / T \quad (T_B \leq T \leq T_L)$$

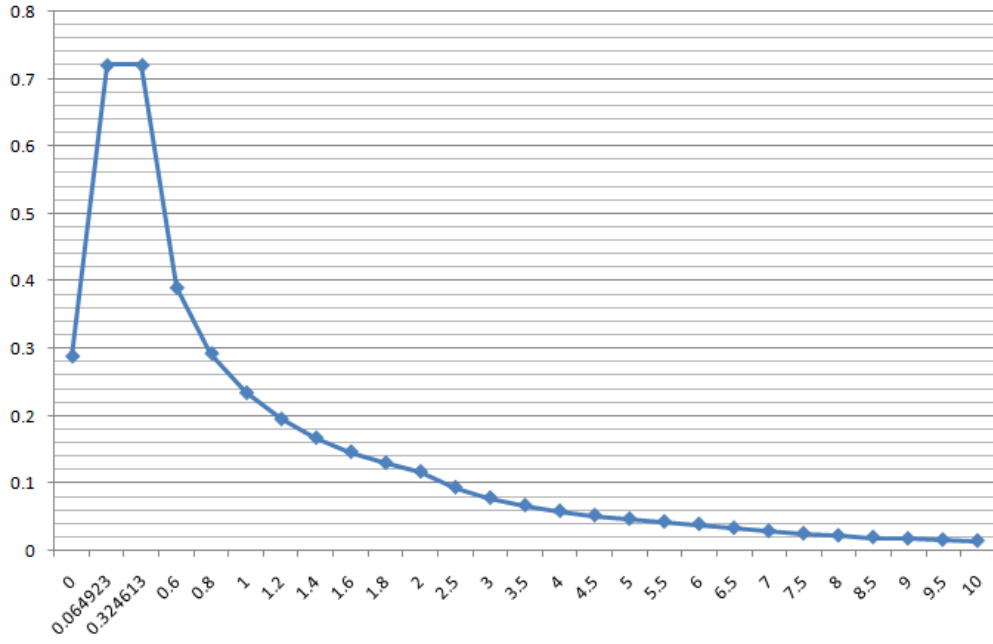
$$S_{ae}(T) = S_{D1} * T_L / S_{DS} \quad (T_L \leq T)$$

Yatay tasarım spektrumu köşe periyotları T_A ve T_B şu şekilde hesaplanır:

$$T_A = 0.2 * S_{D1} / S_{DS} = 0.065 \text{ s}$$

$$T_B = S_{D1} / S_{DS} = 0.325 \text{ s}$$

Sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu $T_L = 6 \text{ s}$ alınacaktır.



Şekil 3.25. Deprem ivme spektrumu

Hesaplanan yatay deprem ivme spektrumu verileri, analiz programına girilerek model üzerinde X doğrultusunda deprem kuvveti olarak etki ettirilmiştir. Yapının eksenel simetrik olduğu varsayımı yapılarak Y doğrultusunda yükleme yapılmamıştır.

3.8.6. Sıcaklık değişimi etkisi

Çelik konstrüksiyon yapılarda sıcaklık değişimi, çeliğin malzeme özelliklerinden dolayı ciddi etkiler yaratabilmektedir. Özellikle geniş açıklıkların örtülmesinde, sıcaklık değişimi büyük iç kuvvetler oluşturabileceği için analizlerde mutlaka dikkate alınmalıdır.

Yapıların kullanım ömürleri boyunca maruz kalabileceği sıcaklık değişimleri tespit edilmeli, bu değişimlere uygun şekilde tasarım yapılmalıdır. Bununla birlikte, yapının imalat ve montaj sıcaklıkları da çok önemlidir. Bazı durumlarda, imalatta elemanların ısıtıldığı ya da soğutulduğu da olmaktadır.

Antalya'nın Korkuteli ilçesine göre yapılan bu çalışmada, en büyük pozitif ve en küçük negatif sıcaklık değerleri baz alınarak $T(+) = +10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $T(-) = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak alınmıştır ve SAP2000 programı ile taşıyıcı sistemin bütün elemanlarına etki ettirilmiştir. Yük kombinasyonlarına da dayanımı olumsuz etkileyebilecek bütün kombinasyonlara 1.0 katsayısı ile etki ettirilmiştir.

3.8.7. Yük kombinasyonları

Bu çalışmada, EN kriterleri esas alındığı için kullanılan yük kombinasyonları Eurocode 3 yönetmeliğine göre alınmıştır ve aşağıdaki gibidir:

C1	1.35 G
C2	1.35 G + 1.50 S _U
C3	1.35 G + 1.50 S _D
C4	1.35 G + 1.35 S _U + 1.35 W _{EP} + 1.35 W _{IP}
C5	1.35 G + 1.35 S _U + 1.35 W _{EP} + 1.35 W _{IN}
C6	1.35 G + 1.35 S _D + 1.35 W _{EP} + 1.35 W _{IP}
C7	1.35 G + 1.35 S _D + 1.35 W _{EP} + 1.35 W _{IN}
C8	1.35 G + 1.50 W _{EP} + 1.50 W _{IP}
C9	1.35 G + 1.50 W _{EP} + 1.50 W _{IN}
C10	1.00 G + 1.00 E
C11	1.35 G + 1.00 S _U + 1.00 E
C12	1.35 G + 1.00 S _D + 1.00 E
C13	1.00 G + 1.50 W _{EP} + 1.50 W _{IP}
C14	1.00 G + 1.50 W _{EP} + 1.50 W _{IN}

Bu kombinasyonlara ek olarak, sıcaklık değişiminin de bu kombinasyonlara etki ettirilmesi sonucu aşağıdaki kombinasyonlar türetilmiş ve yapıya etki ettirilmiştir.

C15	1.35 G + T(+)
C16	1.35 G + T(-)
C17	1.35 G + 1.50 S _U + T(-)
C18	1.35 G + 1.50 S _D + T(-)
C19	1.35 G + 1.35 S _U + 1.35 W _{EP} + 1.35 W _{IP} + T(-)
C20	1.35 G + 1.35 S _U + 1.35 W _{EP} + 1.35 W _{IN} + T(-)
C21	1.35 G + 1.35 S _D + 1.35 W _{EP} + 1.35 W _{IP} + T(-)
C22	1.35 G + 1.35 S _D + 1.35 W _{EP} + 1.35 W _{IN} + T(-)
C23	1.35 G + 1.50 W _{EP} + 1.50 W _{IP} + T(+)
C24	1.35 G + 1.50 W _{EP} + 1.50 W _{IP} + T(-)

C25	$1.35 G + 1.50 W_{EP} + 1.50 W_{IN} + T(+)$
C26	$1.35 G + 1.50 W_{EP} + 1.50 W_{IN} + T(-)$
C27	$1.00 G + 1.00 E + T(+)$
C28	$1.00 G + 1.00 E + T(-)$
C29	$1.35 G + 1.00 S_U + 1.00 E + T(-)$
C30	$1.35 G + 1.00 S_D + 1.00 E + T(-)$
C31	$1.00 G + 1.50 W_{EP} + 1.50 W_{IP} + T(+)$
C32	$1.00 G + 1.50 W_{EP} + 1.50 W_{IP} + T(-)$
C33	$1.00 G + 1.50 W_{EP} + 1.50 W_{IN} + T(+)$
C34	$1.00 G + 1.50 W_{EP} + 1.50 W_{IN} + T(-)$

Yapının güvenle yapabileceği deplasman kontrolünde taşıyıcı elemanların düşey sehim değerleri $L/240$ değerini aşmamalıdır. Yapıdaki düğüm noktalarının, 3 doğrultuda da deplasmanları $s/360$ değerini aşmamalıdır (Hasançebi vd. 2009). Sehim kontrollerinde kullanılacak kombinasyonlar şu şekildedir:

C _{s1}	$G + S_D$
C _{s2}	$G + S_U$
C _{s3}	$G + W_{EP} + W_{IP}$
C _{s4}	$G + W_{EP} + W_{IN}$
C _{s5}	$G + E$

Burada, G sabit yükünü, S_U birikmemiş (undrifted) kar yükünü, S_D birikmiş (drifted) kar yükünü, W_{EP} rüzgar dış basıncını, W_{IP} rüzgar pozitif iç basıncını, W_{IN} rüzgar negatif iç basıncını, E X doğrultusundaki deprem yükünü, T(+) pozitif sıcaklık değişimini, T(-) negatif sıcaklık değişimini göstermektedir.

3.8.8. Analiz ve elemanların boyutlandırılması

EN 1991-1 Bölüm 5.2.1 uyarınca, yapı için birinci mertebe etkileri ile analiz yapabilmek için elemanlardaki kuvvet yada moment artışları ile yapıdaki deformasyonlar nedeniyle oluşan davranış değişikliklerinin ihmal edilmesi gerekmektedir; ya da (elastik analiz için $\lambda > 10$; plastik analiz için $\lambda > 15$) kriteri sağlanması gerekmektedir.

Modellenen tek katmanlı uzay kafes kubbelerin taşıyıcı elemanların belirtilen kombinasyonlar altında dayanımları hesaplanmış; doğrusallaştırılmış burkulma analiziyle global burkulma yük faktörü ($\lambda > 10$) kabulüne uygun olacak şekilde SAP2000 programında analiz edilmiştir.

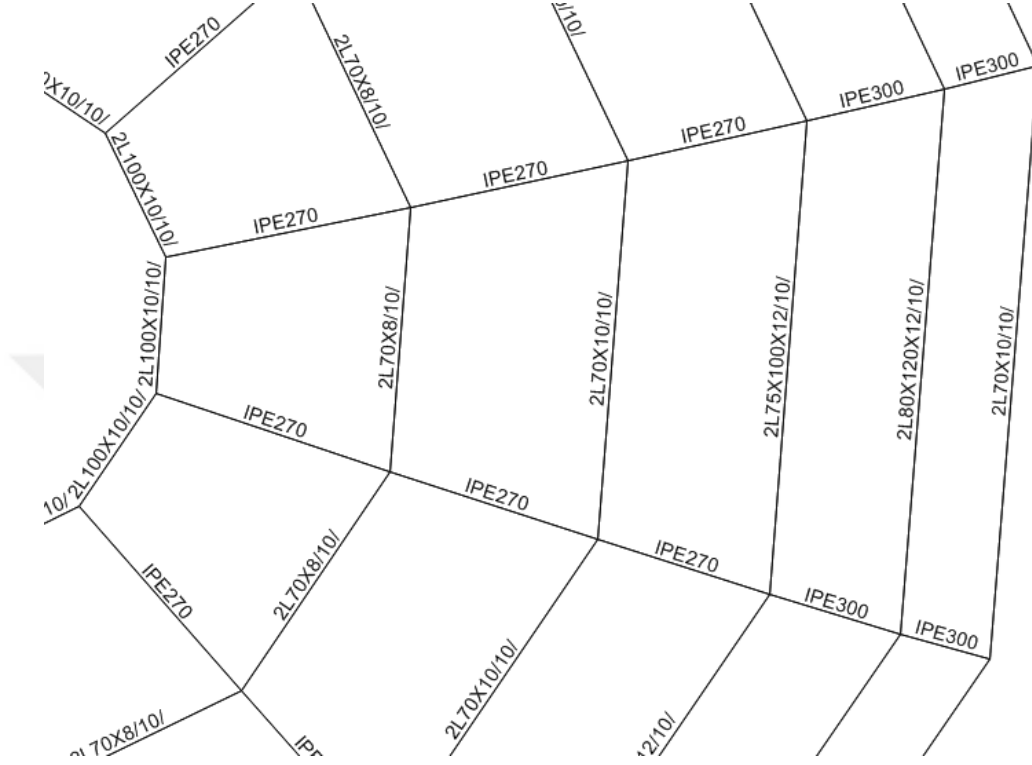
Global burkulma katsayısının her yük kombinasyonunda sınır değerinin üzerinde olması, yapının her burkulma modunda burkulmamasını sağlar. Bu durum sağlanırken, her paralel halkası birbirinden bağımsız bir şekilde gruplandırılmıştır ve boyutlandırılmıştır. Aynı zamanda, meridyen elemanlarda da bağlı olduğu paraleller arasındaki meridyen elemanlar kendi aralarında gruplandırılmış ve boyutlandırılmıştır.

Boyutlandırma yapılırken $\lambda < 10$ olan kombinasyonlar incelenmiş ve bu kombinasyonlarda yapının burkulmasına sebep olan en narin eleman grubu bir üst profile geçirilerek tekrar analiz edilmiştir. Bu sayede, $\lambda > 10$ kısıtlaması en ekonomik şekilde sağlanmıştır.

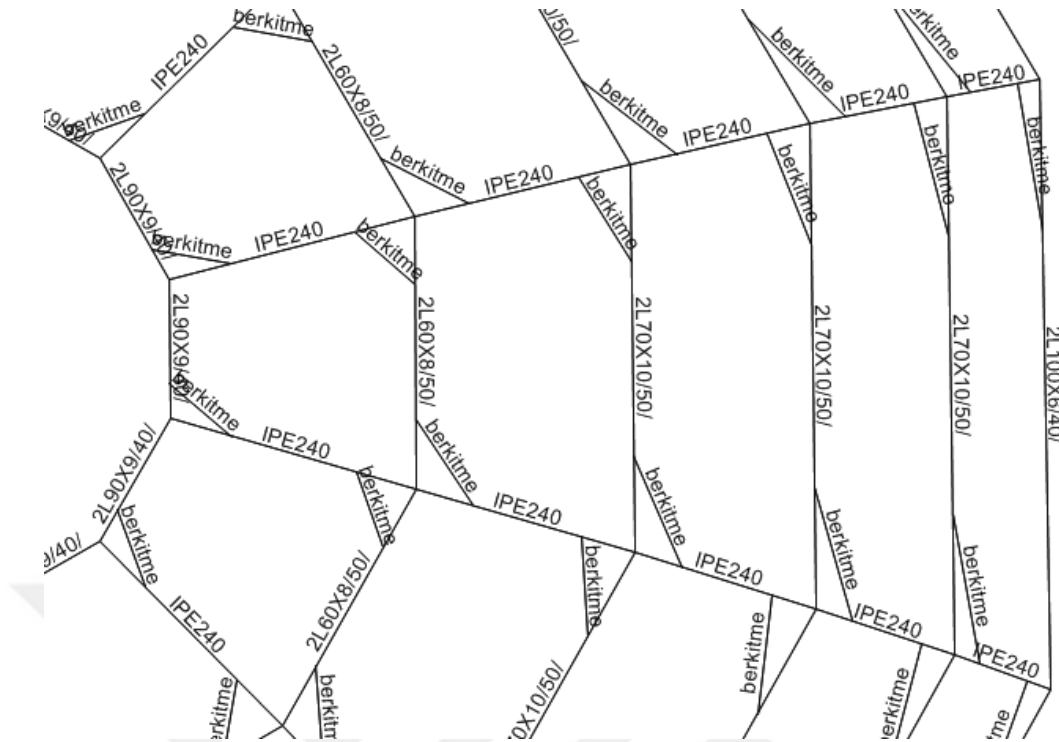
Yük kombinasyonlarının burkulma modu, yapının farklı bölge ve elemanlarını zorlamaktadır. Yapının paralel eleman gruplarından birinin bir üst profile geçirilmesi, bir yük kombinasyonunun burkulma katsayısını 40% artırabilirken, diğer yük kombinasyonunun burkulma katsayısını 1% artırmaktadır. Dolayısıyla, optimum tasarım için her kombinasyonda çok detaylı çalışma yapılmıştır.

4. BULGULAR

Tanımlanan yükler ve yük kombinasyonlarının uygulandığı 2 modelin, doğrusallaştırılmış burkulma analizi sınırlaması ($\lambda > 10$) ile yapılan analizler sonucunda boyutlandırılmıştır (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Model 1 analiz sonucu seçilen kesitler



Şekil 4.2. Model 2 analiz sonucu seçilen kesitler

Analiz sonucuna göre Model 1'in kesitleri ve ağırlıkları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir ve kubbe yapı ağırlığı 10522 kg (35 kg/m²) olarak hesaplanmıştır; Model 2'nin kesitleri ve ağırlıkları Çizelge 4.2'de gösterilmiştir ve kubbe yapı ağırlığı 8368 kg (27.9 kg/m²) olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1. Boyutlandırma sonucu Model 1 kesitleri ve ağırlıkları

KESİT	ADET	TOPLAM UZUNLUK (m)	TOPLAM AĞIRLIK (kg)
IPE270	36	69.478	2503.1
IPE300	24	46.319	1955.9
2L70x8	12	23.620	394.7
2L70x10	24	96.841	1989.2
2L75x100x12	12	45.00087	1389.19
2L80X120X12	12	54.20478	1930.72
2L100x10	12	11.952	359.4
TOPLAM	132	347.415	10522.2

Çizelge 4.2. Boyutlandırma sonucu Model 2 kesitleri ve ağırlıkları

KESİT	ADET	TOPLAM UZUNLUK (m)	TOPLAM AĞIRLIK (kg)
IPE240	60	115.797	3553.8
Levha (13x40)	120	114.14211	286.69
2L60X8	12	23.61982	334.82
2L70X10	36	133.92987	2751.05
2L90X9	12	11.952	291.2
2L100X6	12	62.11657	1150.14
TOPLAM	252	461.557	8367.7

Doğrusallaştırılmış burkulma analizi sonucunda hesaplanan kritik burkulma katsayıları Çizelge 4.3'de verilmiştir. Çizelge 4.3'den görülebileceği üzere C3 kombinasyonu en kritik kombinasyondur. Model 1 için C3 kombinasyonu burkulma mod şekli Şekil 4.3'de gösterilmektedir ve burkulmanın bir yana kaykılma ile oluşacağı görülmektedir. Model 2 için C3 kombinasyonu burkulma mod şekli ise Şekil 4.6'da gösterilmektedir ve burkulmanın kubbe yüzey eksenini etrafında burulma şeklinde olacağı görülmektedir. Model 2 için bu burkulma mod şekline karşı gelen burkulma katsayısını artırmak için düzlem içi rijitliğinin artırılması yoluna gidilebileceği değerlendirilmektedir.

Model 1 için diğer kritik kombinasyonlar olan C6 ve C12 kombinasyonlarında da burkulmanın C3 kombinasyonundaki gibi yana kaykılma ile oluştuğu görülmektedir. C6 kombinasyonu burkulma mod şekli Şekil 4.4'de, C12 kombinasyonu burkulma mod şekli Şekil 4.5'de gösterilmektedir. Model 2 için diğer kritik kombinasyon olan C12 kombinasyonunda da, C3 kombinasyonundaki gibi yüzey eksenini etrafında burulma şeklinde burkulma olacağı görülmektedir ve burkulma mod şekli Şekil 4.7'de gösterilmektedir.

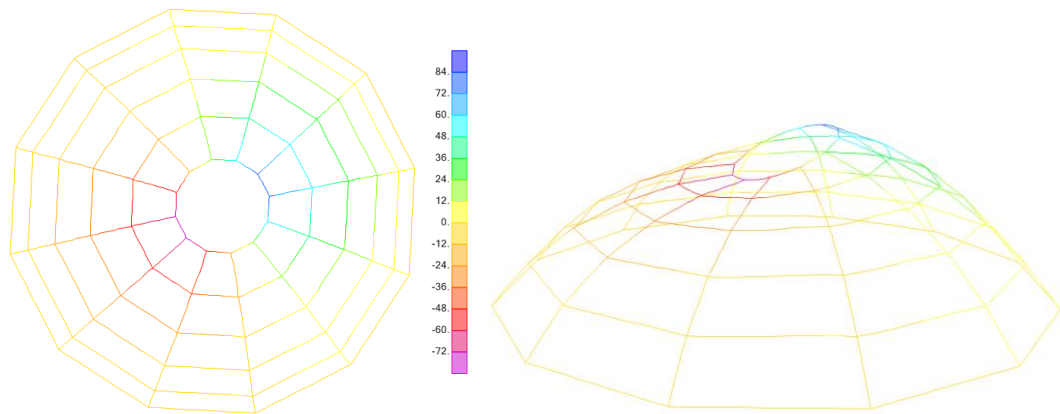
Model 2 için sıcaklık değişimi etkisi olan kombinasyonlar da kritik etki ortaya koymuştur. C15, C23 ve C27 kombinasyonlarında burkulma mod şekli en alt paralel elemanlar temellidir ve Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 ile gösterilmiştir. Ayrıca, rüzgar kuvvetlerinin emme etkisi ile birlikte sıcaklık değişiminin etkisinin burkulma mod şekli ise Şekil 4.11 ile gösterilmiştir.

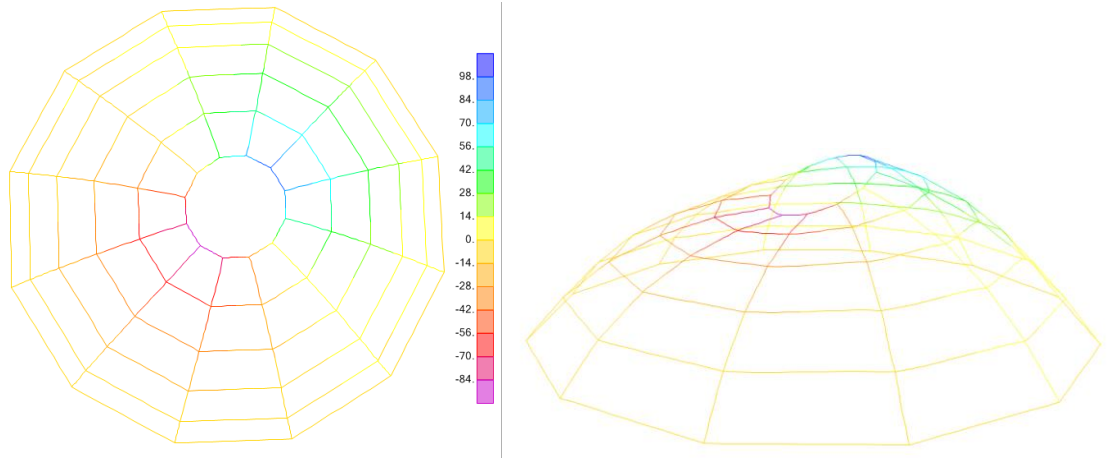
Çizelge 4.3. Doğrusallaştırılmış burkulma analizi sonucu kritik burkulma katsayıları

Kombinasyon	λ (Model 1)	λ (Model 2)	Kombinasyon	λ (Model 1)	λ (Model 2)
C1	48.73	53.53	C18	-6.86	-1.93
C2	16.90	16.50	C19	-6.61	-1.92
C3	10.09	10.05	C20	-6.30	-1.92
C4	27.82	-65.45	C21	-6.75	-1.93
C5	83.17	-21.46	C22	-6.43	-1.92
C6	14.20	22.84	C23	25.63	11.35
C7	21.53	-41.32	C24	-6.44	-1.92
C8	-133.39	-18.92	C25	-23.92	-10.37
C9	-28.72	-10.66	C26	-6.11	-1.91
C10	65.70	71.60	C27	24.79	11.12
C11	21.61	21.73	C28	-6.50	-1.92
C12	13.72	13.79	C29	-6.64	-1.93
C13	-95.30	-17.44	C30	-6.74	-1.93
C14	-26.41	-10.24	C31	25.97	11.30
C15	24.49	11.14	C32	-6.42	-1.92
C16	-6.52	-1.92	C33	-22.29	-9.99
C17	-6.70	-1.93	C34	-6.09	-1.91

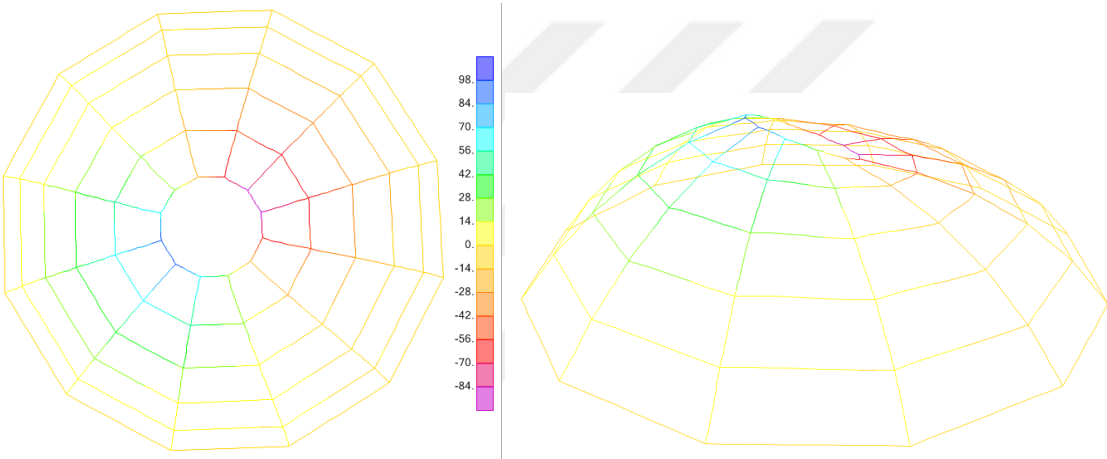
NOT 1: Kritik burkulma katsayısının negatif olması, bu yüklerin tersine çevrilirse burkulma olacağı anlamına gelir. Bu kombinasyonlarda kubbe, global burkulmanın tersi bir davranış sergilemektedir.

NOT 2: Bu kombinasyonlarda en küçük kritik burkulma katsayıları 1.burkulma modunda olduğundan sadece 1.burkulma modu katsayıları gösterilmiştir.

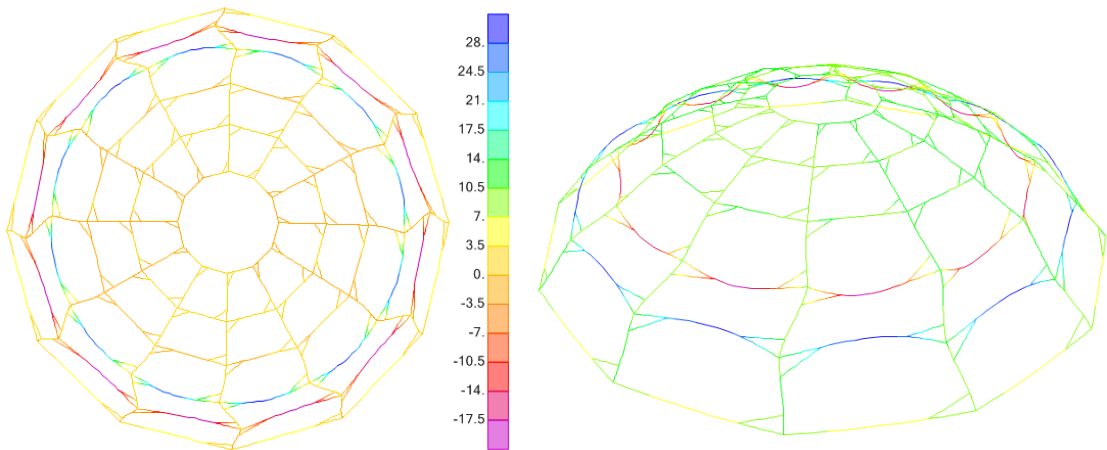
**Şekil 4.3.** Model 1 ve C3 için burkulma modu ($\lambda = 10.09$)



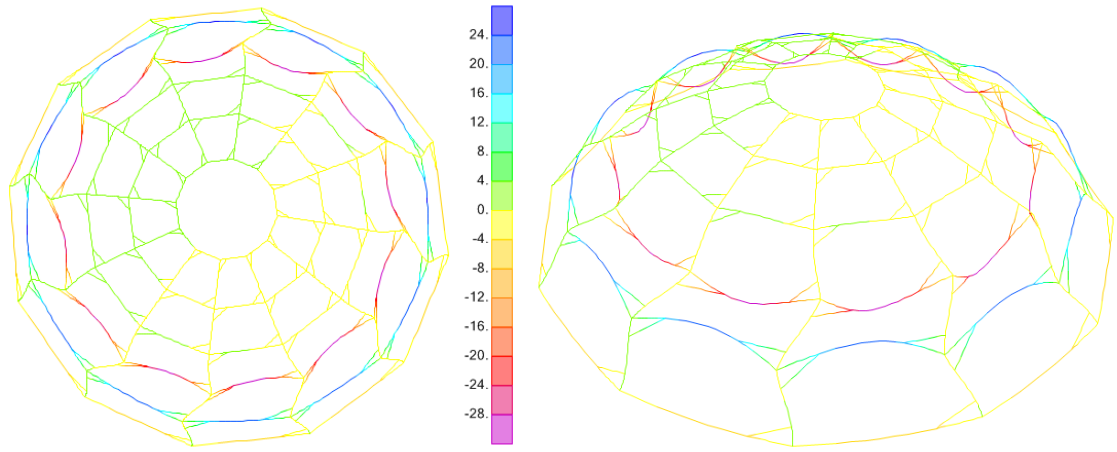
Şekil 4.4. Model 1 ve C6 için burkulma modu ($\lambda = 14.20$)



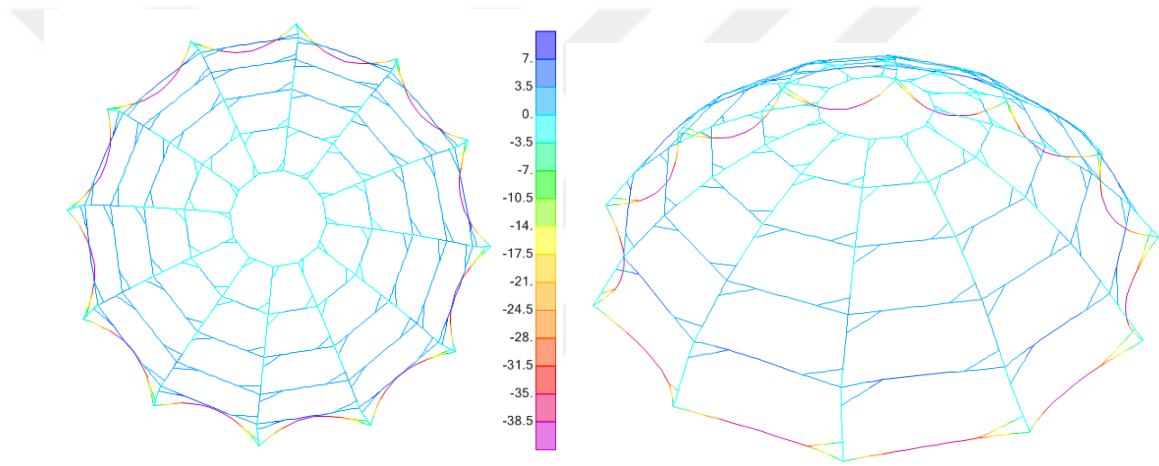
Şekil 4.5. Model 1 ve C12 için burkulma modu ($\lambda = 13.72$)



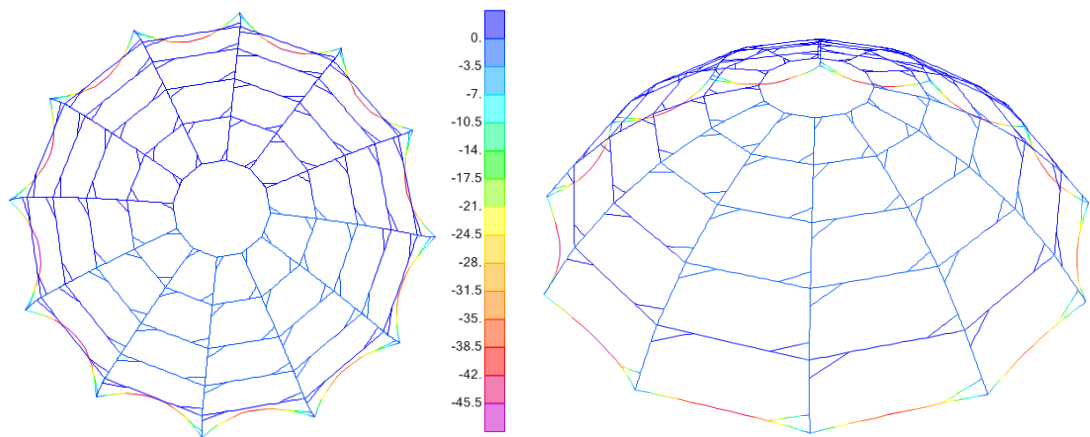
Şekil 4.6. Model 2 ve C3 için burkulma modu ($\lambda = 10.05$)



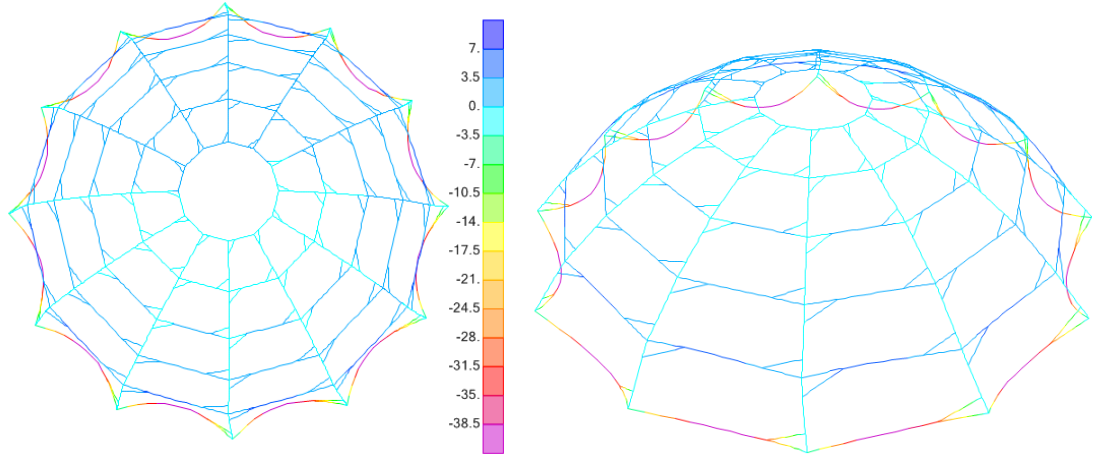
Şekil 4.7. Model 2 ve C12 için burkulma modu ($\lambda = 13.79$)



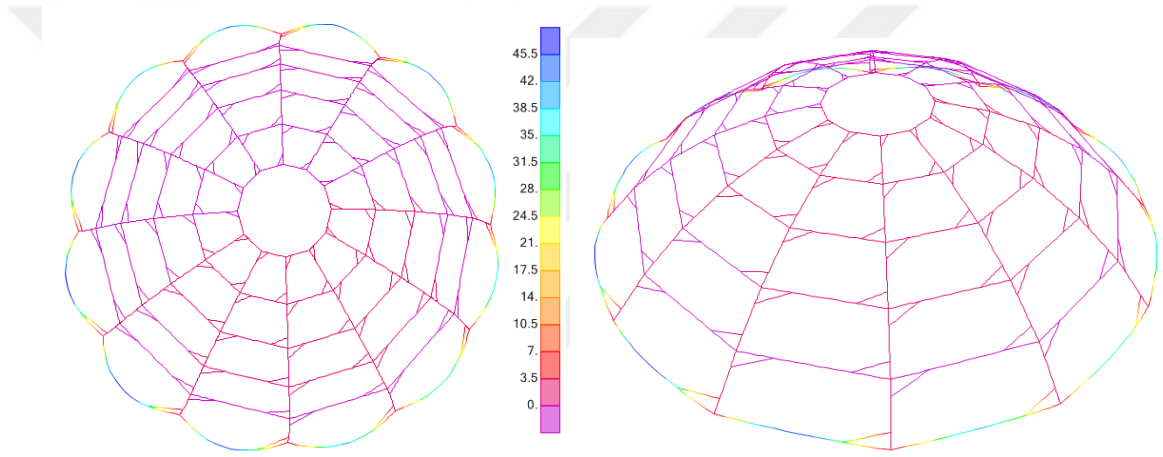
Şekil 4.8. Model 2 ve C15 için burkulma modu ($\lambda = 11.14$)



Şekil 4.9. Model 2 ve C23 için burkulma modu ($\lambda = 11.35$)



Şekil 4.10. Model 2 ve C27 için burkulma modu ($\lambda = 11.12$)



Şekil 4.11. Model 2 ve C31 için burkulma modu ($\lambda = 11.30$)

Modellerin sehim kontrolü ilgili yük kombinasyonları altında yapılmış, tespit edilen sehimler Çizelge 4.4'de gösterilmiştir. Buna göre, Model 1 ve Model 2 için en büyük sehim değerleri sırasıyla 4.7 mm ve 6.1 mm dir. Kaplama seçiminde bu durumun göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Yapının güvenli deplasman kontrolünde taşıyıcı elemanların δ_{max} değeri $L/240$ değerini, düğüm noktalarının δ_{max} değeri de $s/360$ değerini aşmamalıdır (Hasançebi vd. 2009). Bu durumda, 20 m çapındaki kubbe için sehim sınırı 55.5 mm olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada, burkulma katsayısının güvenli bölgede tutulması ile birlikte modellerin sehim sınırına göre çok küçük olduğu görülmektedir. Özellikle, cam kaplama gibi sehimin çok küçük olmasını gerektiren uygulamalar için zemin oluşturmaktadır.

Çizelge 4.4. Yük kombinasyonları altında azami sehim, $\delta_{\max}$

	Model 1 için $\delta_{\max}$ (mm)	Model 2 için $\delta_{\max}$ (mm)
C _s 1	4.7	5.0
C _s 2	0.6	1.2
C _s 3	3.2	6.1
C _s 4	3	5.8
C _s 5	2.2	1.8

5. TARTIŞMA

Tarihin en eski yapı tiplerinden olan kubbeler, zamanla malzeme biliminin gelişmesiyle birlikte daha küçük kesitlerle oluşturulmuştur ancak bu kesit küçülmesi sabilite problemlerine yol açmıştır.

Tek katmanlı uzay kafes kubbeler tarih boyunca araştırılmış ve geliştirilmiş olmasına rağmen, ülkemizdeki gelişimi dünyadan geri kalmıştır. Yapılan araştırmalar doğrultusunda, yönetmeliklerde sınırlamalar koyularak tespit edilen problemlerin yaşanmaması amaçlanmıştır. Burkulma ve sabilite sınırlamaları da bunlar arasındadır. Ancak bazı yönetmeliklerin bazı konularda yetersiz olduğu ortadadır.

Tek katmanlı uzay kafes kubbelerde, yapı düzleminde kayma rijitliğinin yetersiz kalması durumunda kubbeler için kritik göçme modları gerçekleşmektedir. Bu sebeple, bu yapılarda istenen dayanımı sağlanmasında yapı düzleminde kayma rijitliğinin artırılması büyük etki eder. Bu amaçla yapılan çalışmalardan birisi diyagonal eleman kullanımıdır ve bu çalışma Schwedler tipi kubbe adında yeni bir kubbe tipi ortaya koymuştur. Bu çalışmada da yapı düzleminde kayma rijitliğini artırmak için berkitme elemanları kullanımının etkisi araştırılmıştır.

Bu çalışmada, tek katmanlı uzay kafes kubbelerden rijit birleşimli nervürlü kubbe ile düğümler civarında berkitilmiş mafsallı birleşimli kubbe simetrik ve asimetrik yüklerin oluşturduğu yük kombinasyonları altında analiz edilmiş ve kıyaslanmıştır. Bu analizlerde, her iki kubbenin de güvenlik faktörü olarak global burkulma katsayısı $\lambda > 10$ kabul edilmiştir ve elemanlar boyutlandırılmıştır.

Modellerde aynı geometriler ve malzemeler kullanılmıştır, aynı yüklemeler uygulanmıştır. Kar yükü için TS EN 1991-1-3, rüzgar yükü için TS EN 1991-1-4, deprem yükü için TBDY 2018 kullanılmıştır ve sabilite sınırlaması için EN 1993-1 kullanılmıştır.

Sınırlandırılan burkulma katsayısı ile analiz ve boyutlandırmalar sonucunda, düğümler civarında berkitilmiş kubbenin nervürlü kubbeye göre %20 daha ekonomik olduğu görülmektedir. Ayrıca, düğümler civarında berkitilmiş kubbenin berkitme ve paralel elemanlarının mafsallı birleşime sahip olması, hem imalat ve montaj kolaylığı sağlamak hem de birleşimlerin neden olabileceği burkulma olasılığını azaltmaktadır.

Analiz sonuçları incelendiğinde, her iki modelde de en elverişsiz burkulma katsayılarına sahip yük kombinasyonlarında asimetrik yükler olduğu görülmektedir. Asimetrik yüklerin kubbeler için kritik olması sebebiyle, bu yüklerin tasarım aşamasında doğru uygulanmasının önemi ortaya çıkmaktadır. Daha büyük açıklıkların örtülmesinde, en kesin çözüm olarak rüzgar tüneli testlerine başvurulması bu problemi ortadan kaldırmaktadır.

Analiz sonuçlarından, kar yükleri altında her iki modelin de yaklaşık olarak aynı sehim değerlerinde olduğu görülmektedir. Rüzgar yükleri altında nervürlü kubbe daha avantajlı iken, deprem kuvvetleri altında berkitilmiş kubbe daha avantajlıdır. Dügümler civarındaki berkitmelerin, yatay kuvvetlere karşı önemli bir etkisi varken kubbe düzlemine dik kuvvetlere karşı etkisizdir. Ancak, burkulma katsayısı sınırlaması sayesinde yapı çok küçük değerlerde sehim yapmıştır. Cam gibi esneklik problemi yaratabilecek kaplama malzemelerinin kullanılacağı kubbeler için sehim miktarı bu çalışmada olduğu gibi olmalıdır.

Çalışmada, kubbe davranışı sebebiyle kubbelerin tepe noktası civarında aç çok küçük olması ve asimetrik yükler sebepleriyle ciddi bir lokal burkulma davranışı gözlemlenmiştir. Bu burkulmanın önüne geçmek için, tepede rijit bir basınç halkası oluşturulmuştur. Bu basınç halkası ile burkulma katsayısında 2 kata yakın yükseliş gözlemlenmiştir. Yapı tasarım aşaması için çok kritik olan bu detay aynı zamanda imalat ve montaj kolaylığı da sağlayacağı için tavsiye edilmektedir.

Daha önceki çalışmalarda tek katmanlı uzay kafes kubbeler için yükseklik/açıklık oranı 0.25 civarında olması tavsiye edilmiştir. Bu çalışmada yapılan araştırmada, Antalya'nın Korkuteli ilçesi için 0.25 değerinin uygun olduğu tespit edilmiştir. Ancak kubbeler üzerine gelecek yüklerin değiştiği coğrafyalarda bu ekonomik yükseklik/açıklık oranı değişiklik gösterebilmektedir. Bu sebeple, her kubbe tasarımında yükseklik/açıklık araştırması yapılmalıdır.

Burkulma mod şekilleri incelendiğinde, rijit birleşimli nervürlü kubbenin burkulma tipi, yapının kaykılması ile oluşmaktadır. Dügümler civarında berkitilmiş kubbede ise kar ve rüzgar yükünün olmadığı yük kombinasyonlarında nervürlü kubbe gibi kaykılma hareketi söz konusudur; kar yükünün olduğu yük kombinasyonlarında ise yapı, merkezi dönme eğilimine sahip olduğu görülmüştür. Rüzgar yüklerinin baskın olduğu yük kombinasyonlarında ise rüzgar kuvvetinin paralel elemanlar üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Bunun bir sebebi de, kubbe üzerindeki rüzgar yüklerinin tespitinde ele alınan kubbe taban yüksekliğidir. Rüzgar yüklerinde, en gerçekçi yaklaşım olarak rüzgar tüneli testleri uygulanmalı; rüzgar tüneli testleri uygulanmadığı takdirde doğru verilerle doğru analiz programlarında yetkin tasarımcılarla analiz yapılmalıdır.

Tek katmanlı uzay kafes kubbelerin tasarımında, Model 1 'deki gibi tasarım yapılacaksa eğilme dayanımı yüksek profiller tercih edilmelidir; Model 2'deki gibi tasarım yapılacaksa meridyen elemanlar eğilme dayanımı yüksek, paralel ve berkitme elemanlarının da eksenel kuvvet dayanımı yüksek profiller tercih edilmelidir.

Her iki modelde de, meridyen alt düğümleri rijit perdeler üzerine oturduğu varsayımıyla ankastre mesnet şeklinde modellenmiştir. Bu sebeple, sıcaklık değişimi etkisi bulunan yük kombinasyonlarında en alt paralel elemanlar küçümsenemeyecek iç kuvvetlere maruz kalmıştır ve global burkulma katsayısını ciddi bir şekilde etkilemiştir.

Bu düğümler, altında kalan taşıyıcı eleman tipine ve rijitliğine göre daha farklı modellenebilir. Bu durumda, X ve Y doğrultularında düğümlerin deplasman yapması sonucu bu paralel elemanlar daha az iç kuvvetlere maruz kalabilir ve kubbe açısından daha büyük burkulma katsayılarına sahip olabilir ancak bu durum alttaki düşey taşıyıcı elemanların değişkenlerine bağlıdır ve bu düşey taşıyıcı elemanların da yapı global burkulma katsayısına etkileri olacaktır.

Bir kubbe tasarım aşamasında, tek katmanlı uzay kafes olması tercih edilirse tasarımcı mutlaka doğrusallaştırılmış burkulma analizine başvurmalıdır. Karmaşık geometrideki kubbelerin analizinde, düzgün geometrilerden oluşan yapılarda kullanılan geleneksel yöntemlerden uzaklaşılmalı, kubbe davranışı iyi tahkik edilmeli ve ikinci mertebe etkileri göz ardı edilmemelidir. Bir çok yönetmeliğin, kubbelerle ya da stabilite ile ilgili sınırlandırmalarının eksik olması sebebiyle yetersiz analizler yapılmamalı; doğrusallaştırılmış burkulma analizi ile elde edilen global burkulma katsayısı araştırılmalıdır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tek katmanlı uzay kafes kubbelerden rijit birleşimli nervürlü kubbe ile düğümler civarında berkitilmiş mafsallı birleşimli kubbe simetrik ve asimetrik yüklerin oluşturduğu yük kombinasyonları altında analiz edilmiş ve kıyaslanmıştır.

Modellerde aynı geometriler ve malzemeler kullanılmıştır, aynı yüklemeler uygulanmıştır. Kar yükü için TS EN 1991-1-3, rüzgar yükü için TS EN 1991-1-4, deprem yükü için TBDY 2018 kullanılmıştır ve stabilite sınırlaması için EN 1993-1 kullanılmıştır. Analizlerde, her iki kubbe için global burkulma katsayısı $\lambda > 10$ kabul edilmiştir ve elemanlar boyutlandırılmıştır. İlgili yapısal analizler SAP2000 paket programı kullanılarak yapılmıştır.

Düğümler civarında berkitilmiş kubbe sonlu eleman modeli için doğrusallaştırılmış stabilite tahkikini gerçeğe yakın bir şekilde yapabilmek amacıyla düğümler civarındaki berkitmelerden karşılıklı ikisi modelden çıkarılmış ve kalan iki berkitmenin eğilme rijitlikleri için lokal burkulmayı önleyecek şekilde çok yüksek bir değer alınmıştır. Gerçekte, basınç altındaki berkitmelerin çok düşük yükler altında elastik bir şekilde burkulacakları ve bu yüzden sistemin toplam rijitliğine katkılarının ihmal edilebilir mertebede olması sebebiyle bu yaklaşımın ihtiva ettiği hata oranının çok düşük olduğu değerlendirilmektedir.

Analiz sonuçları incelendiğinde, her iki modelde de en elverişsiz burkulma katsayılarına sahip yük kombinasyonlarında asimetrik yükler olduğu görülmektedir ve bu yüklerin tasarım aşamasındaki önemi ortaya çıkmaktadır. Rijit birleşimli nervürlü kubbenin burkulma tipi, yapının bir yana kaykılması ile oluşmaktadır. Düğümler civarında berkitilmiş kubbede yüzey eksenine etrafında burulma davranışı oluşmaktadır.

Sıcaklık değişiminin etkisiyle, ankastre mesnetler arasında kalan paralel elemanların ciddi iç kuvvetler altında kaldığı görülmüştür. Model 2'de, sıcaklık değişimi etkisinin olduğu yük kombinasyonları incelendiğinde, yapının en zayıf elemanlarının en alt paralel eleman grubu olduğu rahatlıkla görülmektedir.

Boyutlandırma sonucunda Modeller 1 ve 2 için elde edilen ağırlıklar sırasıyla 10522.2 kg ve 8367.7 kg olarak elde edilmiş olduğundan düğümler civarında berkitilmiş kubbenin nervürlü kubbe'den %20 kadar daha ekonomik olduğu söylenebilir. Ayrıca, düğümler civarında berkitilmiş kubbenin berkitme ve paralel elemanlarının mafsallı birleşime sahip olması, hem imalat ve montaj kolaylığı sağlamakta hem de birleşimlerin neden olabileceği burkulma olasılığını azaltmaktadır.

Model 1 ve Model 2 için en büyük sehim değerleri sırasıyla 4.7 mm ve 6.1 mm dir. Elde edilen bu değerler burkulma parametresinin 10'dan büyük alınması sayesinde sehimin çok ciddi nispette azaltılabileceğini ve cam gibi kırılğan kaplama malzemelerinin kullanılacağı kubbeler için tasarım yaklaşımının uygun olduğu anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada, sadece lineer analiz yapan yaygın çelik yapı anlayışına göre daha ağır ve daha az deplasman yapan bir yapı ortaya koyulmuştur. Geniş açıklıklı bu yapılar, içerisinde yoğun insan popülasyonu bulundurabileceği için göçme riski ile karşı karşıya kalmamalıdır. Nonlineer analiz yapılmadan $\lambda > 10$ kısıtlaması ile yapının daha ağır ancak daha rijit ve çok güvenli bir şekilde tasarlanabilmektedir.

Bu çalışmaya paralel olarak, yapı lokasyonu, kubbe alt kotu, kubbe geometrisi, elemanlar için kullanılan profil tipleri gibi değişkenler değiştirilerek farklı sonuçlar elde edilebilir.

Bu çalışmanın devamı olarak, berkitme elemanlarının kullanılmasının birleşim güvenliğine etkisi araştırılabilir. Ayrıca, düğümler civarında berkitme elemanının düğüm noktalarına mesafesinin tasarıma etkisi 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.
- 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.
- 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.
- 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., Erdal, F., 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.
- 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.
- Nooshin, H. ve Disney, P. 2000. Formex Configuration Processing I. International Journal of Space Structures, 15 (1): 1-52.
- Özcan, M. 2018. Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbelerde Çapraz Eleman Kullanımının Tasarıma Etkisinin Belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Antalya, 52 s.
- 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. & 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>
- 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.
- 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.

ÖZGEÇMİŞ

Gürhan YILMAZ

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2018-2021	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü,Antalya
Lisans 2013-2018	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,Antalya