

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEK TABAKALI KUBBELERİN TAŞIYICI SİSTEMLERİNİN  
YÖNETMELİKLER AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**TAYFUN KARA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YAPI PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. ZEHRA CANAN GİRGİN**

**İSTANBUL, 2019**

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEK TABAKALI KUBBELERİN TAŞIYICI SİSTEMLERİNİN  
YÖNETMELİKLER AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

**TAYFUN KARA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YAPI PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. ZEHRA CANAN GİRGİN**

**İSTANBUL, 2019**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEK TABAKALI KUBBELERİN TAŞIYICI SİSTEMLERİNİN**  
**YÖNETMELİKLER AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Tayfun KARA tarafından hazırlanan tez çalışması 18.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Zehra Canan GİRGİN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Zehra Canan GİRGİN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Bilge DORAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Cüneyt VATANSEVER

İstanbul Teknik Üniversitesi

## ÖNSÖZ

---

Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programında hazırlanan bu Yüksek Lisans Tezinde, tek tabakalı uzay kafes sistemler; TS EN, ASCE, TBDY, TÇYY ve AISC Yönetmelikleri bazında incelenmektedir. Bu çalışma ile tek tabakalı uzay kafes sistemlerin her yönüyle tanıtılması ve ilgili yönetmelikler esas alınarak iki kubbe tipi üzerinde bir seri analiz ile, bundan sonra yapılacak olan çalışmalara kaynak olunması amaçlanmıştır.

Tezimi ve mesleki vizyonumu zenginleştirmek için bana önerilerde bulunan ve daha iyisi için yönlendiren tez danışmanım Prof. Dr. Zehra Canan GİRGİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Desteklerinden dolayı Hasret GÜNEŞ'e ve Mücahit BEKİN'e de teşekkürü borç bilirim.

Yoğun emek vererek hazırlamış olduğum tez çalışmamı; bugüne kadar hayatın her alanında bana koşulsuz destek ve sevgisini sunan güzel annem başta olmak üzere aileme armağan ediyorum.

Temmuz, 2019

Tayfun KARA

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	vii
KISALTMA LİSTESİ .....	x
ŞEKİL LİSTESİ .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xiv
ÖZET .....	xvi
ABSTRACT .....	xviii
<b>BÖLÜM 1</b>	
GİRİŞ .....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Hipotez.....	4
<b>BÖLÜM 2</b>	
UZAY KAFES SİSTEMLER.....	5
2.1 Genel Bilgiler ve Uzay Kafes Sistemlerin Sınıflandırması .....	5
2.2 Tek Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin Tarihçesi .....	8
2.3 Tek Tabakalı Kubbe Sistemlerin Çeşitleri.....	13
2.3.1 Radyal Kubbe Sistemler .....	14
2.3.2 Schwedler Kubbe Sistemler.....	15
2.3.3 Lamella Kubbe Sistemler .....	16
2.3.4 Jeodezik Kubbe Sistemler .....	17
<b>BÖLÜM 3</b>	
TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLER VE ANALİZ ESASLARI.....	20
3.1 Tek Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerde Birleşimler .....	20
3.2 Tek Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin Birleşim Tipleri .....	21
3.3 Tek Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerde Stabilitate .....	26

3.3.1 Burkulma Analizi.....	26
<b>BÖLÜM 4</b>	
<b>PARAMETRELERİN TANITILMASI .....</b>	<b>33</b>
4.1 Amaç ve Kapsam.....	33
4.2 Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) ve Yük Birleşimleri.....	33
4.3 Genel Analiz Metodu ile Stabilitate Tasarımı .....	35
4.4 Tek Tabakalı Uzay Kafes Kubbe Analiz Esasları .....	36
4.4.1 Genel Açıklamalar ve Çalışmada İncelenen Yapı Türlerinin Açıklanması .	37
4.4.2 Taşıyıcı Sistem ve Kaplama Yükleri .....	37
4.4.3 Yapıya Etkiyen Deprem Yükleri .....	38
4.4.3.1 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY-2018) Göre Deprem Yükleri	38
4.4.3.2 ASCE-7-16'ya Göre Deprem Yükleri .....	46
4.4.4 Yapıya Etkiyen Kar Yükleri .....	49
4.4.4.1 TS EN 1991-1-3'e Göre Kar Yükleri .....	49
4.4.4.2 ASCE 7-16'ya Göre Kar Yükleri.....	52
4.4.5 Yapıya Etkiyen Rüzgar Yükleri .....	55
4.4.5.1 TS EN 1991-1-4'e göre Rüzgar Yükleri.....	55
4.4.5.2 ASCE 7-16'ya Göre Rüzgar Yükleri .....	59
4.5 Model Kubbe Analizleri ve Değerlendirmesi.....	62
4.5.1 Mimari Modelleme .....	62
4.5.2 Yük Atamaları ve Modellerin Oluşturulması .....	64
4.5.3 Mühendislik Analizleri ve Değerlendirilmesi .....	68
4.5.4 Düşey Yer Değiştirme Sonuçları .....	78
4.5.5 Kesit Tesirleri .....	78
4.5.5.1 Mesnet Tepkileri .....	79
4.5.5.2 Çekme Çemberi Kesit Tesirleri .....	82
4.5.6 Stabilitate Analizleri ve Değerlendirilmesi .....	83
4.5.7 Vurgu Stabilitesi Tahkiki .....	85
4.5.8 Modellerin Maliyet Hesabı.....	86
4.5.9 Yapıların Modal Analizi.....	87
4.5.10 Kolonlu Kubbelerin Davranışa Etkisi.....	88
<b>BÖLÜM 5</b>	
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>90</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>93</b>
<b>EK-A</b>	
<b>TEK TABAKALI KAFES SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ÖRTÜLER .....</b>	<b>100</b>
<b>EK-B</b>	
<b>KAR YÜKÜ HESABI İLE İLGİLİ ÇİZELGELER .....</b>	<b>104</b>
<b>EK-C</b>	

RÜZGAR YÜKÜ HESABI İLE İLGİLİ ÇİZELGE VE ŞEKİLLER.....	105
EK-D	
YAPI MALZEMESİ OLARAK ÇELİK.....	109
ÖZGEÇMİŞ.....	111



## SİMGE LİSTESİ

$b$	Yapının genişliği
$C_e$	Yüzey etkilenme faktörü
$c_e(z)$	Maruz kalma katsayısı
$c_o$	Orografi katsayısı
$C_p, c_{pe}$	Dış basınç katsayısı
$GC_{pi}, c_{pi}$	İç basınç katsayısı
$c_r(z)$	Yükseklik ile değişen engebelilik katsayısı
$C_s$	Eğimli çatı faktörü
$C_t$	Isı katsayısı, Sıcaklık faktörü
$c_u$	Drenajsız kayma dayanımı
$d$	Yapının derinliği (aksi belirtilmediyse, rüzgâr yönüne paralel doğrultudaki yüzey uzunluğu)
$D$	Çap (açıklık)
$D$	Dayanım fazlalığı katsayısı
$E$	Deprem etkisi
$E_d$	Doğrultu birleştirilmesi uygulanmış tasarıma esas toplam deprem etkisi
$E_d^{(Z)}$	(Z) doğrultusundaki depremin etkisi altında tasarıma esas deprem etkisi
$E_d^{(H)}$	Doğrultu birleştirmesi uygulanmış tasarıma esas yatay deprem etkisi
$f$	Çatı yüksekliği
$F_1$	1.0 sn periyot için yerel zemin etki katsayısı
$F_s$	Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı
$g$	Yerçekimi ivmesi
$G$	Fırtına etkisi faktörü
$G$	Özağırlık katsayısı
$G$	Sabit Yük
$h$	Yapının yüksekliği
$H$	Yükseklik
$H$	Yatay zemin basıncı, zemin suyu basıncı veya yığılı madde basıncı
$I$	Bina önem katsayısı
$I_s$	Kar yükü hesabı için önem faktörü
$K_d$	Rüzgar yön faktörü
$K_e$	Zemin yükselti faktörü
$k_r$	Arazi katsayısı
$K_z$	Maruz kalma faktörü
$K_{zt}$	Topografik faktör
$N_{60}$	Standart penetrasyon darbe sayısı
$N_i$	i. katta uygulanan fiktif yük



$p$	Tasarım rüzgar basıncı
$p_f$	Düz çatıya etki eden kar yükü
$p_g$	Zemin kat ağırlığı
$p_m$	Düz çatı kar yükü
$P_r$	İkincil mertebe eksenel kuvvet dağılımı
$p_s$	Eğimli çatı tasarım kar yükü
$P_y$	Akma sınır durumunda eksenel kuvvet dayanımı
$Q$	Hareketli yük
$q$	Esas rüzgar basıncı
$q_i$	İç basıncı
$q_p$	Esas rüzgar hızından kaynaklanan rüzgar basıncı
$Q_r$	Çatı hareketli yük
$q_z$	Z yüksekliğinde ölçülen rüzgar basıncı
$R$	Yağmur yükü
$R$	Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
$R_n$	Karakteristik dayanım
$R_u$	YDKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım
$S$	Kar yükü katsayısı
$s$	Çatı kar yükü değeri ( $kn/m^2$ )
$S_1$	1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (boyutsuz)
$S_{ae}(T)$	Yatay elastik tasarım spektral ivmesi (g)
$S_{D1}$	1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)
$S_{DS}$	Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)
$S_K$	Karakteristik zemin kar yükü
$S_s$	Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (boyutsuz)
$T$	Doğal titreşim periyodu
$T$	Sıcaklık değişmesi ve/veya mesnet çökmesi etkileri
$T_A$	Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu
$T_{AD}$	Düşey elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu
$T_B$	Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu
$T_{BD}$	Düşey elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu
$T_L$	Yatay elastik tasarım spektrumunda sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu
$T_{LD}$	Düşey elastik tasarım spektrumunda sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu
$V, v_b$	Esas rüzgar hızı
$v_m(z)$	Ortalama rüzgar hızı
$V_S$	Ortalama kayma dalgası hızı
$W$	Rüzgar yükü
$w_e$	Rüzgar dış basınç
$Y_i$	i. katta uygulanan düşey yük
$z$	Rüzgar yükü hesabında yer seviyesinden yükseklik
$z_{max}$	En düşük yükseklik
$z_{min}$	En büyük yükseklik
$z_o$	Engebelilik uzunluğu
$\alpha$	Yatay düzleme göre ölçülen çatı eğimi
$\alpha$	Düşey açısı
$\beta$	Dönme açısı
$\beta$	Silindirik çatı sistemleri için, eğri yüzeyin tanjantı ile yatay düzlem arasındaki açı
$\gamma$	Birim hacim ağırlığı

$\theta$	Çubuklar arası açı
$\mu_i$	Kar yükü şekil katsayısı
$\tau_b$	Rijitlik azaltma katsayısı
$\Phi$	Rüzgarın yaklaştığı yöndeki kısmın eğimi
$\phi$	Dayanım katsayısı
$\phi R_n$	Tasarım dayanımı
$[K_E]$	Rijitlik matrisi
$[K_{GO}]$	Gerilme rijitliği matrisi
$[\lambda_i]$	i'inci öz değer
$\{X_i\}$	i'inci yer değiştirme öz vektörü



## KISALTMA LİSTESİ

AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
AISC	American Institute of Steel Construction
ASCE	American Society of Civil Engineers
BKS	Bina Kullanım Sınıfı
BYS	Bina Yükseklik Sınıfları
CTP	Cam Takviyeli Polyester Levhalar
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
EDY	Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi
ePTFE	Expanded Poly Tetra Fluoro Ethylene
ETFE	Etilen Tetra Florür Etilen
FT	Tamamen Temperli Cam
GKT	Güvenlik Katsayıları ile Tasarım
Grasshopper	Rhinoceros ile entegre olabilen grafiksel algoritma editörü
HEFI	Helmut Fischer'in Tasarladığı Birleşim Noktaları
HT	Isı ile Güçlendirilmiş Cam
IASS	International Association for Shell and Spatial Structures
MBY	Mod Birleştirme Yöntemi
MERO	MERO-TSK International GmbH & Co. KG Tarafından Tasarlanan Birleşim Noktaları
OCTA	Octatube Space Structures Tarafından Tasarlanan Birleşim Noktaları
OSB	Oriented Strand Board
POLO	Polonyi & Fink Tarafından Tasarlanan Birleşim Noktaları
PTFE	Poly Tetra Fluoro Ethylene
PVB	Poly Vinyl Butyral
PVC	Poly Vinyl Chloride
RHINOCEROS 3D	3 boyutlu modelleme için tasarlanmış CAD/CAM yazılımı
SAP2000	Integrated Software for Structural Analysis and Design
SBP	Schlaich Bergermann&Partner Tarafından Tasarlanan Birleşim Noktası
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TÇYY	Türkiye Çelik Yapılar Yönetmeliği
TS-EN	Türk Standartları – European Norm
WABI	Waagner-Biro AG Tarafından Tasarlanan Birleşim Noktaları
YDKT	Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Tek tabakalı uzay kafes sistemlere modern örnekler: (Soldaki) Jewel Changi Airport [5], Singapur ve (Sağdaki) Milan Trade Fair [6].....7
Şekil 2.2	Tek ve çift tabakalı uzay kafes sistemin birleşik örneği; Abu Dhabi Louvre Müzesi, BAE [7][8].....7
Şekil 2.3	Çift ve çok tabakalı uzay kafes sistem örneği; National Aquatics Center (Water Cube), Pekin / Çin [9][10].....7
Şekil 2.4	Bambu malzemesi ile tasarlanan basit sistemler [11].....8
Şekil 2.5	Bambu malzemesi ile tasarlanan karmaşık sistemler [11].....8
Şekil 2.6	Bambu malzemesi ile kafes sistemlere geçiş [11].....9
Şekil 2.7	Pantheon Tapınağı'nın dışarıdan [13] ve içeriden [14] görünüşü, Roma/İtalya...9
Şekil 2.8	Palazetto Dello Sport [15] (Soldaki) ve Shine Dome [16] (Sağdaki).....9
Şekil 2.9	Bourse de Commerce kubbesinin dış ve iç görünüşü, Paris / Fransa [17].....10
Şekil 2.10	Fichtebunker eski gaz deposu, Berlin / Almanya [18].....10
Şekil 2.11	Zollinger'in [20] (Soldaki) ve Junkers'in [21] (Sağdaki) lamella tasarımları.....11
Şekil 2.12	Houston Astrodome, Teksas/ABD [22][23].....11
Şekil 2.13	İlk jeodezik kubbe; Zeiss Planetarium Jena, Berlin / Almanya [24][25].....12
Şekil 2.14	Osaka Maritime Museum, Japonya [26].....12
Şekil 2.15	South Pole Dome, Antarktika [27].....13
Şekil 2.16	Soldan sağa sırasıyla görseller; Spruce Goose Hangar Dome [28], Fukuoka Yahuoku [29] ve Desert Dome [30].....13
Şekil 2.17	Geometrilerine göre tek tabakalı kubbe çeşitleri [31].....14
Şekil 2.18	Radyal kubbe örneği; Rodos Palace dışarıdan [32] ve içeriden [33] görünüşü, Yunanistan.....15
Şekil 2.19	Schwedler kubbe örneği; Gasometer C - Manfred Wehdorn (dışarıdan ve içeriden görünüş), Viyana / Avusturya [35].....15
Şekil 2.20	Kavisli lamella kubbe örneği; Reflect Grand Punta Cancun Kubbesi (dışarıdan ve içeriden görünüş), Meksika [37].....16
Şekil 2.21	Diamatik lamella kubbe örneği; Houston Astrodome, Teksas [38].....17
Şekil 2.22	İkosahedrondan jeodezik küresel forma geçiş aşamaları [42].....18
Şekil 2.23	Jeodezik kubbe sistemlerinde dilimler ve frekansların gösterimi [43].....18
Şekil 2.24	Jeodezik kubbe örneği; Nagoya Dome, Japonya [45] [46].....19
Şekil 2.25	Salvador Dali Museum, Florida/ABD [47].....19
Şekil 3.1	Birleşim tiplerinin moment-açısal yer değiştirme grafiği [48].....21
Şekil 3.2	Birleşimlerde açılarının gösterimi [39].....22

Şekil 3.3	Bulonlu birleşim (Soldaki) ve Bulon çapına göre düğüm noktasında başlangıç eğilme rijitliği ve eğilme momentinin değişimi (Sağdaki) [51].....	23
Şekil 3.4	Çeşitli teorilere göre yük parametresi – yer değiştirme bağıntıları [54].....	27
Şekil 3.5	Vurgu stabilitesi yük - yer değiştirme gösterimi [55].....	28
Şekil 3.6	Basıklık oranı küçük (1/8) olan Kiewitt ve Jeodezik kubbeye burkulmanın gösterimi [56] .....	28
Şekil 3.7	Rijit (Soldaki) ve mafsallı (Sağdaki) kubbelerin gösterimi [56].....	29
Şekil 3.8	Kiewitt (Soldaki) ve jeodezik (Sağdaki) kubbelerin mesnetleme şartlarına göre elasto-plastik burkulma yükünün gösterimi [56].....	29
Şekil 3.9	UAE Pavilion, Şanghay [50].....	30
Şekil 3.10	Yük altındaki tek tabakalı kubbelerin yük- yer değiştirme grafiği [57] .....	30
Şekil 3.11	Shanghai Bilim ve Teknoloji Müzesi, Çin [58].....	31
Şekil 3.12	Düğüm noktası davranışının deneysel ve analiz sonuçları gösterimi [58].....	31
Şekil 3.13	Farklı basıklıktaki diamatik kubbelerde plastik mafsalların dağılımı [59].....	32
Şekil 3.14	Yujiabu Station kubbesi, Çin [60].....	32
Şekil 4.1	Diamatik kubbe (Soldaki) ve jeodezik kubbenin (Sağdaki) önden ve üstten görünüşü [3].....	37
Şekil 4.2	$S_s$ Değeri hesaplaması [73] .....	41
Şekil 4.3	$S_1$ Değeri hesaplaması [73] .....	41
Şekil 4.4	TBDY - Yatay elastik tasarım spektrumu grafiği [61] .....	43
Şekil 4.5	Yatay elastik tasarım spektrumunun grafik gösterimi.....	43
Şekil 4.6	Düşey elastik tasarım spektrumu grafiği [61].....	43
Şekil 4.7	Düşey elastik tasarım spektrumu grafik gösterimi.....	44
Şekil 4.8	X yönü - Eşdeğer deprem yükü yöntemine göre yük atanımı.....	44
Şekil 4.9	Y yönü - Eşdeğer deprem yükü yöntemine göre yük atanımı.....	45
Şekil 4.10	ASCE 7-16'ya göre X yönü sismik yük tasarım parametreleri.....	47
Şekil 4.11	ASCE 7-16'ya göre X yönü sismik yük tanımlama.....	48
Şekil 4.12	ASCE 7-16'ya göre Y yönü sismik yük tasarım parametreleri.....	48
Şekil 4.13	ASCE 7-16'ya göre Y yönü sismik yük tanımlama.....	49
Şekil 4.14	Farklı yükseklik/açıklık oranlarına sahip silindirik çatılar için tavsiye edilen kar yükü şekil katsayıları ( $\beta \leq 60^\circ$ ) [62].....	52
Şekil 4.15	Silindirik çatılar için kar yükü şekil katsayıları [62].....	53
Şekil 4.16	Eğimli çatı faktörünün ( $C_s$ ) belirlenmesi için grafikler [66].....	55
Şekil 4.17	Dengeli ve Dengelenmemiş Yükleme Şekilleri Durum 1 [66].....	54
Şekil 4.18	Dengeli ve Dengelenmemiş Yükleme Şekilleri Durum 2 [66].....	55
Şekil 4.19	$c_e(z)$ maruz kalma katsayısının grafik gösterimi [63].....	57
Şekil 4.20	Ortalama hız ve ani hızın zemin yüksekliğine göre değişimi [63].....	58
Şekil 4.21	Ortalama hız ve ani hızın zamana göre değişimi [63].....	58
Şekil 4.22	Dairesel tabanlı kubbeler için tavsiye edilen $c_{pe,10}$ dış basınçları [63].....	59
Şekil 4.23	Ortalama rüzgar hızı [66].....	61
Şekil 4.24	Dış basınç katsayısı ( $C_p$ ) diyagramı [66].....	62
Şekil 4.25	Grasshopper yazılımında diamatik kubbeler için geliştirilen algoritma ağacı.....	63
Şekil 4.26	Grasshopper yazılımında jeodezik kubbeler için geliştirilen algoritma ağacı.....	63
Şekil 4.27	Jeodezik kürenin Rhinoceros programında oluşturulmuş model görseli.....	64
Şekil 4.28	70 metre çaplı, $H/D = 1/3$ oranındaki diamatik (Soldaki) ve jeodezik (Sağdaki) kubbe modellerinin Rhinoceros programından alınan görselleri.....	64
Şekil 4.29	Basıklık oranı 1/3 (Soldaki) ve 1/6 (Sağdaki) olan kubbelerin görselleri.....	64
Şekil 4.30	SAP2000 programına girilen kiriş ucu yay değerleri.....	66
Şekil 4.31	Örnek model ( $D=70$ m ve $H/D=1/6$ olan jeodezik kubbe) için AISC P-M oranları renk skalası.....	68

Şekil 4.32	Burkulma için programa yapılan tanımlama.....	84
Şekil 4.33	Payandalı (Soldaki) ve kolonlu (Sağdaki) yöntemin gösterimi [75].....	88
Şekil 4.34	Al Rashid AVM, Suudi Arabistan [76].....	89



## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Uzak kafes sistemlerin geometrilerine göre sınıflandırması.....	6
Çizelge 3.1 Uçtan ekli birleşim şekillerine dair detaylar [52].....	24
Çizelge 3.2 Ek levhalı birleşimlere dair detaylar [52].....	25
Çizelge 4.1 YDKT yöntemi tasarım koşulları .....	34
Çizelge 4.2 TÇYY’de yer alan YDKT yöntemine göre yük birleşimleri [49].....	34
Çizelge 4.3 Deprem etkisini içeren yük birleşimleri.....	35
Çizelge 4.4 Rijitlik azaltma kuralları [71].....	36
Çizelge 4.5 Yerel zemin sınıfları tablosu [61].....	41
Çizelge 4.6 Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Kat Sayısı $F_s$ [61].....	42
Çizelge 4.7 1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı $F_1$ [61].....	42
Çizelge 4.8 Bina taşıyıcı sistemleri için Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı, Dayanım Fazlalığı Katsayısı ve izin verilen bina yükseklik sınıfları [61].....	42
Çizelge 4.9 Bina kullanım sınıfları ve bina önem katsayıları tablosu [61].....	46
Çizelge 4.10 Sismik kuvvet dayanımlı sistemler için tasarım katsayıları ve faktörleri [66]....	47
Çizelge 4.11 Karakteristik zemin kar yükü ( $S_K$ ) değerleri $kN/m^2$ [62].....	50
Çizelge 4.12 İstanbul ili meteorolojik ölçüm tablosu [74].....	50
Çizelge 4.13 Karın ortalama gevşek yığın birim hacim ağırlığı tablosu [62].....	50
Çizelge 4.14 Farklı topografik alanlar için tavsiye edilen $C_e$ değerleri [62].....	51
Çizelge 4.15 Kar yükü şekil katsayıları tablosu [62].....	52
Çizelge 4.16 Yüzey etkilenme faktörleri $C_e$ [66].....	54
Çizelge 4.17 Sıcaklık faktörleri $C_t$ [66].....	54
Çizelge 4.18 Zemin yükselti faktörü ( $K_e$ ) tablosu [66].....	62
Çizelge 4.19 Analizi yapılan kubbelerin 3 boyutlu görselleri.....	65
Çizelge 4.20 Dengelenmemiş kar yükleri ataması gösterimi.....	67
Çizelge 4.21 Dengelenmiş kar yükleri ataması gösterimi.....	67
Çizelge 4.22 Rüzgar yükleri ataması gösterimi.....	67
Çizelge 4.23 40 m çaplı diamatik kubbelerin en elverişsiz kombinasyon altında oluşan yer değiştirme gösterimi (cm).....	69
Çizelge 4.24 70 m çaplı diamatik kubbelerin en elverişsiz kombinasyon altında oluşan yer değiştirme gösterimi (cm).....	70
Çizelge 4.25 40 m çaplı jeodezik kubbelerin en elverişsiz kombinasyon altında oluşan yer değiştirme gösterimi (cm).....	71
Çizelge 4.26 70 m çaplı jeodezik kubbelerin en elverişsiz kombinasyon altında oluşan yer değiştirme gösterimi (cm).....	71
Çizelge 4.27 $D = 40$ m ve $H/D = 1/3$ olan kubbelerin kesit tesirlerinin gösterimi ve en elverişsiz kesit tesirlerinin sayısal değerleri.....	74

Çizelge 4.28	$D = 40$ m ve $H/D = 1/6$ olan kubbelerin kesit tesirlerinin gösterimi ve en elverişsiz kesit tesirlerinin sayısal değerleri.....	75
Çizelge 4.29	$D = 70$ m ve $H/D = 1/3$ olan kubbelerin kesit tesirlerinin gösterimi ve en elverişsiz kesit tesirlerinin sayısal değerleri.....	76
Çizelge 4.30	$D = 70$ m ve $H/D = 1/6$ olan kubbelerin kesit tesirlerinin gösterimi ve en elverişsiz kesit tesirlerinin sayısal değerleri.....	77
Çizelge 4.31	Düşey yer değiştirme sonuçları tablosu.....	78
Çizelge 4.32	$D = 40$ m, $H/D = 1/3$ olan diamatik kubbenin mesnet tepkileri.....	79
Çizelge 4.33	$D = 40$ m, $H/D = 1/6$ olan diamatik kubbenin mesnet tepkileri.....	79
Çizelge 4.34	$D = 70$ m, $H/D = 1/3$ olan diamatik kubbenin mesnet tepkileri.....	80
Çizelge 4.35	$D = 70$ m, $H/D = 1/6$ olan diamatik kubbenin mesnet tepkileri.....	80
Çizelge 4.36	$D = 40$ m, $H/D = 1/3$ olan jeodezik kubbenin mesnet tepkileri.....	81
Çizelge 4.37	$D = 40$ m, $H/D = 1/6$ olan jeodezik kubbenin mesnet tepkileri.....	81
Çizelge 4.38	$D = 70$ m, $H/D = 1/3$ olan jeodezik kubbenin mesnet tepkileri.....	82
Çizelge 4.39	$D = 70$ m, $H/D = 1/6$ olan jeodezik kubbenin mesnet tepkileri.....	82
Çizelge 4.40	Çekme çemberlerinde oluşan maksimum kesit tesirleri tablosu.....	83
Çizelge 4.41	Burkulma analizi sonuçları.....	84
Çizelge 4.42	Yarı ve tam rijit düğümlerde burkulma faktörlerinin karşılaştırması.....	85
Çizelge 4.43	Maliyet hesabı tablosu.....	86
Çizelge 4.44	Kubbe tipi ve çelik maliyet karşılaştırmalı grafik (kN).....	86
Çizelge 4.45	Kubbelerin yüzeyinde kullanılan çelik maliyetlerinin karşılaştırması (kN).....	87
Çizelge 4.46	Modellerin modal analiz bilgilerinin tablo gösterimi.....	87
Çizelge 4.47	70 m, 1/3 Jeodezik kubbenin MBY ve EDY yöntemlerine göre deprem yüklerinin kıyası .....	88
Çizelge 4.48	70 m, 1/6 Jeodezik kubbenin MBY ve EDY yöntemlerine göre deprem yüklerinin kıyası .....	88



**TEK TABAKALI KUBBELERİN TAŞIYICI SİSTEMLERİNİN YÖNETMELİKLER  
AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Tayfun KARA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zehra Canan GİRĞİN

Geniş açıklıkları geçmeyi sağlayacak daha iyi yapısal form arayışında, uzay kafes sistemler; hafiflik, ekonomiklik ve hız avantajı sağlamasıyla en uygun çözüm olmuştur. Düğüm noktası tasarımlarının geliştirilmesine paralel olarak, 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren geniş açıklıklı sistemlerde kullanım alanı bulan tek tabakalı uzay kafes sistemlerin en yaygın kullanılan formu; minimum yüzeyde maksimum hacim ve ekonomik malzeme kullanımı sağlayan kubbelerdir. Geometrik yapılarına göre kubbeler; Radyal, Schwedler, Lamella (Kavisli ve Diamatik) ve Jeodezik olarak sınıflandırılabilir. Kullanılacak malzeme türü ve detayları, birleşim şekilleri, açıklık ve basıklık oranı kubbelerin tasarımlarında belirleyici rol oynar.

Yapının mimari modellemesi Grasshopper adlı algoritmik modelleme aracı ile Rhinoceros programında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 40 ve 70 metre çaplarında, basıklık oranı 1/3 ve 1/6 olan diamatik ve jeodezik toplam sekiz kubbe SAP2000 programında gerekli düzenlemeler yapılarak modellenmiştir. Modellerin analizinde; TBDY-2018, TÇYY-2016, TS EN 1991-1-3: 2009, TS EN 1991-1-4:2005, ANSI-AISC 341-16, ANSI-AISC 360-16 ve ASCE-7-16 Yönetmeliklerinden faydalanılmıştır.

Çalışmanın Birinci Bölümünde tezin amacı ile birlikte tez kapsamında literatürde yer alan önemli bilgilere ve bulgulara değinilmiştir.

İkinci Bölümde, tek tabakalı uzay kafes sistemlerin tarihsel gelişimi ve sınıflandırılmasına yer verilmiş; her bir kubbe türünün yapısal özelliklerine, güncel örneklerine, avantaj ve limitlerine dair detaylı açıklamalar yapılmıştır.

Üçüncü Bölümde, tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanılan birleşim tiplerinin detayları açıklanmış; burkulma analizi ve vurgu stabilitesi ile ilgili tanımlamalara ve açıklamalara yer

verilmiştir. Literatürde yer alan, tek tabakalı uzay kafes sistemler üzerine deneysel çalışmalar ve stabilite incelenmiştir.

Dördüncü Bölümde; yapıya etki eden sabit yükler, kaplama yükü, servis yükü, deprem, kar, rüzgar yükleri ve sıcaklık değişiminden kaynaklanan yüklerin; TS EN 1-3, TS-EN1-4, TBDY, ASCE 7-16 şartnamelerine göre modellere tanımlanmış, AISC VE TÇYY esaslarına göre taşıyıcı sistem elemanlarının boyutlandırılması, stabilite tahkikleri ve maliyet analizleri yapılmıştır.

Modellerden çıkan; yapı elemanlarının tahkik sonuçlarına, burkulma analizi sonuçlarına, modellerin metraj hesabına, düşey yer değiştirme sonuçlarına ve yapılarda oluşan kesit tesirlerine yer verilmiştir.

Beşinci Bölümde analiz sonuçlarının ışığında diamatik ve jeodezik kubbelerin geometrik özelliklerine göre etkinlikleri karşılaştırılmış, sonuçlara varılmıştır.

Ekler kısmında, örtü malzemelerinin detayları, rüzgar ve kar yükleri ile ilgili bazı çizelge ve tablolara ve çelik malzeme ile ilgili bilgilere yer verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tek tabakalı uzay kafes sistem, jeodezik kubbe, diamatik kubbe, SAP2000.

**STRUCTURAL EVALUATIONS OF SINGLE-LAYER RETICULATED SHELLS  
BASED ON SPECIFICATIONS**

Tayfun KARA

Department of Civil Engineering

Master Science Thesis

Thesis Advisor: Prof. Dr. Zehra Canan GIRGIN

In the seek of a better structural form to construct on wide spans, space frame structures are the best choice due to their lightweight, economical and speed advantages. Since the second half of the 20th century, along with the development of node designs; the most common forms of single layer space structures are domes which provide maximum volume on minimum surface with economical material usage. According to their geometries, domes can be classified as Radial, Schwedler, Lamella (Curved and Diamatic) and Geodesic. Material type and details, connection type, span (diameter) and kurtosis ratio play decisive role on structural design of domes.

Architectural modelling of the structure is realised by Rhinoceros and Grasshoper program. In this study, eight geodesic and diamatic domes in total, with diameter of 40 meters and 70 meters, having 1/3 and 1/6 kurtosis ratio, modeled in SAP2000 program after necessary adjustments and additions. TBDY – 2018, TCY - 2016, TS EN 1991-1-3: 2009, TS EN 1991-1-4: 2005, ANSI-AISC 341-16, ANSI-AISC 360-16 and ASCE-7-16 spesifications are used.

The First Section of the study consists of the purpose of the thesis, important informations from literature related to thesis subject and findings.

In the Second Section, the historical development and classification of single layer space truss systems are given. Structural features, current examples, advantages and limitations of each dome type are mentioned.

In the Third Section, details of connection types used in single layer structures are explained. Definitons and explanations related to buckling analysis, snap-through and stability take place. Besides, some important experimental studies and information related to stability of single-layer frame systems are given.

In the Fourth Section, dead load, service load, wind load, seismic load, snow load and loads due to temperature changes are calculated according to the specifications TS EN 1-3, TS-EN1-4, TBDY, ASCE 7-16 and integrated to the current model. Besides, dimensioning of structural system elements, stability analyses and cost calculations are done according to AISC and Steel Structures Specifications for Turkey. The results of the analysis of the structural elements, buckling analysis results, quantitative calculations, deflection results and cross-section effects of the structures are explained.

In the Fifth and the final Section, in consequence of analysis results, performances of geodesic and diamatic domes according to their geometric features are compared, recommendations are given.

In appendix, cover material details, some charts and figures about wind load and snow load and informations about structural steel are given.

**Keywords:** Single-layer reticulated shells, geodesic dome, diamatic dome, SAP2000.



### GİRİŞ

Yapılardaki açıklık arttıkça taşıyıcı sistemlerin önemi daha da artmaktadır. Bu çalışma kapsamında, geniş açıklık söz konusu olduğunda en çok kullanılan taşıyıcı sistemlerden biri olan tek tabakalı uzay kafes sistemler detaylı olarak incelenmiş; yapı malzemeleri, birleşim sistemleri, yükler, ilgili yönetmelikler ve modelleme yöntemlerine dair tüm detaylara yer verilmiş, takiben modeller ve sonuçları ortaya konulmuştur.

#### 1.1 Literatür Özeti

Çalışma kapsamında öncelikle uzay kafes sistemlerin tanımı, avantajları ve sınıflandırmasına değinilmiştir [2-4] [53]. M.Ö.200'lü yıllardan başlayarak günümüz örneklerine kadar gelerek, tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kilometre taşı niteliğindeki gelişmeler incelenmiştir [11-12] [19].

Tek tabakalı kubbe sistemler; geometrik formları, dünyadan örnekler, avantajları ve eksiklikleri açısından incelenmiş, jeodezik kubbeler özelinde teknik detaylara yer verilmiştir [3] [31] [34] [36] [39-42] [44].

Tek tabakalı uzay kafes sistemlerin birleşim tipleri incelenmiş [49], rijit, yarı rijit ve mafsalı birleşimler ile ilgili gerekli açıklama ve tanımlamalar yapılmıştır. Birleşimler uçtan ekli veya levhalı şekillerde, kaynaklı ya da bulonlu olarak yapılabilmektedir. Bu birleşimlerin detayları, avantaj ve dezavantajları incelenmiştir [3] [50] [52].

Literatürdeki tek tabakalı uzay kafes sistemler üzerine yapılan yayınlardan elde edilen çıkarımlar aşağıda özetlenmiştir.

Tek tabakalı uzay kafes sistemlerde yapı stabilitesinin; düzlem içi kayma rijitliğine, birleşim bölgesindeki dönmenin engellenmesine ve çaprazların mevcudiyetine bağlı olduğu belirtilmiştir [84].

Ahmed, M. ve Stutzki, C., tek tabakalı uzay kafes sistemlerde; bulonlu birleşimler ile ancak yarı rijit birleşimlerin mümkün olabileceğini, saha kaynağına ihtiyaç duyulmadan, bulonların gizlenmesi ile birlikte temiz bir görünümün elde edileceğini belirtilmiştir [85]. Aynı makalede taşıyıcı sistem maliyetinde düğüm noktası birleşimlerinin önemli bir etken olduğu; patentli yarı rijit bulonlu birleşimler ile, istenen moment taşıma kapasitesi ve izin verilen dönme serbestliğine uygun eğrisel formların oluşturulabileceğine değinilmiştir. Ayrıca, geleneksel çelik yapı montajına kıyasla, kurulumun daha hassas olduğu, bulon deliğinin bulon çapından daha büyük olmasının yapı stabilitesinde sorun oluşturacağı belirtilmiştir. Asimetrik kar yüklemesi nedeniyle toptan göçmenin kuvvetle muhtemel olduğu belirtilmiştir.

Ding vd. [86], büyük magnitüdü deprem altında burkulma sonrası tek tabakalı kafes sistemlerin davranışı üzerine yapılan deneysel ve sayısal çalışmaları derlemiştir. Düşey yer değiştirmelerde maks. %8 farklılık sözkonusu olabilmektedir. Deneysel ve sayısal sonuçların tutarlılığı ispatlandıktan sonra; yazarların belirttiği burkulma denklemlerinin analizlerde kullanılabileceği söylenmiştir.

Zhi vd. [87]; depremin, tek tabakalı kafes sistemlerde yarattığı hasar üzerine çalışmasında; açıklık, yükseklik/açıklık oranı, çatı ağırlığı vb. parametrelerin hasara olan etkilerini incelenmiştir. Bu parametreler için çeşitli değerler kullanılarak farklı deprem büyüklüklerine göre analizler yapılmış ve bu bilgiler ışığında risk değerlendirme metodu önerilmiştir.

Düğüm noktasının malzeme ve geometrik özelliklerinin, eksantrisitenin, düğüm noktasının moment-dönme eğrisine etkisini araştıran bir çalışmada [88]; sayısal analizlerin, deneysel sonuçlara çok yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Moment-dönme eğrisi üzerinde etkin olan üç özellik; dönme rijitliği, moment dayanımı ve dönme kapasitesi olup; düğüm noktasının davranışında, bileşik eğilmenin (eksenel yük + eğilme momenti) rol oynadığı belirtilmektedir

Li vd. [89]; deprem etkisine maruz, kolonlu kubbenin malzeme ve geometri açısından lineer olmayan davranışını incelemiştir. Bu çalışma; kubbenin oturduğu taşıyıcı sistemin, kubbenin dinamik davranışına olan etkisi üzerine bilinen tek çalışmadır. Kubbenin, rijit düğüm noktalarından oluştuğu varsayılmış, kolonsuz modellenen kubbelere kıyasla çok daha düşük ivme değerinde yıkıldığı belirtilerek, kolon rijitliğinin depreme karşı dayanımında önemine dikkat çekilmiştir.

Mafsallı kubbelerde, halka sayısının artmasıyla yapı rijitliğinin azaldığı; ancak rijit birleşimli kubbelerde aksi durumun yaşandığı ifade edilmiştir [90].

Yang vd. [91] , geniş açıklıklı uzay kafes sistemlerin dinamik özelliklerinin yüksek frekanslı modlar ile bağlantılı olduğunu belirtmiştir. Analizde, Rayleigh sönüm modelinin, frekansa bağlı enerji dağılımında doğru sonuçlar veremediği, kompleks sönüm modelinin kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Özellikle ilk 10 moddaki sönüm oranları için kompleks sönüm modelinin daha az hatalı sonuçlar verdiğini, sarsma tablası deneyinden elde ettiği sonuçlar ile karşılaştırılarak ortaya koymuştur. Düğüm noktalarında yer değiştirmelerin elastik sınırlar içinde kalınması durumunda iki sönüm modeli benzer sonuçlar vermesine rağmen, plastik davranış söz konusu olduğunda kompleks sönüm modeli daha doğru sonuç vermektedir. Yapının yıkımına sebep olacak deprem kuvveti, kompleks sönüm hesaba katıldığında %10 daha düşük değerde olmaktadır.

Doğrusal olmayan malzeme davranışının hesaba katılmadığı, kilise yapısının tek tabakalı çelik kubbesi kar yüklemesinin farklı durumları altında incelenmiştir [92]. Kubbenin kritik burkulma yükü her durum için tespit edilmiştir. Rijit ve yarı rijit birleşimlerin kritik burkulma yükünün değerinde etkisi de incelenmiştir. Dengelenmemiş kar yükünün en kritik yükleme durumu olduğu belirtilmiştir. Yapı elemanlarının düğüm bölgesindeki ebatları değiştirilerek kabul edilen yarı rijit davranışta ise dengelenmemiş kar yüklemesinde %25 rijitliğe sahip düğüm noktalı birleşimde kritik burkulma yükü , rijit birleşimli modele göre %38 azalış gösterdiği belirtilmiştir. Dengelenmiş kar yüklemesinde bu fark %20 mertebesinde kalmıştır.

Tek tabakalı uzay sistemlerin burkulmasında düğüm noktasının eğilme rijitliği oldukça önemlidir. Xiong vd. [93]'nin yaptıkları çalışmada, alüminyum alaşımlı malzemedan düğüm noktalarının yapı davranışına etkisi incelenmiştir. Alüminyum alaşımlı düğüm noktalarının daha düşük rijitliğe sahip olduğu, bundan dolayı da çelikten düğüm noktalarına göre burkulmaya daha hassas oldukları belirtilmiştir.

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu çalışma kapsamında, mimari açıdan tercih edilen tek tabakalı uzay kafes sistemlerin mimari ve mühendislik perspektifinden incelenmesi amaçlanmıştır. Jeodezik ve diamatik olarak iki tip kubbe seçilmiş, değişken açıklık ve basıklık (yükseklik/açıklık) oranlarına göre; TBDY-2018, TÇYY-2016, TS EN 1991-1-3: 2009, TS EN 1991-1-4: 2005, ANSI-

AISC 341-16, ANSI-AISC 360-16 ve ASCE-7-16 Yönetmelikleri ışığında incelenmiş; yapılan analizler ile iç kuvvetler ve yer değiştirmeler belirlenmiş, maliyet analizleri de yapılarak sonuçlar yapısal ve ekonomik açıdan irdelenmiştir.

### 1.3 Hipotez

Çalışmada iki farklı açıklık ve iki farklı basıklık (yükseklik/açıklık) oranına sahip toplam sekiz adet jeodezik ve diamatik kubbe modellenmiştir. Sözkonusu kubbeler; TBDY, TS EN ve ASCE; TÇYY ve AISC Yönetmelikleri bazında karşılaştırılmıştır.

Kubbe davranışında, açıklık ve basıklık oranı kritik rol oynamaktadır. Aynı basıklık oranı için; jeodezik kubbede kesit tesirleri, diamatik kubbeye kıyasla daha düşüktür. Basıklık oranındaki değişimin, yapı elemanlarında oluşan kesit tesirlerine olan etkisi benzerlik göstermektedir.

Kubbelere etki eden sabit yükler, kar, sıcaklık, deprem ve rüzgar yüklerinin sayısal değerleri hesaplanmış; TS EN, TBDY ve ASCE Yönetmeliklerine göre tasarımları yapılmıştır. Yapılan analizlerin ışığında, TBDY ve TS EN Yönetmeliklerine göre hesaplanan deprem, kar ve rüzgar yüklemelerinin oluşturduğu kesit tesirleri daha elverişsiz sonuçlar vermektedir. Depremi düşey doğrultudaki etkisi modellerin basıklığı arttıkça büyümektedir. Jeodezik kubbeler, aynı geometrik parametrelere sahip diamatik kubbelere nazaran daha düşük periyoda sahiptir. Kubbelerin kolonlu olup olmaması da yapıların dinamik davranışına etki etmektedir. Basıklık ve açıklık arttıkça depremin meydana getirdiği kesit tesirleri büyümektedir.

Çekme çemberindeki aksenal yük, basıklık oranının düşük olduğu modellerde, yüksek olanlara göre 2-2,5 kat daha fazla çıkmaktadır. Kubbe tiplerine göre, aksenal yük seviyelerinde pek farklılık bulunmamakla birlikte jeodezik kubbelerde daha fazla çekme kuvveti oluşmaktadır.

Kubbelerin CSI - SAP2000 programında gerçekleştirilen düşey yer değiştirme tahkiklerinde, jeodezik kubbede açıklık 70 m olduğunda, diğer modellere göre daha az düşey yer değiştirme görülmektedir. TBDY ve TS EN'e göre düşey yer değiştirme, ASCE'ye kıyasla daha fazla çıkmaktadır.

Kullanılan çelik profillerin ağırlıkları incelendiğinde; 40 m açıklıklı modellerde, basıklığın az olması durumunda jeodezik; yüksek olması durumunda ise diamatik kubbe daha ekonomik sonuçlar vermektedir.



### UZAY KAFES SİSTEMLER


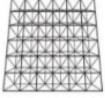




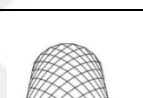

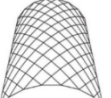
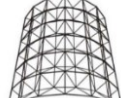






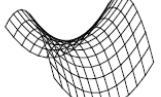
#### 2.1 Genel Bilgiler ve Uzay Kafes Sistemlerin Sınıflandırması

Geniş açıklıkları geçmeyi sağlayacak yeni yapısal form arayışı, mimar ve mühendislerin en temel amaçlarından biri olagelmıştır. Bu arayışın bir sonucu olarak, uzay kafes sistemler ortaya çıkmıştır. 20. yy'ın ortalarından günümüze kadar, uzay kafes sistemlere olan ilgi dünya genelinde gittikçe artmıştır. Malzeme ve yapı teknolojilerindeki gelişmelerin sonucu olarak; uzay kafes sistemler, mimar ve mühendislerin form arayışlarında; hafiflik, ekonomiklik ve hız açısından en uygulanan çözüm haline gelmiştir. Yapı mühendisliğinin gelişmesinde en etkili iki dürtü; ne kadar açıklık geçebileceğimiz ve ne kadar yüksek yapılar yapabileceğimizdir. 2009 yılından itibaren dünya genelinden şehirlerde yaşayan nüfus, kırsalda yaşayan nüfusu geçmiştir [1]. Her geçen sene de şehirlerdeki etkinliklere talep artacağı için, hem estetik hem ekonomik kaygılara cevap veren mühendislik çözümleri çoğalacaktır.

Uzay kafes sistemde malzeme mekansal olarak yayılıdır; çelik, ahşap veya alüminyumdan oluşturulabilir. Kuvvetlerin üç boyutlu aktarımını sağlayacak şekilde düzenlenmiş, doğrusal elemanların düz ya da eğrisel bir yüzey oluşturacak biçimde şantiyede birleştirildiği taşıyıcı sistemlerdir [2]. Sistemin doğal rijitliği, asimetric ve ağır yüklerin taşınmasını sağlar, geniş açıklıklar kolaylıkla geçilebilir [3]. Belirli boyutlarda atölyede üretilen elemanlar ve düğüm noktaları kolaylıkla nakledilir, sahada montajı yapılır. Fuar, sergi alanı, müze, spor kompleksi ve sanayi yapılarının yanısıra; havalimanı ve otogar gibi büyük ulaşım tesislerinde de uygulanmaktadır.

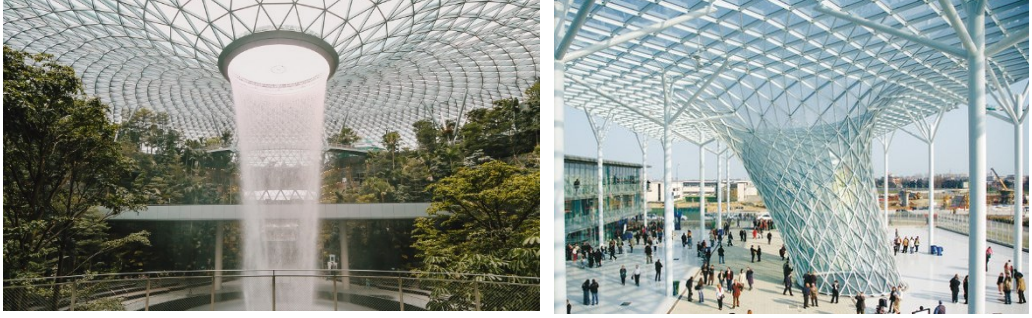
Uzay kafes sistemler ile, düzlem ya da eğri yüzeyler oluşturulabilir. Bütün elemanların aynı ve tek bir yüzeyde birleşiminden oluşan sistemler tek tabakalı olarak isimlendirilir. Çift tabakalı sistemler ise; birbirine belirli bir uzaklıkta bulunan yapı ve birleşim elemanlarının farklı yönlerde çapraz elemanlarla birleştirildiği iki paralel katmandan oluşan sistemlerdir [4]. Uzay kafes sistemlerin sınıflandırma şekli Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Uzay kafes sistemlerin geometrilerine göre sınıflandırması

Düzlem Yüzeyli Uzay Kafes Sistemler	Tek Tabakalı				
	Çift Tabakalı				
Eğri Yüzeyli Uzay Kafes Sistemler	Tek Eğrilikli	Kule / Piramit (Silindir/Koni)	Tek Tabakalı		
			Çift Tabakalı		
		Tonoz (Silindirik kabuk)	Tek Tabakalı		
			Çift Tabakalı		
	Çift Eğrilikli	Kubbe (Küresel, Elipsoid, Paraboloid)	Tek Tabakalı		
			Çift Tabakalı		
		Hiperbolik Paraboloid	Tek Tabakalı		
			Çift Tabakalı		

Tek tabakalı uzay kafes sistemler ile çift tabakalı uzay kafes sistemler form ve yapı elemanlarında oluşan kesit tesirleri bakımından da birbirinden kuvvetli biçimde farklılaşır. Tek tabakalı kafes sistemler, özgün tasarımlar için çok farklı ve geçişken formlara izin verirken, çift tabakalı uzay kafes sistemler bu alanda zayıf kalır. Tek tabakalı kafes sistemler; hem serbest formlara müsaade etmesi, hem de malzeme, yazılım ve donanım teknolojilerinin gelişmesi sayesinde, çok daha geniş açıklıkların geçilebilmesine olanak kılmaktadır.

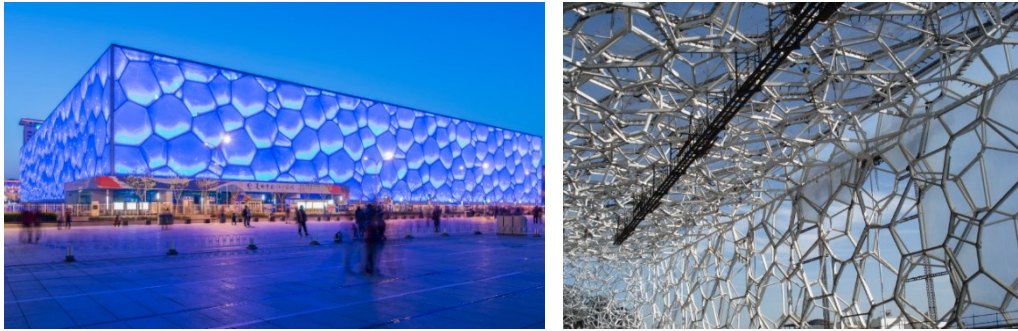
Tek tabakalı uzay kafes sistemlerin geçişken formlu modern örneklerine Şekil 2.1’de yer verilmiştir. Son yıllarda tek ve çift tabakalı sistemlerin kombinasyonları (Şekil 2.2) veya çift tabakalı sistemin çok tabakalı örnekleri de görülmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.1 Tek tabakalı uzay kafes sistemlere modern örnekler: (Soldaki) Jewel Changi Airport [5], Singapur ve (Sağdaki) Milan Trade Fair [6]



Şekil 2.2 Tek ve çift tabakalı uzay kafes sistemin birleşik örneği; Abu Dhabi Louvre Müzesi, BAE [7][8]



Şekil 2.3 Çift ve çok tabakalı uzay kafes sistem örneği; National Aquatics Center (Water Cube), Pekin / Çin [9][10]

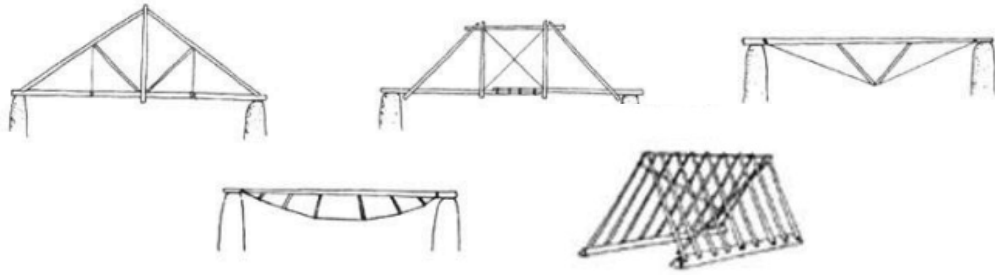
## 2.2 Tek Tabakalı Uzak Kafes Sistemlerin Tarihçesi

Tek tabakalı kafes sistemlerinin en ilkel kullanımlarına M.Ö.200'lü yıllarda rastlanmıştır. O dönemlerde yapı malzemesi olarak bambu kullanıldığı, kaynaklarda belirtilmektedir [11]. Önceleri yere düşey olarak sabitlenen bambu çubuk elemanlar daha sonra çeşitli şekillerde desteklenerek üzerine gelen yükleri daha kolay taşıyacak hale getirilmiştir. Eğilme momentine karşı koyması için üç farklı doğrultuda yerden desteklenerek rijitliği sağlanan ilk yapılarda; sonraları daha fazla rijitlik ve dayanım için demetler halinde çubuk eleman kullanımlarına başlanmıştır (Şekil 2.4).



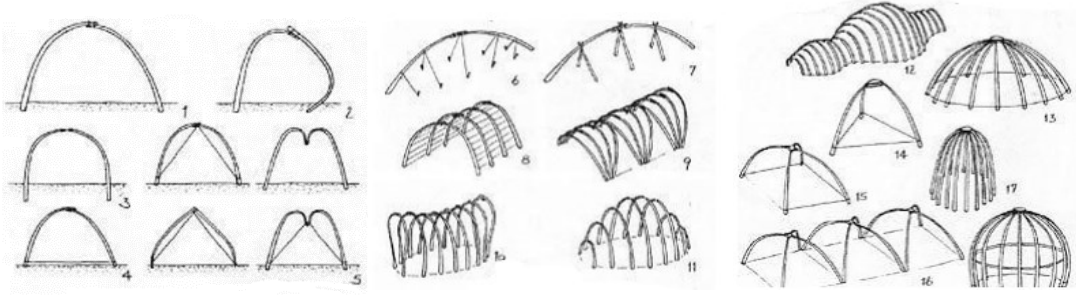
Şekil 2.4 Bambu malzemesi ile tasarlanan basit sistemler [11]

Tek bir düz çubuğun kullanımıyla başlayan ve karmaşık demetler ve birleşimlere doğru giden kronolojide, yapıların yük taşıma kapasiteleri de gitgide artmıştır. Destekli sistemlerin yanı sıra askılı sistemler de kullanılmaya başlanarak düşey çubuklara yatay ve çapraz olanlar da dahil edilerek çerçeve sistemler oluşturulmuş, bu şekilde köprü ve çatı yapımlarına başlanmıştır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Bambu malzemesi ile tasarlanan karmaşık sistemler [11]

Daha geniş açıklık ihtiyacının doğması ile birlikte eğilme talebini karşılayan tasarım ve malzemelere ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Mevcutta kullanılan çubuk elemanlara daha uzun çubuklar ve ip kullanımı dahil edilerek ideal yapı formları oluşturulmuştur (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Bambu malzemesi ile kafes sistemlere geçiş [11]

Roma'da 113-125 yılları arasında inşa edilmiş Pantheon Tapınağı'nın kubbesi (Şekil 2.7), günümüzde de donatısız beton ile geçilen en geniş açıklık kabul edilmektedir, yarı küre formundaki kubbede 43 m açıklık donatısız hafif beton ile geçilmiştir. Kubbenin üzerinde tuğlalardan bir basınç çemberi oluşturulmuştur, tabandan tepe noktasına doğru betonun kalınlığı azaltılmıştır. Etek kısmında ise çekme çemberi görevi yapan yedi sıra beton halka bulunmaktadır [12].



Şekil 2.7 Pantheon Tapınağı'nın dışarıdan [13] ve içeriden [14] görünüşü, Roma/İtalya

Betonarme yapı tasarım esaslarının geliştirilmesiyle, 20. yüzyılın ortalarında betonarme kubbe tasarımları gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8). P.L.Nervi bu tarz kubbelerin en başarılı tasarımcıları arasındadır.



Şekil 2.8 Palazetto Dello Sport [15] (Soldaki) ve Shine Dome [16] (Sağdaki)

Betonarme kabuklar, tasarım ve imalat zorlukları nedeniyle ve 19.yüzyılda yaşanan gelişmeler sonrasında; yerini 19. ve 20.yüzyılda çelik ve ahşap ayırık sistemlere bırakmıştır. Çubuk elemanlardan oluşan kubbe sistem konusunda, 19. yüzyıl başlarında önemli bir gelişme olmuş; dökme demir ve dövme demir kullanılan, nervürlü ve şeffaf geniş açıklıklı kubbe sistemi ortaya çıkmıştır. İlk örneği F.J. Belanger ve F.Brunet tarafından 1813'te tasarlanan Bourse de Commerce yapısının kubbesidir (Şekil 2.9). Bu yapı tek tabakalı sistemler için bir başlangıç noktası kabul edilmektedir .



Şekil 2.9 Bourse de Commerce kubbesinin dış ve iç görünüşü, Paris / Fransa [17]

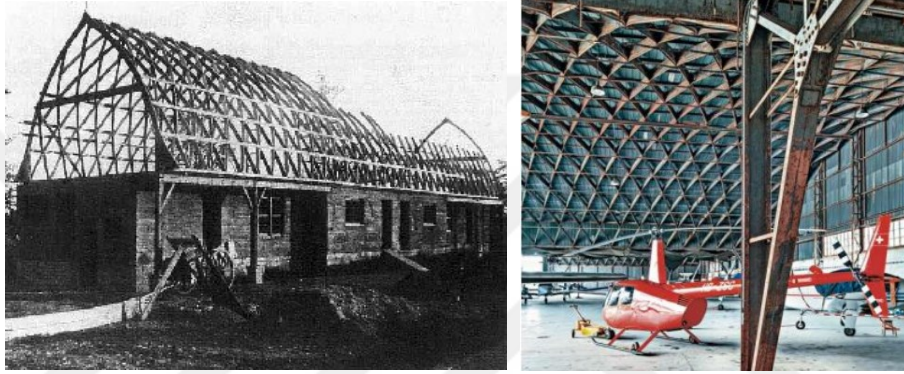
Dökme demirin ardından çeliğin de bu yapı sistemlerinde kullanılmasıyla birlikte, geniş açıklıkların çelik elemanlardan oluşan kubbeler ile örtüldüğü örnekler ortaya çıkmıştır.

19. yüzyılın ikinci yarısına gelindiğinde, Alman mühendis Johann Wilhelm Schwedler kendi adını verdiği kubbe biçimlerini tasarlamıştır. Bu kubbe biçimleri o dönemde ilk olarak gaz depoları için tasarlanmıştı. O yıllardan günümüze aktarılan en önemli örneklerden birisi de Berlin'de, şu anda lüks bir konaklama yeri olarak hizmet veren, eski gaz deposu Fichtebunker'dir (Şekil 2.10).

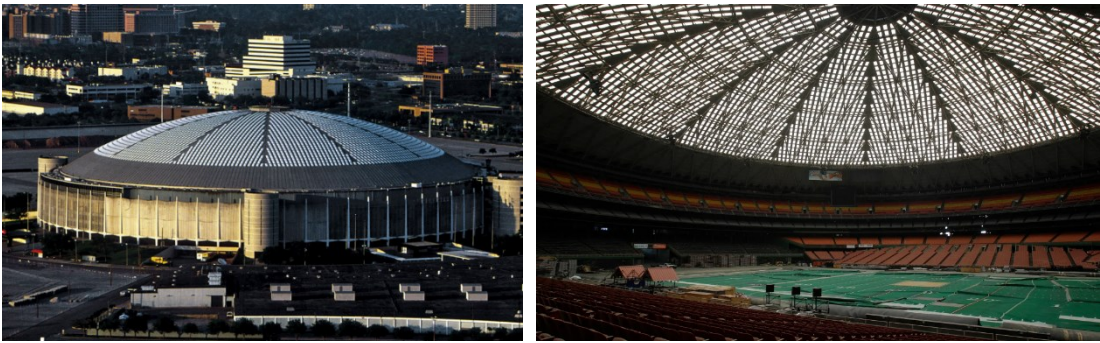


Şekil 2.10 Fichtebunker eski gaz deposu, Berlin / Almanya [18]

1906'da Friedrich Zollinger, lamella uzay kafes sistemini tasarlayarak ahşap malzeme ile silindirik kabuk sistemler oluşturmuştur (Şekil 2.11). 1925 yılında Huga Junkers, Zollinger'in tasarıma dayanarak oluşturduğu çelik lamella uzay kafes sistemin patentini almıştır. 40 m'ye kadar olan açıklıkların geçilebilmesini sağlayan bu tasarımda lameller yaklaşık 1,5-2,5 m uzunluğunda ve Zollinger'in sistemindekine benzer olarak 0,5 m genişliğindedir [19]. Dört lamel, bir noktada rijitlik sağlayacak şekilde çaprazlama birleşir. Zollinger ve Junkers'in tasarımları arasındaki en önemli farklar; kullanılan farklı malzemelerin yanı sıra, birleşim noktalarının tasarımıdır ve Junkers'in tasarımı Zollinger'in aksine tüm yönlerde rijitliği sağlamaktadır.



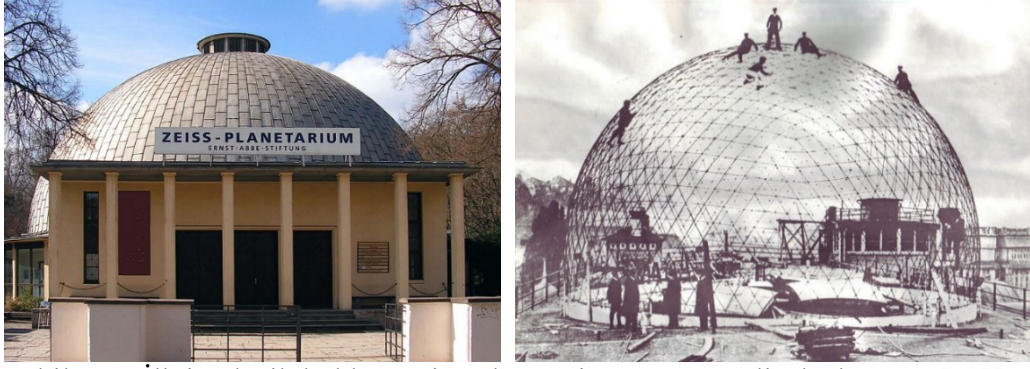
Şekil 2.11 Zollinger'in [20] (Soldaki) ve Junkers'in [21] (Sağdaki) lamella tasarımları 1962'de H.Lloyd ve W.B.Morgan isimli mimarlar ile Morris Architects firması tarafından tasarlanan; 1965 yılında açılan Astrodome (Şekil 2.12), modern lamella kubbelerin en önemli örneklerindedir. 220 m açıklıktaki yapının kubbesi çelik bir kafes üzerine inşa edilmiştir [22].



Şekil 2.12 Houston Astrodome, Teksas/ABD [22][23]

20. yüzyılda Alman mühendis W. Bauersfeld tarafından tasarlanan yarı küre formundaki Zeiss Planetarium, dünyanın ilk hafif ince kabuk betonarme kubbesi olurken bugünkü jeodezik kubbelerin de ilk örneği olma özelliğini taşımaktadır. 1924'de Berlin'de inşa edilen 40 m açıklık üzerindeki kubbe, 8000 demir çubuk eleman kullanılarak oluşturu-

rumuştur. Buckminster Fuller, Bauersfeld'in tasarımından 30 yıl sonra bu kubbe formlarını geliştirerek "jeodezik kubbe" ismini vermiştir (1954).



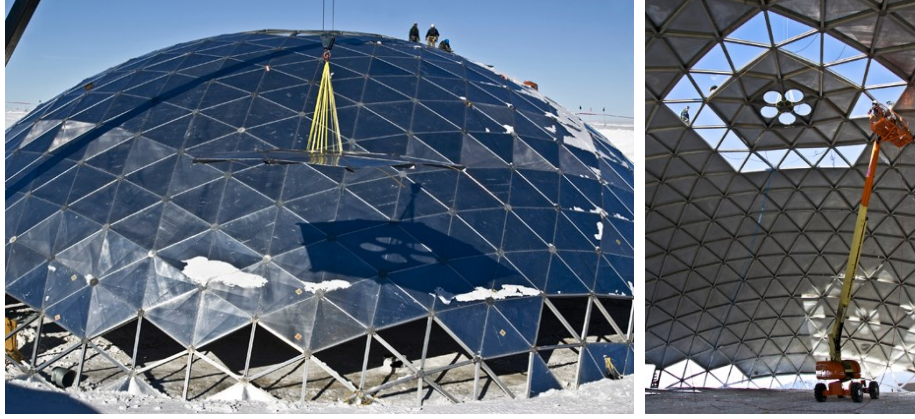
Şekil 2.13 İlk jeodezik kubbe; Zeiss Planetarium Jena, Berlin / Almanya [24][25]

20. yüzyılın sonlarına gelirken daha hafif ama dayanıklı malzeme arayışına girilmiştir, Diğer taraftan, lamella tarzı şeffaf kubbe tasarımı ve kare-dörtgen gözlerinde rijitliği sağlamak üzere kablo kullanımı da yine yenilikçi bir uygulamadır, Osaka Maritime Museum (2001) en iyi örneklerinden biridir (Şekil 2.14). Diğer bir gelişme de, alüminyum kubbe sistemlerin ortaya çıkması olmuştur. 1975 yılında alüminyum malzeme kullanılarak tasarlanan South Pole Dome bir tek tabakalı jeodezik kubbe örneği olarak verilebilir (Şekil 2.15). Günümüzde rastlanan kubbeler üç tip malzemeden yapılabilmektedir; bunlar cam ve paslanmaz çelik elemanlar, ahşap veya alüminyumdur.



Şekil 2.14 Osaka Maritime Museum, Japonya [26]



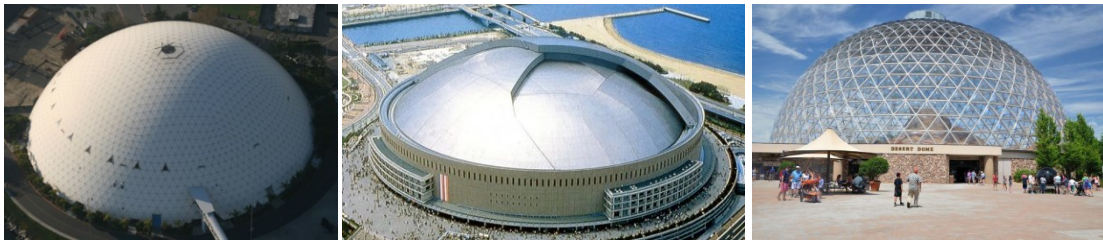


Şekil 2.15 South Pole Dome, Antarktika [27]

Grasshopper vb. parametrik modelleme algoritmalarının geliştirilmesi ve dönme açısından esnek aynı zamanda moment aktarabilen patentli düğüm noktalarının geliştirilmesi ile amorf modellerin tasarımı da mümkün hale gelmiştir.

1982 yılında inşa edilen 40 m yüksekliğinde ve 126 m çapındaki Spruce Goose Hangar Dome'un ana malzemesi alüminyumdur. Orijinal kullanım amacı uçak hangarı olmasıyken, yanı başında demirlemiş olan Queen Mary isimli tarihi gemi ile birlikte Long Beach'in simge yapılarından biri haline gelmiştir.

Dünya üzerindeki en büyük jeodezik kubbe, Japonya'da inşa edilen 216 m çaplı küre kapağı şeklindeki Fukuoka Yahuoku Stadyumu (1993)'nun çatısıdır. Bir diğer güncel örnek, Desert Dome (2002) ise dünya üzerindeki en geniş iç alan çölünün üzerini kaplayan cam kaplamalı kubbedir, Omaha şehrinin simge yapılarından. Betonarme taban üzerine jeodezik çelik kubbe olan yapıda kalın akrilik üçgen paneller kullanılmıştır. Kubbe yapı örnekleri sistem çeşitlerine göre bir sonraki bölümde detaylı incelenecektir.



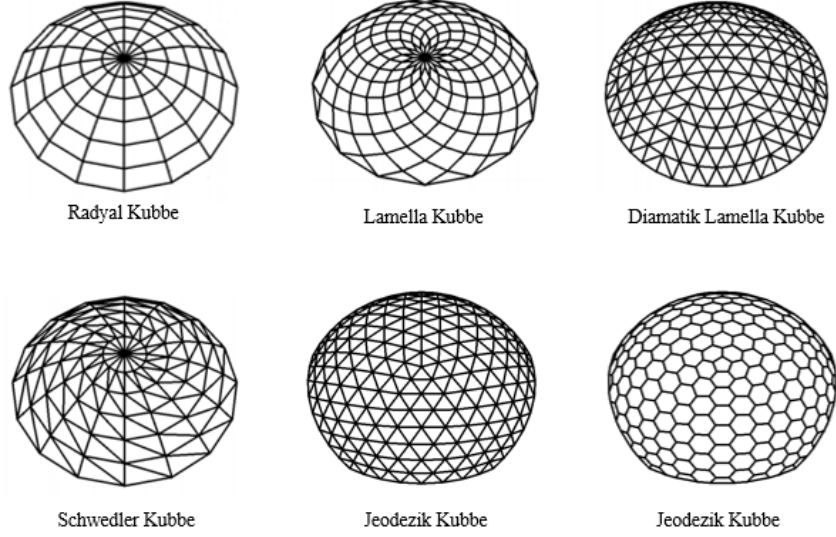
Şekil 2.16 Soldan sağa sırasıyla görseller; Spruce Goose Hangar Dome [28], Fukuoka Yahuoku [29] ve Desert Dome [30]

### 2.3 Tek Tabakalı Kubbe Sistemlerin Çeşitleri

Kubbeler, yapı alanında tarihin ilk yıllarından beri kullanılan en eski sistemlerdendir. Minimum yüzeyde maksimum hacim ve ekonomik malzeme kullanımı sağlarlar [3].

Geçmişten bugüne kubbeler yapının kendisi olabildiği gibi, örtücü/kapatıcı olarak yapıyı tamamlayıcı rolde de yer almıştır. İlk modern örneklerine ise Avrupa’da 19. yüzyıl başlarında rastlanmıştır.

En yaygın tek tabakalı kubbe tipleri Radyal, Schwedler, Lamella ve Jeodezik kubbe sistemleridir, tipik geometrik çizimleri Şekil 2.17’de gösterilmiştir [31].



Şekil 2.17 Geometrilere göre tek tabakalı kubbe çeşitleri [31]

### 2.3.1 Radyal Kubbe Sistemler

Nervürlü kubbe sistemleri olarak da bilinen radyal kubbe sistemler tarihteki en eski kubbe tiplerindendir. Radyal kubbeler, üstte bir basınç çemberi, altta bir çekme çemberi ve basınç çemberinden ışınal olarak uzanan nervürlerden oluşan kubbe biçimidir. Sistemde üçgen birimler yer almadığından; yapı stabilitesi, rijit birleşimler ile veya çapraz kablolar ile sağlanmalıdır. Basınç çemberinden uzanan nervürlerin ısı kaynaklı genişmeden etkilenmemesi için radyal doğrultuda düzenlenen ve yatay yer değiştirmeye izin veren kayıcı mesnetlere birleşmesi gerekmektedir [3]. Radyal kubbeler ahşap, çelik veya alüminyum malzemeden yapılabilir. En güncel radyal kubbe örneklerinden biri Yunanistan’da bulunan, 61 m açıklıklı Rodos Palace kubbesidir (Şekil 2.18).



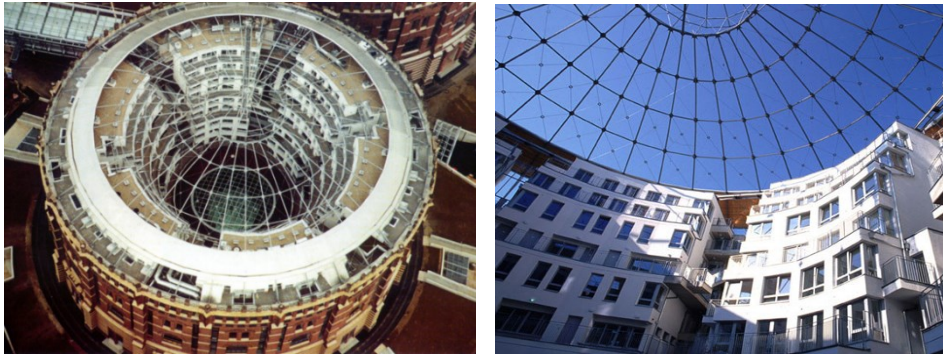
Şekil 2.18 Radyal kubbe örneği; Rodos Palace dışarıdan [32] ve içeriden [33] görünüşü, Yunanistan

### 2.3.2 Schwedler Kubbe Sistemler

Schwedler kubbe sistemleri, radyal kubbedeki gibi ışımsal uzanan nervürlerin kendi arasında bir ya da daha fazla sayıda eleman ile bağlanması durumunda oluşan kubbe formlarıdır.

Radyal kubbede her nervür tek bir eleman sayılırken, Schwedler kubbe tipinde nervürler diğer elemanlarla birlikte çalışır. Nervürler, kubbenin tepe noktasında yer alan basınç çemberine rijit ya da mafsallı, çekme çemberine genellikle mafsallı birleşir.

Schwedler kubbede stabilite sağlanması için, nervürler arasında çapraz bağlantılar kullanılmaktadır. Kubbede bulunan yatay halkalar ile meridyenlerin kesişiminden meydana gelen her dilim, başka bir çapraz eleman tarafından iki üçgen haline getirilir. Bazen üçgen yerine yamuk şeklinde dilimlere de ayrılabilir. Sistem, çaprazlar sayesinde asimetrik yüklerden dolayı oluşabilecek kesme kuvvetine karşı dayanıklıdır [3]. Çapraz elemanlar halka veya meridyen çubuklardan büyük ölçüde daha uzundur ve bu nedenle burkulma yüklerine karşı dayanıklı olmaları gerekir. Cam kaplamalı kubbelerde kullanım bulabilirken diğer kullanımlar için bu geometri, alternatif geometrilere kıyasla %20-30 daha ağır bir yapı oluşturmaktadır [34].



Şekil 2.19 Schwedler kubbe örneği; Gasometer C - Manfred Wehdorn (dışarıdan ve içeriden görünüş), Viyana / Avusturya [35]

### 2.3.3 Lamella Kubbe Sistemler

Lamella kubbe sistemler, birbirine benzer elemanların çok sayıda kullanılması ve küresel yüzey üzerinde baklava ya da elmas biçimi oluşturacak şekilde bir araya getirilmesiyle elde edilen kubbe formudur.

Lamella kubbe sistemlerin çubuk şeklindeki elemanları birbirine çapraz veya paralel yerleşimde olabilirler. Çubuk elemanların tamamının birbirine çapraz birleştiği lamella kubbelerde, çubuklar birbirleriyle eşkenar dörtgen dilimler oluşturacak şekilde birleşerek tepe bölgesinde basınç çemberine ulaşır. Saat yönünde veya saat yönünün tersine doğru uzanan kavisli bir görünümü vardır, ekvatorundan tepe noktaya doğru çıkıldıkça kubbeyi oluşturan eşkenar dörtgen dilimlerin boyutu küçülür.

Çubukların paralel yerleştirildiği lamella kubbeler ise daha simetrik ve birbirine benzeyen parçalardan oluşmakla birlikte kavisli görünümlü lamellada olmayan meridyenimsi çizgilere sahiptir. Bu tipteki lamella kubbeler oluşturulurken, kubbe öncelikle dairesel çizgiler (enlemler) aracılığı ile genellikle 6 ya da 8 katmana bölünür, sonrasında her bir katman paralel çubuklar ile kendi içinde önce eşkenar dörtgen şeklinde eşit bölümlere, sonra diğer yönde paralel çubuklar ile üçgen dilimlere ayrılır [3]. Bu tipteki lamella kubbeler Diamatik ya da Kiewitt kubbe olarak da adlandırılır. Bu tipteki kubbelerde elmasları bölerek, üçgenlerin oluşmasını sağlayan çubuk elemanlar aynı zamanda yapı stabilitesine de katkıda bulunur.

A.B.D’de sıklıkla kullanılan bir kubbe türü olan lamella kubbelerin en önemli özelliklerinden biri deprem ve rüzgar etkilerine karşı başarılı bir yapısal davranış göstermesidir [36].



Şekil 2.20 Kavisli lamella kubbe örneği; Reflect Grand Punta Cancun Kubbesi (dışarıdan ve içeriden görünüş), Meksika [37]



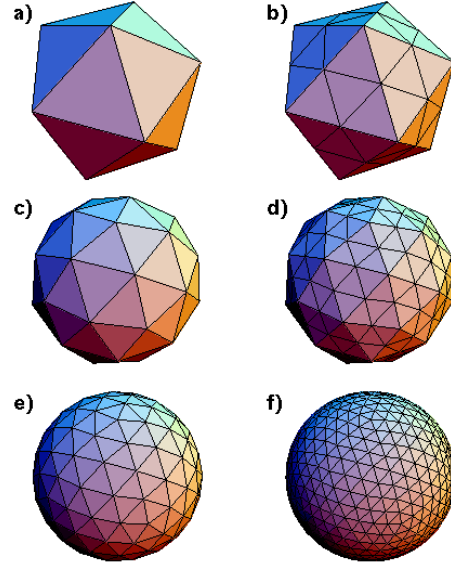
Şekil 2.21 Diamatik lamella kubbe örneği; Houston Astrodome, Teksas [38]

### 2.3.4 Jeodezik Kubbe Sistemler

20. yüzyıl'ın ortalarında Buckminster Fuller tarafından tasarlanan jeodezik kubbelerin daha sonraları C60 karbon molekülü geometrik formuyla aynı olduğu tespit edilmiş ve bu molekül sınıfına Fulleren sınıfı ismi verilmiştir. Küre ya da yarı küre formdaki yüzeylerde, birbiriyle eş olan üçgen hücrelerin oluşturulmasıyla meydana getirilen jeodezik kubbeler sadece üçgen değil, altıgen hücre formlarından da oluşabilir. Jeodezik kubbelerin çalışma prensibinde de bu hücrelerin dayanımından yararlanır. Mevcuttaki taşıyıcı sistemlerin çalışma mantığından bambaşka bir yaklaşımla ortaya konulan jeodezik kubbeler, küre ya da yarı küre şeklindeki kabukları oluşturan elemanların birbiriyle etkileşimi ve sahip olduğu simetrik özellikleri sayesinde, yüklerin eşit olarak aktarıldığı bir sisteme sahiptir. Kubbe, bir yarı küre olmadığı sürece taban genellikle üniform değildir. Ayrıca, jeodezik örüntü de küresel kubbelerle sınırlıdır [34]. Fuller; jeodezik kubbelerin, atom ve kristal yapıya benzeyen yapısal özellikleri sayesinde, en verimli yapısal tasarım şekli olduğunu ifade eder. Pratikte jeodezik kubbelerin verimlilik açısından birçok avantajı vardır. Bölme yöntemi sayesinde eleman tip sayısı azalır, çubuk uzunluklarının birbirine yakın olması sağlandığından imalat, nakliyat ve montaj işlemlerinde tasarruf sağlanır. Kubbe tasarımında kullanılan diğer yöntemlere göre deprem, kar ve rüzgar yüklerine karşı dayanımları daha yüksektir. Mimari olarak da hem estetik görüntü açısından hem de akustik açıdan en ideal formlardan biridir [39].

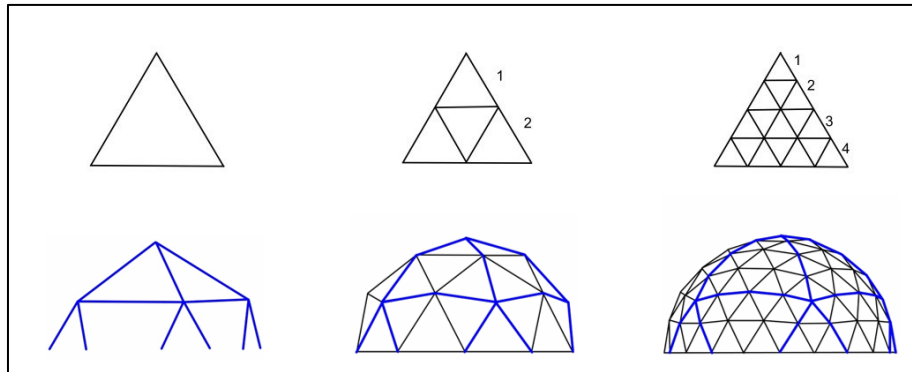
Jeodezik kubbeler varsayımsal bir küre içerisine yerleştirilmiş düzgün çokyüzlüler (polyhedron) olarak da tarif edilmektedir. Platon'a göre doğada bilinen beş adet düzgün çokyüzlü form vardır ve bütün tasarımlar bu beş formdan meydana gelir [40]. Bunlar

düzgün dörtyüzlü (tetrahedron/üçgen piramit), düzgün altıyüzlü (hegzahedron/küp), düzgün sekizyüzlü (oktahedron), düzgün onikiyüzlü (dodekahedron) ve son olarak düzgün yirmiyüzlü (ikosahedron) cisimlerdir. Fuller'in tasarladığı jeodezik kubelerde ikosahedronlardan faydalanılır [41]. İkosahedronları oluşturan üçgen yüzeyler içinde yeni eş üçgen yüzey bölümlendirmeleri oluşturularak yeni düzgün çok yüzlü form elde edilir. Yüzeyde istenilen form elde edilene kadar bu bölümlendirme işlemine devam edilir (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 İkosahedrondan jeodezik küresel forma geçiş aşamaları [42]

İkosahedronun üçgen yüzeyleri içerisinde oluşturulan her bir bölümlendirme işlemi frekans terimini oluşturur [3]. Bir başka şekilde ifade etmek gerekirse, ikosahedronun tek bir üçgen yüzeyi ele alındığında bu şeklin frekansı 1 iken, bölümlendirme sonra bu üçgen yüzeyin kenarlarında ikişer yeni üçgen kenarı belirmiş olduğundan frekans 2 olur. Dilimleme işlemi Şekil 2.23'te görselleştirilmiştir.



Şekil 2.23 Jeodezik kubbe sistemlerinde dilimler ve frekansların gösterimi [43]

Jeodezik kubbeler bir örnek olarak Nagoya Dome, Japonya'nın popüler bir beyzbol takımının stadyumu olarak 1997 yılında inşa edilmiştir ve dünyanın en büyük ikinci jeodezik kubbesi olma özelliği taşır (Şekil 2.24). Yarıçapı 144 m olan bir küre kapağı şeklinde olan Nagoya Dome taban çapı yaklaşık 190 m'dir. Küre kapağının tabandan yüksekliği yaklaşık 33 m, kubbenin oturduğu betonarme döşemeli çelik yapının yerden itibaren yüksekliği de 31 m'dir; böylece yerden toplam yükseklik 64 m olmuştur. Küre kapağının yüksekliğinin taban çapına oranı 0,175 olup kubbe oldukça basıktır. Bu şekilde büyük ve basık formdaki kubbelerin tek tabakalı uzay kafes olarak inşa edilebilmesi için, deprem ve burkulmaya karşı yeterli güvenliğin sağlanması gereklidir [44]. Burkulma güvenliği-nin sağlanması için de öncelikle vurgu stabilitesinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Yapımı yaklaşık 2,5 yıl süren bu jeodezik kubbe, dörder üçgenden oluşan kenar uzunluğu 20 m olan küresel eşkenar üçgen elemanların birleştirilmesi ile, alt çekme halkasından başlanarak yukarıya doğru inşa edilmiştir. Kubbenin orta kısmında ~5000 m<sup>2</sup> lik alan ortamın ışık alması için camla kaplanmıştır.



Şekil 2.24 Jeodezik kubbe örneği; Nagoya Dome, Japonya [45] [46]

Florida'da bulunan Salvador Dali Müzesi (Şekil 2.25), güncel jeodezik kubbe uygulamalarına bir başka örnek olarak verilebilir. Novum Structures tarafından 2011 yılında tasarlanan amorf formdaki yapı 2400 m<sup>2</sup> genişliğinde bir alanı kapsamaktadır.



Şekil 2.25 Salvador Dali Museum, Florida/ABD [47]

### TEK TABAKALI UZAY KAFES SİSTEMLER VE ANALİZ ESASLARI

#### 3.1 Tek Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerde Birleşimler

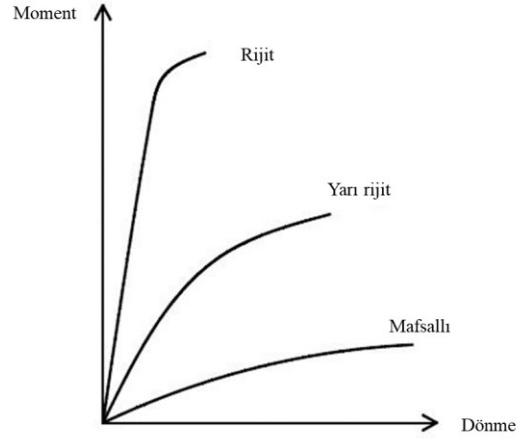
Tek tabakalı uzay kafes sistemlerde kullanılacak malzeme detayları ve birleşim şekilleri yapıların mimari ve mühendislik tasarımlarını belirlemektedir.

Açıklık mesafesi ve yük aktarımının nasıl olması gerektiğine bağlı olarak, tek tabakalı uzay kafes sistemlerde tercih edilecek birleşim tipi ve birleşim şekilleri değişkenlik göstermektedir.

Uzay kafes sistemlerde kullanılan birleşimler, genel olarak mafsallı birleşimler ve moment aktaran birleşimler olarak iki gruba ayrılır (Şekil 3.1):

- Mafsallı birleşimlerde eğilme momenti sıfır veya sıfıra yakındır, birlikte birleşen elemanlarının görelî dönme hareketine izin veren bir birleşim tipidir.
- Moment aktaran birleşimler ise, rijit moment aktaran ve yarı rijit (elastik) moment aktaran birleşimler olarak iki sınıfa ayrılır. Rijit birleşimlerde; birleşen elemanlar arasındaki görelî dönme hareketinin tam olarak sınırlandırıldığı varsayımı yapılmaktadır. Diğer bir deyişle; düğüm noktası, görelî dönme hareketinin sıfır olmasını sağlayacak yeterli rijitlik ve dayanıma sahip olmalıdır. Yarı rijit birleşimlerde ise, birleşen elemanlar arasındaki dönme hareketi tam olarak sınırlandırılmamıştır (Şekil 3.1). Rijit ve yarı rijit birleşimli sistemlerde malzeme ve geometri açısından doğrusal olmayan davranış hesaba katılmalıdır, ancak analizleri oldukça zorlaştıracak bir unsurdur.





Şekil 3.1 Birleşim tiplerinin moment-açısal yer değiştirme grafiği [48]

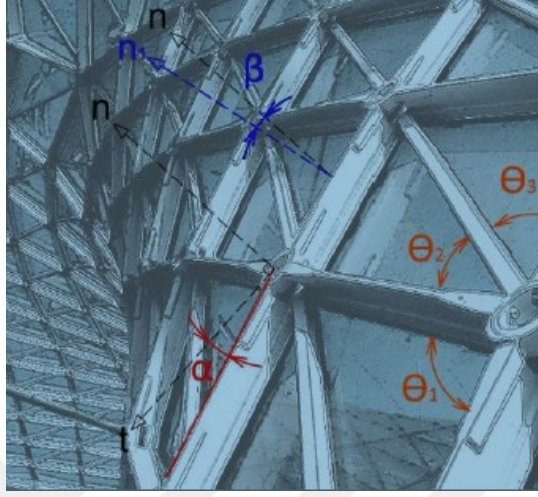
Tez kapsamında yapı elemanlarının doğrusal elastik; birleşim noktalarının ise yarı rijit davranış sergileyeceği, malzeme açısından doğrusal- elastik sınırlar içinde kaldığı kabul edilmiştir.

TÇYY’de, moment-açısal yer değiştirme ilişkisinin analitik veya deneysel olarak belgelen-mesi gerektiği; ancak bu şekilde birleşimlerin öngörülen görece dönme hareketini sağlayacak yeterli dayanım, rijitlik ve şekildeğiştirme kapasitesine sahip olacağı belirtilmektedir [49].

### 3.2 Tek Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin Birleşim Tipleri

Tek tabakalı uzay kafes taşıyıcı sistemlerin optimum maliyet ve sürelerde üretim ve montajının yapılması için en kritik konuların başında birleşim noktalarının tasarımı gelir. Tek tabakalı uzay kafes sistemlerinde kullanılacak birleşim noktalarını sınıflandırmak genel anlamda zordur, geometrik özellikleri açısından farklılık gösteren çok sayıda tip mevcuttur. Dünya genelinde yapılmış olan bir araştırma çalışmasına göre 250 çeşit birleşim şekli kullanımı veya önerisine rastlanmıştır. Ancak bunların büyük bir kısmının tasarımının karmaşık olması nedeniyle başarılı bir tasarım olup olmadığı kanıtlanamamıştır [3].

Birleşim sisteminde dikkate alınacak üç açı vardır. Düğüm noktasına birleşen iki komşu çubuk arasındaki açı  $\theta$  açısıdır. Düğüm noktasının teğeti ile o noktaya birleşen çubuk elemanın kenarının yaptığı düşey açı  $\alpha$  açısıdır. Son olarak, çubuk elemanın normali ile birleşim noktasının normali arasındaki açı da dönme açısı  $\beta$  olarak adlandırılır (Şekil 3.2).



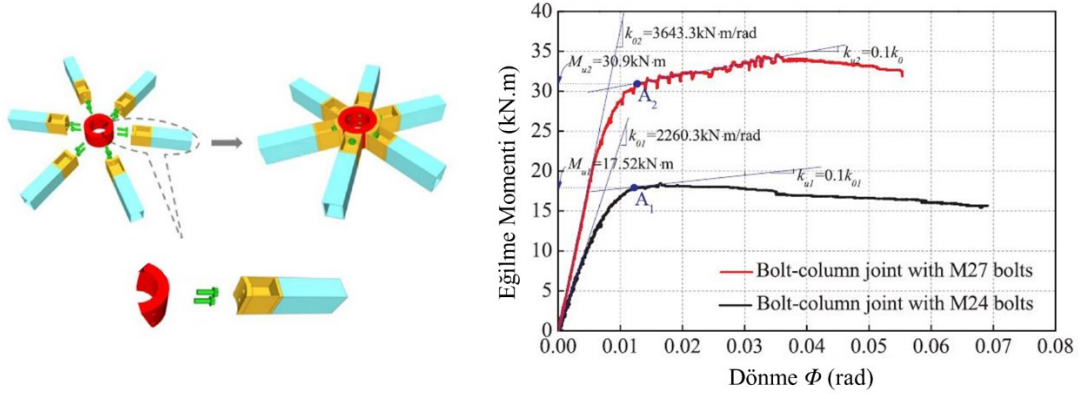
Şekil 3.2 Birleşimlerde açılarının gösterimi [39]

Birleşimler kaynaklı ya da bulonlu olarak yapılabilmektedir.

- Kaynaklı birleşimler, yüksek rijitliği nedeniyle tasarımı daha kolay bir seçenek gibi durmaktadır. Ancak imalat ve montaj aşamaları; hem işçilik, hem maliyet hem de zamanlama açısından oldukça zorlayıcıdır.

- Bulonlu birleşimler uygulama unsurları açısından avantajlıdır (Şekil 3.3). Bulonlu birleşimlerde kullanılan bulonlar, yüksek mukavemetli ve öngerilmeli olmaktadır. Bulonlu sistem belirli bir rijitliğe sahip olmakla birlikte, kaynaklı birleşim kabulü yapılacak kadar da dönme sınırlaması yoktur. Düğüm noktasının eğilme momenti kapasitesi, o düğüm noktasına birleşen çubuklardaki aksenal kuvvet düzeyinden doğrudan etkilenmektedir. Kapalı kutu forma sahip elemanlar, yanal burulmalı burkulma problemlerine karşı tercih edilmektedir [50]. Deneyler ya da nitelikli sonlu eleman programları ile moment-dönme etkisi gerçekçi biçimde tanımlanır.

Abaqus programı ile pek çok modelin düğüm noktası davranışı incelenmiş; bulon çapının, başlangıç eğilme rijitliği ve moment taşıma kapasitesine önemli etkisi olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.3) [51]. Global stabilitenin yanı sıra lokal stabilite kontrolü de yapılmaktadır, azaltılmış eleman rijitlikleri ve geometrik kusurların analize dahil edilmesi ile, Doğrusal Burkulma Yöntemine göre 4,6 olan kritik yük katsayısı, 3,22'ye kadar düşmektedir [50].



Şekil 3.3 Bulonlu birleşim (Soldaki) ve Bulon çapına göre düğüm noktasında başlangıç eğilme rijitliği ve eğilme momentinin değişimi (Sağdaki) [51]

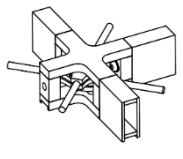
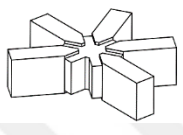
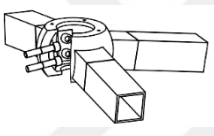
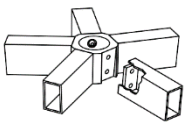
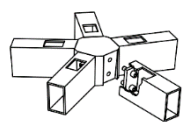
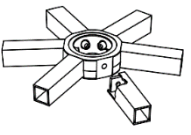
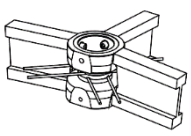
Tek tabakalı uzay kafes sistemlerde, hem görsel hem de emniyet açısından başarılı olabilecek birleşim şekli çözümünü bulmak önemlidir. Tek tabakalı uzay kafes sistemlerin birleşimleri iki şekilde oluşturulabilir:

- Uçtan ekli
- Ek levhalı

Uçtan ekli birleşimler, ek levhalı birleşim şekline göre yüklerin aktarımı açısından daha iyi bir performansa sahiptir [52]. Uçtan ekli birleşimler, bulonlar veya kaynak ile oluşturulabilir. Yedi tane uçtan ekli birleşim şekli alternatifi mevcuttur. Bunlar SBP-4, WABI-1, OCTA-1, MERO-1, MERO-2, MERO-3 ve MERO-4'tür [52]. Birleşim şekillerine ait detaylar Çizelge 3.1'de verilmiştir.

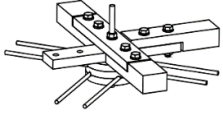
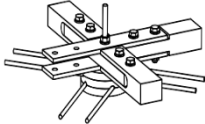
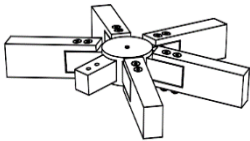
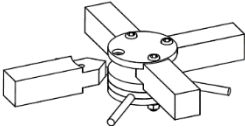
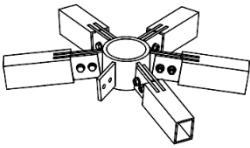
Sistem açılarının adaptasyonu açısından SBP-4 en dezavantajlı birleşim türüdür; OCTA-1 ve MERO tipi birleşimlerde sistem açıları adaptasyonu iyi veya çok iyi seviyededir. Yük aktarımları konusunda tüm birleşimler iyi veya çok iyi derecede uyum gösterirken, eğilme momentlerinin aktarımı konusunda MERO-3 tipi birleşim, diğerlerine kıyasla dezavantajlıdır.

Çizelge 3.1 Uçtan ekli birleşim şekillerine dair detaylar [52]

Birleşim Şekli ve Türü			Sistem Açıları			Yük Aktarımı		Yapı Türü	
			Yatay Açı $\theta$	Düşey Açı $\alpha$	Dönme Açısı $\beta$	Normal Yük	Eğilme Momenti	Geometrik olarak optimize edilmiş	Yapısal olarak optimize edilmiş
SBP-4		KUE	+	+	O	+++	+++	Evet	Hayır
WABI-1		KUE	++	++	+	+++	+++	Hayır	Hayır
OCTA-1		BUE	++	+++	++	++	++	Hayır	Hayır
MERO-1		BUE	++	++	+	++	++	Evet	Hayır
MERO-2		BUE	++	+++	++	++	++	Hayır	Hayır
		KUE	++	+++	++	+++	+++	Hayır	Hayır
MERO-3		BUE	++	++	++	++	+	Hayır	Evet
		KUE	++	+++	++	++	++	Hayır	Hayır
MERO-4		BUE	++	++	+	++	++	Hayır	Hayır
		KUE	++	+++	++	+++	+++	Hayır	Hayır
BUE: Bulonlu uçtan ekli KUE: Kaynaklı uçtan ekli			O: Sınırlı uyum ++: İyi Uyum			+: Yeterli uyum +++: Mükemmel Uyum			

Ek levhalı birleşimler, birleşim elemanları ve çubuk elemanlar arasına eklenen plakalar yardımı ile, kayma gerilmelerini aktaracak bulonlar veya kaynaklama yöntemi kullanılarak oluşturulabilir. Beş tane ek levhalı birleşim şekli alternatifi mevcuttur. Bunlar SBP-1, SBP-2, SBP-3, HEFI-1 ve POLO-1'dir [52] (Çizelge 3.2). Ek levhalı birleşimler içerisinde açılarının adaptasyonu ve yük aktarımları açısından SBP-1 ve SBP-2 diğerlerine göre dezavantajlıdır. SBP-2, SBP-1'e göre daha iyi yük ve eğilme momenti aktarımı sağlamaktadır.

Çizelge 3.2 Ek levhalı birleşimlere dair detaylar [52]

Birleşim Şekli ve Türü			Sistem Açıları			Yük Aktarımı		Yapı Türü	
			Yatay Açı $\theta$	Düşey Açı $\alpha$	Dönme Açısı $\beta$	Normal Yük	Eğilme Momenti	Geometrik olarak optimize edilmiş	Yapısal olarak optimize edilmiş
SBP-1		BEL	+	+	O	+	O	Evet	Evet
SBP-2		BEL	+	+	O	++	+	Evet	Evet
SBP-3		BEL	++	++	++	++	++	Hayır	Hayır
HEFI-1		BEL	++	+	+	++	++	Evet	Evet
POLO-1		BEL	++	++	++	++	++	Hayır	Hayır
BEL: Bulonlu Ek Levhalı			O: Sınırlı uyum ++: İyi Uyum			+: Yeterli uyum +++: Mükemmel Uyum			

### 3.3 Tek Tabakalı Uzak Kafes Sistemlerde Stabilite

Tek tabakalı uzak kafes sistemlerin yeterli güvenlik ve stabilite koşullarını sağlaması için; yapıların tasarım, analiz ve montajları; yeterli rijitlik ve dayanımlara sahip olmasını sağlayacak şekilde yapılmalı ve stabilite kaybı yaratabilecek unsurların kontrolünün tamamlanması gereklidir.

Tek tabakalı uzak kafes sistemlerde stabilite kaybının meydana gelme sebepleri şu şekilde tanımlanmıştır [53]:

- Eleman Burkulması: Bir elemanda meydana gelecek dayanım kaybında dahi, kısmi ya da genel çökme meydana gelebilir. Eğilme rijitliğinin yeterli düzeyde olmasıyla bu olumsuz durumdan kaçınılabilir.
- Düğüm Noktası Kararsızlığı: Düğüm noktasına bağlı elemanlardan gelen aksel yük, dış yük ile dengelenmemiş olmasından dolayı, komşu düğümler arasında büyük yer değiştirmeler oluşabilir, bu durum vurgu stabilitesi (*snap-through*) olarak nitelendirilir, geometrik bakımdan doğrusal olmayan davranış sınıfına girer.
- Şerit Kararsızlığı: Aynı halka üzerindeki tüm düğüm noktaları ve elemanlarda meydana gelen dayanım kaybıdır.
- Genel Burkulma : Eş zamanlı olarak pek çok düğüm noktasındaki dayanım kaybıdır.

#### 3.3.1 Burkulma Analizi

Burkulma analizi; doğrusal ve doğrusal olmayan olmak üzere ikiye ayrılır.

##### • Doğrusal Burkulma Analizi

Özdeğer Burkulma Analizi burkulma hesapları için en temel yöntemdir, yapı elemanının burkulmasına neden olacak yük belirlenir (Denklemler 3.1). Ancak sözkonusu burkulma yükü değerine ulaşmadan, malzemenin elasto-plastik davranışı ve geometrik ön kusurlardan dolayı yapı stabilitesi kaybolmakta ve göçme meydana gelmektedir. Vurgu stabilitesinin (düğüm noktasında ani rijitlik kaybı) incelenmesi için bu yöntem yeterli değildir.

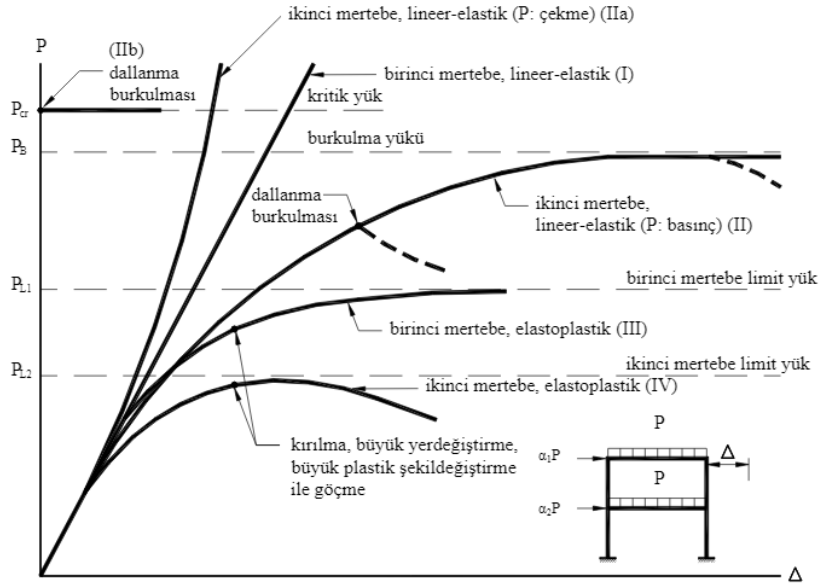
$$([K_E] + \lambda_i [K_{GO}])\{X_i\} = \{0\} \quad (3.1)$$

Denklemlerde;  $[K_E]$ : Rijitlik matrisi,  $[K_{GO}]$ : Gerilme rijitliği matrisi,  $[\lambda_i]$ :  $i$ 'inci öz değer,  $\{X_i\}$ :  $i$ 'inci yer değiştirme öz vektörü'ni ifade etmektedir.

## • Doğrusal Olmayan Burkulma Analizi

Özdeğer burkulma analizine göre çok daha gerçekçi bir hesap yoludur. Gelişen bilgisayar yazılımları, malzeme ve geometrik açıdan doğrusal olmayan davranışın dikkate alınmasına imkan sağlar.

Yapı sistemlerinin, artan dış yükler altında, doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerinden elde edilen yük parametresi-yer değiştirme grafiği Şekil 3.4'te açıklamalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Çeşitli teorilere göre yük parametresi – yer değiştirme bağıntıları [54]

Yapının ikinci mertebe analizinde çoğunlukla Newton-Raphson yöntemi kullanılsa da elasto-plastik davranışın hesaba katıldığı analizlerde, yükleme süresi boyunca düğüm noktasının davranışını en iyi gösteren Arc-Length Yöntemidir<sup>1</sup>.

Yapı basıklığı ve açıklığının artması ile, global ve yerel burkulmanın yanında; düğüm noktasında, geometrik kusurlara son derece duyarlı olan vurgu stabilitesi (snap-through) problemi de açığa çıkmaktadır. Şekil 3.5'te 1 ve 2 numaralı kritik noktalar arasında kalan bölge, doğrusal olmayan dengesizlik bölgesi olarak tanımlanır [55]. 1 numaralı kritik yük düzeyindeki ani burkulma, sistem tekrar denge noktasına gelene kadar büyük bir yer değiştirmeye neden olmaktadır.

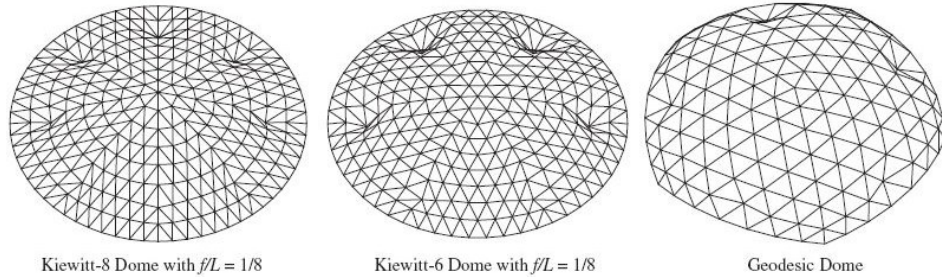
<sup>1</sup> Amorf formlu tek tabakalı uzay kafes çelik sistemlerde, sınırları zorlayan birleşimler uygulanabilmektedir. Her yükleme adımında yük dengesinin sağlanıp yeni rijitlik matrisinin kurulmasında Newton-Raphson Yönteminin eksiklikleri olabilmektedir.



Şekil 3.5 Vurgu stabilitesi yük - yer değiştirme gösterimi [55]

Tek tabakalı uzay kafes sistemlerin ikinci derece elasto-plastik davranışı (Şekil 3.4, IV eğrisi) son yıllarda dikkat çeken bir konudur. Tek tabakalı uzay kafes sistemlerde, geometrik parametreler burkulma modunu etkilemektedir. Kiewitt kubbelerde olduğu gibi, jeodezik kubbelerde de küçük yükseklik/açıklık oranında ( $1/7-1/8$ ) düğüm noktalarındaki düşey yer değiştirmeler artış gösterip, vurgu stabilitesi problemi olasılığı artmaktadır.

Fan vd. [56] 'nin yaptıkları bir çalışmada, dikkate alınan modellerde düğüm noktaları rijit varsayılmıştır. Doğrusal olmayan denge denklemlerinin çözümü için Arc-Length metod kullanılmıştır. Düğüm noktası burkulması 3. halkadan başlayıp mesnete doğru artmaktadır (Şekil 3.6). Yükseklik/açıklık oranı  $1/5-1/6$  olan kubbelerde ise burkulma 2. halkada oluşmaktadır.

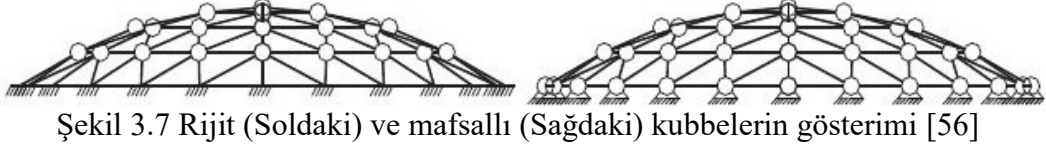


Şekil 3.6 Basıklık oranı küçük ( $1/8$ ) olan Kiewitt ve Jeodezik kubbelerde burkulmanın gösterimi [56]

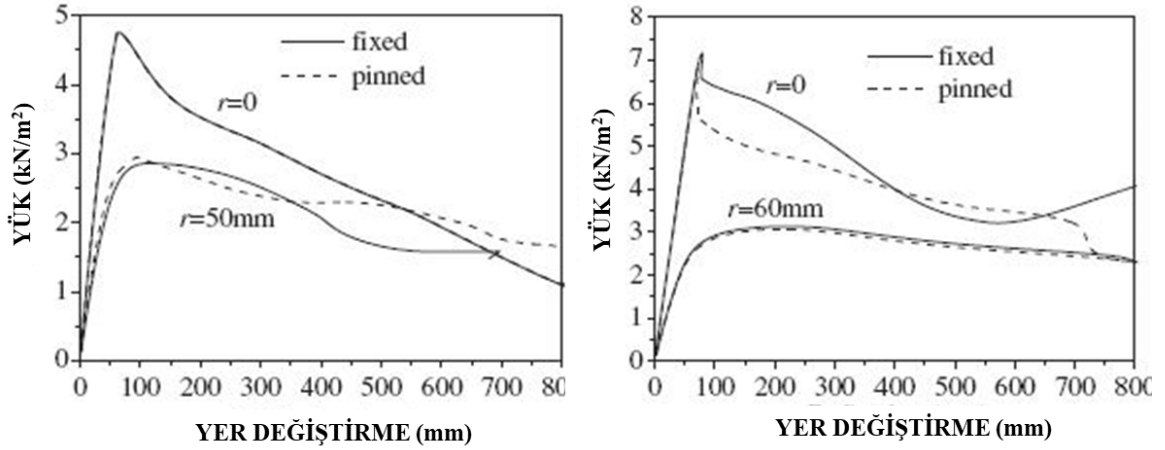
Ayrıca Fan vd. [56], rijit ve mafsalı birleşimlere sahip Kiewitt, Jeodezik, Schwedler, Sunflower ve Radial Rib tipi tek tabakalı uzay kafes sistemlerde çeliğin elasto-plastik davranışını dikkate alarak; farklı geometrik başlangıç kusurları ve yükleme durumlarına göre kritik burkulma yükünü de incelemiştir. Mesnetlenme şekillerinin ankastre veya



mafsallı oluşunun, kubbelerin elasto-plastik burkulma yükünde ufak farklılıklar oluşturduğu belirtilmiştir. Kubbelere uygulanan yükten kaynaklanan yer değiştirme miktarı, kubbelerdeki geometrik ön kusurun ( $r$ ) mertebesine göre Şekil 3.8'deki gibi farklılaşmaktadır.

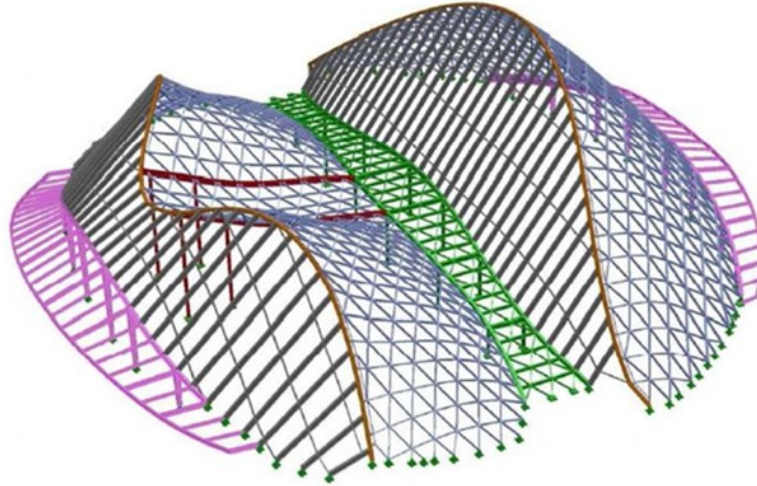


Şekil 3.7 Rijit (Soldaki) ve mafsallı (Sağdaki) kubbelerin gösterimi [56]



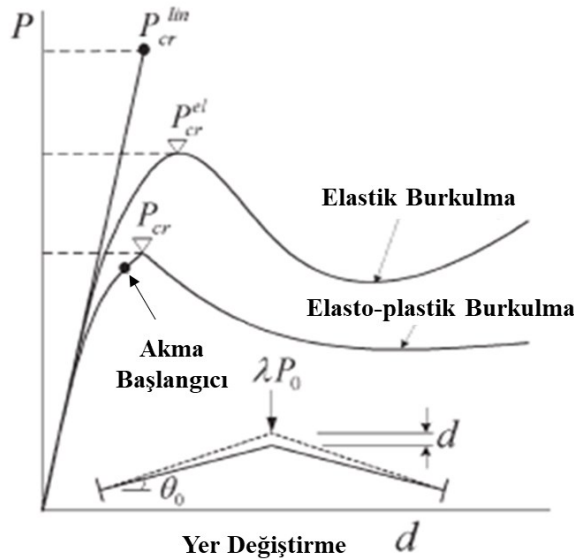
Şekil 3.8 Kiewitt (Soldaki) ve jeodezik (Sağdaki) kubbelerin mesnetleme şartlarına göre elasto-plastik burkulma yükünün gösterimi [56]

Stephan vd. [50], Shanghai EXPO Pavilion yapısı (Şekil 3.9) özelinde yaptığı çalışmada; bu projede, bulonlu birleşimin sahip olduğu avantajlardan dolayı tercih edildiğini, hem deneysel hem de kapsamlı sayısal analizlerden geçirildiğini; her iki analiz türü ile bulunan değerlerin makul seviyede yakınlık gösterdiğini belirtmiştir. Geliştirilen ampirik formül, tasarım mühendislerine yarı rijit düğüm noktasının rijitlik hesabında kolaylık getirilmiştir.



Şekil 3.9 UAE Pavilion, Şanghai [50]

Kato vd. yapı elemanlarının kesit narınlığının tek tabakalı kubbelerin davranışına etkisini incelemiş, ayrıca doğrusal elastik burkulma yükü ile doğrusal olmayan elasto-plastik burkulma yükünün değişimini göstermiştir [57]. Geometrik doğrusal olmayan davranış dikkate alındığında kritik burkulma yük değeri düşmektedir; malzemenin doğrusal olmayan davranışı da dikkate alındığında bu değer daha da azaldığı belirtilmiştir.



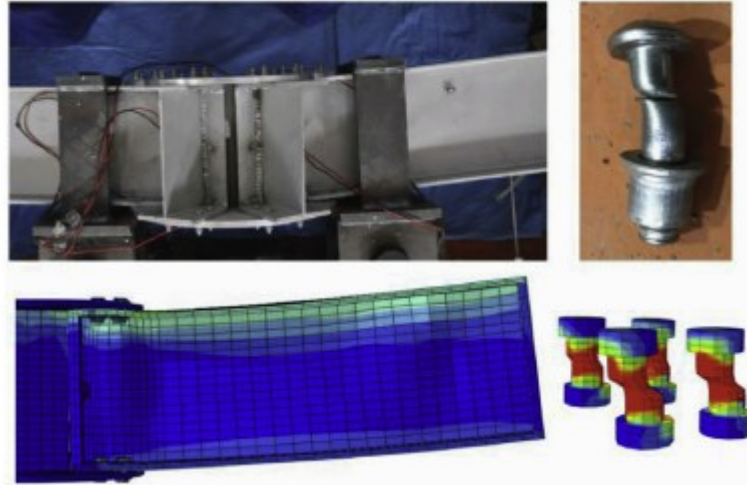
Şekil 3.10 Yük altındaki tek tabakalı kubbelerin yük- yer değiştirme grafiği [57]

Tek tabakalı kafes sistemlerin tasarımında alüminyum malzemesinden oluşan eleman ve düğüm noktalarının son yıllarda yaygınlaşması ile konu ile ilgili çalışmalar çoğalmıştır. Ma vd.'nin yaptıkları çalışmaya göre, alüminyum düğüm noktaları, hem aksenal yük hem de eğilme momenti kapasitesi açısından çelikten oluşturulmuş muadillerine göre dezavantajlıdır. Abaqus programı kullanılarak yapılan nümerik çalışmalar ve

laboratuvarda gerçekleşen deneyler ile geliştirilmiş tamperli düğüm bölgelerinin geleneksel olan alüminyum birleşimlere kıyasla nasıl davranış sergileyeceği incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda tek tabakalı alüminyum kafes sistemlerde kullanılan güçlendirilmiş tamperli birleşimin eksenel yük açısından 2,3 kat, eğilme momenti kapasitesi açısından ise %52,7 oranında daha güçlü bir davranış sergilediği tespit edilmiştir [58].



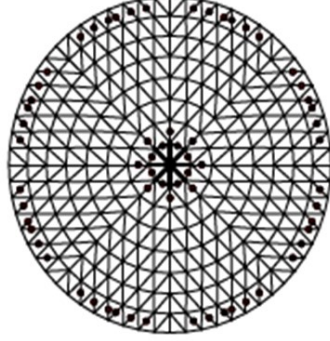
Şekil 3.11 Shanghai Bilim ve Teknoloji Müzesi, Çin [58]



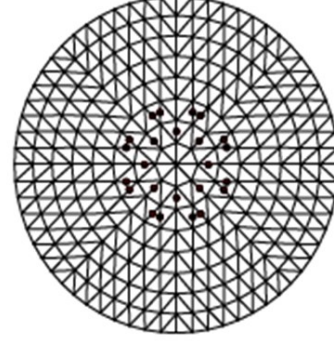
Şekil 3.12 Düğüm noktası davranışının deneysel ve analiz sonuçları gösterimi [58]

Wei ve Gao'nun Kiewit-8 (Diamatik) kubbelerde yaptıkları çalışmada elasto-plastik analizleri gerçekleştirilen rijit düğüm noktalı kubbelerin basırlık oranına göre oluşan plastik mafsalsayısı ve dağılımı ile, gerçekleştirilen analizlerin çok modlu statik itme analizi ile zaman tanım alanında gerçekleştirilmesi durumundaki farklılıklar incelenmiştir. Yapının basırlık oranı 1/6 ve üzeri olması durumunda elasto-plastik davranışların gözlemlendiği, basırlık artıkça bu plastik deformasyonun arttığı tespit edilmiştir [59]. Basırlık artıkça iki farklı metodun verdiği sonuçlar arasında farklılık

artarken, elemanların elastik sınırdaki kaldığı basıklık durumunda ( $1/5 < \dots$ ) çok modlu statik itme analizi ile zaman tanım alanında yapılan analizlerin %2 oranına varan yakınlıkta sonuçlar verdiği belirtilmiştir.



$$H/D = 1/7$$



$$H/D = 1/6$$

Şekil 3.13 Farklı basıklıktaki diamatik kubbelerde plastik mafsalların dağılımı [59]

Güneş ışınımı nedeniyle geniş açıklıklı tek tabakalı yapılarda doğrusal olmayan sıcaklık etkileri oluşur. Zhao vd., bu sıcaklık etkisinden oluşan kesit tesirlerinin doğru belirlenmesi için nümerik analizler gerçekleştirmiş ve Yujiabu İstasyonunda yaklaşık bir yol boyunca yapısal takip yürütmüştür. Çelik malzeme lokasyonun sıcaklığından, ETFE türü membran ile kaplanan alanlarda  $20^{\circ}\text{C}$  kadar daha az etkilenmekte olup; cam örtü ile kaplı kısımlarda  $5^{\circ}\text{C}$  kadar daha az etkilenmektedir. [60]. ETFE membran örtülerin yapısal çelik elemanlarda sıcaklık farkından dolayı oluşacak kesit tesiri değerlerinde cama nazaran daha elverişli sonuçlar verdiği belirtilmiştir.



Şekil 3.14 Yujiabu Station kubbesi, Çin [60]

### PARAMETRELERİN TANITILMASI

#### 4.1 Amaç ve Kapsam

Tez kapsamında incelenecek olan kubbelere etki eden sabit, kaplama, servis, sıcaklık, kar, deprem ve rüzgar yüklerinin sayısal değerleri hesaplanacak ve modellere girilerek her bir kubbe tipi için analizler gerçekleştirilecektir. Söz konusu amaçla analizlerde kullanılan ve sonuçları karşılaştırılacak olan yönetmelikler aşağıda listelenmiştir.

- TBDY - 2018: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018 [61]
- Türkiye Çelik Yapılar Yönetmeliği: Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları, 2016 [49]
- TS EN 1991-1-3: 2009 Yapılar Üzerindeki Etkiler - Bölüm 1-3: Genel etkiler, kar yükleri [62]
- TS EN 1991-1-4: 2005 Yapılar Üzerindeki Etkiler - Bölüm 1-4: Genel etkiler, rüzgar etkileri [63]
- ANSI-AISC 341-16: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, 2016 [64]
- ANSI-AISC 360-16: Specification for Structural Steel Buildings, 2016 [65]
- ASCE-7-16: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2016 [66]

#### 4.2 Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) ve Yük Birleşimleri

Çelik yapılar için iki ana tasarım yöntemi bulunmaktadır. Bunlar,

- Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT): Tüm elemanlar için güvenli dayanımın, GKT yük birleşimleri altında hesaplanan gerekli dayanım değerine eşit veya daha

büyük olması prensibine dayanır [49]. Tüm yük türleri için aynı değişkenlik derecesi kabul edilir.

- Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarımdır (YDKT): Her yükleme için farklı yük katsayıları kullanılır (Çizelge 4.1 ve 4.2). Böylece olasılık analizine dayalı [67][68] daha gerçekçi bir güvenlik seviyesi sağlanmaktadır. Bu yöntemde aşırı yükleme olasılığı da dikkate alınır.

Araştırmalara göre çelik yüksek yapıların, GKT yerine YDKT ile tasarlanması ~%7 düzeyinde malzeme ekonomisi sağlamaktadır [69].

Çizelge 4.1 YDKT yöntemi tasarım koşulları

$$R_u \leq \phi R_n$$

$R_u$ : Yük birleşimleri için hesap ile belirlenmiş gerekli dayanım,  $R_n$ : Karakteristik dayanım,  $\phi$ : Dayanım katsayısı,  $\phi R_n$ : Tasarım dayanımı.

Çizelge 4.2 TÇYY’de yer alan YDKT yöntemine göre yük birleşimleri<sup>1</sup> [49]

I.	1,4 G
II.a.	1,2 G + 1,6 (Q <sub>r</sub> veya S veya R)
II.b.	1,2 G + 1,6Q + 0,5 (Q <sub>r</sub> veya S veya R)
III.	1,2 G + 1,6 (Q <sub>r</sub> veya S veya R) + (Q veya 0,8W)
IV.	1,2 G + 1,0Q + 0,5 (Q <sub>r</sub> veya S veya R) + 1,6W
V.	1,2 G + 1,0Q + 0,2S + 1,0E
VI.	0,9 G + 1,6W
VII.	0,9 G + 1,0E

G: Sabit yük, Q: Hareketli yük, Q<sub>r</sub>: Çatı hareketli yük, S: Kar yükü, R: Yağmur yükü, T: Sıcaklık değişmesi ve/veya mesnet çökmesi etkileri, H: Yatay zemin basıncı, zemin suyu basıncı veya yığılı madde basıncı, W: Rüzgar yükü, E: Deprem etkisi’ni ifade etmektedir.

<sup>1</sup> F akışkan madde basınç yükünün mevcut olması halinde I-IV sayılı birleşimlerde bu yük G yükünün katsayısı ile birleşime girecektir. H yatay kuvvetinin mevcut olması halinde, bu etki gerekli dayanımı arttıracak yönde ise 1,6 katsayısı ile; gerekli dayanımı azaltacak yönde olması halinde ise 0,9 katsayısı ile birleşime girecektir.

H yatay kuvvetinin deprem etkisini içeren yük birleşimlerine katkısı TBDY kapsamında değerlendirilecektir.

T sıcaklık değişmesi ve/veya mesnet çökmesi etkilerinin mevcut olması halinde, bu etkiler gerekli dayanımı arttıracak yönde ise 1,0 katsayısı ile tüm birleşimlere girecektir.

TBDY ve ASCE yönetmeliklerine göre deprem etkisini içeren yük birleşimleri ise Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Deprem etkisini içeren yük birleşimleri

$$1,2 G + 1,0 Q + 0,2 S + E_d^{(H)} + 0,3 E_d^{(Z)}$$
$$0,9 G + H + E_d^{(H)} - 0,3 E_d^{(Z)}$$

$E_d^{(Z)}$  düşey (Z) doğrultudaki depremin etkisi altında tasarıma esas deprem etkisi,  $E_d^{(H)}$  ise doğrultu birleştirmesi uygulanmış tasarıma esas yatay deprem etkisini ifade etmektedir.

İncelenen örnekler bazında dikkate alınan yüklerin hesabı bu bölümün ilerleyen kısımlarında verilecektir.

### 4.3 Genel Analiz Metodu ile Stabilité Tasarımı

Çelik yapılar çoğunlukla stabilite sınır durumlarına göre tasarlandığı için stabilite kavramı yapı tasarımında oldukça önem taşımaktadır. Lokal bir kararsızlık ya da sistemdeki bir elemanda meydana gelen burkulma, yapıda lokal göçmeye neden olabilir. Bu nedenle gerçek yapı davranışlarını modelleyip kararsız yapı davranışlarını minimuma indireyecek stabilite analizi gereklidir.

Genel Analiz Metodu malzeme dayanımındaki kaybı ve geometrideki ikinci mertebe etkileri hesaba kattığı için ve gelişen bilgisayar teknolojisi sayesinde kolaylıkla stabilite hesaplarında kullanılan metottur. Tez kapsamında Genel Analiz Metodu ile stabilite tasarımı yapılmıştır.

Genel Analiz Metodunun 3 temel uygulama kuralı vardır.

- Geometrik koşullar açısından doğrusal olmayan davranışı dikkate almak için ikinci mertebe etkileri hesaba katılmalıdır
- Malzemedeki inelastik etkilerin hesaba katılabilmesi için eksenel ve eğilme rijitliklerinde azaltım yapılması gereklidir.
- Geometrik ön kusurların hesaba katılabilmesi için ya doğrudan yer değiştirmiş konuma göre hesap yolu ya da fiktif yükler tanımlanıp ilgili yük birleşimlerine dahil edilmelidir. Fiktif yük yolunun kullanılabilmesi için 4.1 nolu denklemden faydalanılabilir. TÇYY'de yapısal analiz esaslarında belirtildiği üzere, fiktif yük YDKT yük birleşimine eşit olacağı için, formülasyon içindeki  $\alpha = 1$  alınmalıdır [49].

$$N_i = 0,002\alpha Y_i \quad (4.1)$$

Denklemden  $N_i$ : i. katta uygulanan fiktif yük,  $Y_i$ : i. katta uygulanan düşey yük'ü ifade etmektedir.

Haddeleme veya kaynak işleminden sonra, çelik elemanın kesiti soğumaya başlar. Önce kenar lifler, sonra geri kalan kısımlar soğumaya başlar; soğumuş olan kenar lifler sayesinde daha iç kısmın büzülmesi önlenir. Bu durum, kesitte çekme ve basınç gerilmelerinin oluşmasına neden olur [70]. Açığa çıkan artık gerilmeler, eleman ve dolayısı ile yapının rijitliğinde azalmaya neden olur ve bu etkiler nedeniyle stabilite azalır. Bu nedenle, eleman dayanım gereksinimleri için azaltılmış rijitlikler kullanılır [71]. Rijitlik azaltma kuralları Çizelge 4.4'te listelenmiştir.

Çizelge 4.4 Rijitlik azaltma kuralları [71]

- Yapının stabilitesine etkisi bulunan tüm rijitlikler 0,80 sabiti ile çarpılır ve bu şekilde yapının rijitliğinin tamamına azaltım uygulanmış olur.
- Yapının stabilitesine etkisi olan tüm eğilme rijitliklerine  $\tau_b$  ilave katsayısı uygulanır.  $P_r$  İkincil merteye aksel kuvvet dağılımı'nı ifade etmektedir.

$\frac{\alpha P_r}{P_r} > 0,5$	$\tau_b = 1$
$\frac{\alpha P_r}{P_r} > 0,5$	$\tau_b = 4 \times \left(\frac{\alpha P_r}{P_y}\right) \times \left(1 - \frac{\alpha P_r}{P_y}\right)$

- Mevcut yatay yüklerin  $\frac{\alpha P_r}{P_r} > 0,5$  koşulu altında  $N_i = 0,001Y_i$  olarak tanımlanan fiktif yük artırımı koşulu ile  $\tau_b$  katsayısı 1 alınabilir.

Yamada vd. [72], düşey yükler altında rijit birleşimli tek tabakalı uzay kafes kubbelere, geometrik kusurların doğrusal olmayan burkulma davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışma kapsamında, burkulma analizi için rijitliği azaltılmış elemanlarla yapılan analiz ile yapının davranışında geometrik kusurlardan oluşacak doğrusal olmayan davranış konusunda gerçekçi hesaplamalar yapılabileceği belirtilmiştir.

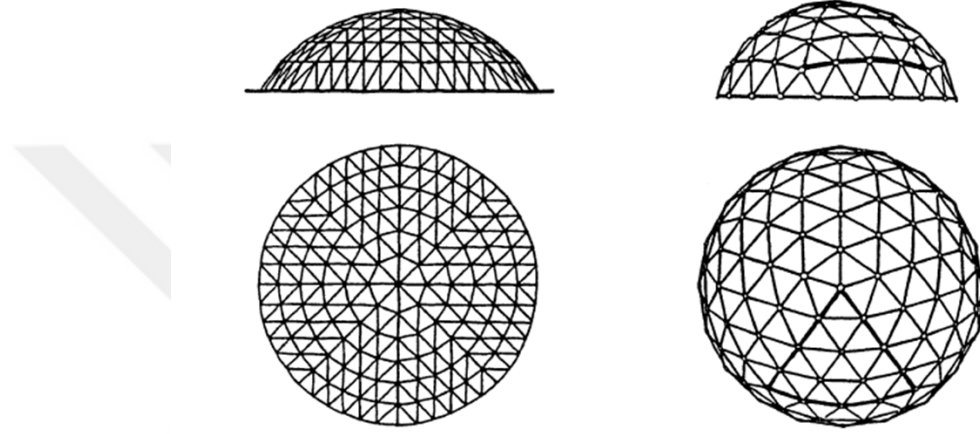
#### 4.4 Tek Tabakalı Uzay Kafes Kubbe Analiz Esasları

Çalışmada incelenecek olan uzay kafes sistemlerinin özellikleri, karşılaştırma unsurları, uygulanacak yönetmelikler ve analizlerde dikkate alınacak yüklere bu bölümde değinilmiştir.



#### 4.4.1 Genel Açıklamalar ve Çalışmada İncelenen Yapı Türlerinin Açıklanması

Bu bölümde; analizlere konu olacak tek tabakalı uzay kafes kubbelerin özellikleri, kullanılacak yöntemler ve karşılaştırma unsurları incelenmiştir. Analizler için, uygulamada en çok yer bulan iki kubbe tipi, Diamatik ve Jeodezik kubbe, seçilmiştir (Şekil 4.1). Doğayı taklit eden minimum yüzey alanı ile maksimum hacme sahip Jeodezik kubbe; iç kuvvetler, yer değiştirmeler ve maliyet kriterleri bakımından Diamatik kubbe ile karşılaştırılmaktadır.



Şekil 4.1 Diamatik kubbe (Soldaki) ve jeodezik kubbenin (Sağdaki) önden ve üstten görünüşü [3]

Kubbe tipi seçimi ve tasarımında; geçilecek açıklık, basıklık oranı, düğüm noktası tasarımı ve maliyet, tasarımı yönlendiren en önemli parametrelerdir. Bu çalışmada patentli bir yarı rijit düğüm noktası ile tasarlanan, 1/3 ve 1/6 basıklık oranına sahip 40 ve 70 m açıklıklı sözkonusu iki tip kubbe Bölüm 4.1’de tanımlanan yük birleşimlerine göre incelenmektedir. Seçilen kubbe tipleri diamatik ve jeodezik kubbedir. Depremden ötürü meydana gelen atalet ve rüzgar etkisine karşı üstünlükleri, özellikle jeodezik kubbenin doğayı taklit eden minimum yüzey alanı ile maksimum hacmin sağlaması dolayısı ile ekonomiklik gibi etkenler çalışmalarda bu iki tipin tercih edilmesini sağlamıştır. Bu çalışma kapsamında basıklık oranının stabiliteye olan etkisi de araştırılacaktır. Kar, rüzgar, deprem yüklerinin hesabında ve analizlerde, TS-EN ve ASCE Standartları kullanılmış, analiz sonuçları detaylı karşılaştırılmıştır.

#### 4.4.2 Taşıyıcı Sistem ve Kaplama Yükleri

Yapı için yüksek sismik hareketlerin olduğu bölge olarak; İstanbul ili, Bakırköy ilçesi tercih edilmiştir.

Tek tabakalı uzay kafes kubbede; akma gerilmesi 355 MPa olan S355JR sınıfı çelik malzemesi ile ana yapı oluşturulurken; kaplama için cam sınıfı malzeme, kolonlar için ise C40 betonu ve B420c yapısal çelik malzemesi kullanılmıştır. Yapıda kullanılan çeliğin birim hacim ağırlığı ( $\gamma_{\text{çelik}}$ ) 78,5 kN/m<sup>3</sup> kabul edilmiştir.

Kaplama, lamine cam olarak tercih edilmiştir ve kaplama yükü denklem 4.2’de belirtilen bağıntıya göre ( $g_{\text{cam}}$ ) = 0,55 kN/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır<sup>1</sup>.

$$g_{\text{cam}} = \gamma_{\text{cam}} \times t \quad (4.2)$$

Birleşim elemanları, her bir düğüm noktasında 0,29 kN noktasal yük olarak dikkate alınmıştır.

Olası bir ilave yüklemeyi dikkate almak için ek servis yükü ( $g_{\text{serv}}$ ) = 0,15 kN/m<sup>2</sup> olarak tanımlanmıştır.

“20°C” sıcaklık farkının elemanlarda yaratacağı kesit tesirlerinin bulunmasını sağlayacak “T” kombinasyonu yönetmeliklerde belirtilen kombinasyonlara uygun şekilde eklenmiştir.

#### 4.4.3 Yapıya Etkiyen Deprem Yükleri

Deprem yükleri modele Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) ve Amerikan yönetmeliğine göre (ASCE-7-16) hesaba katılmıştır.

##### 4.4.3.1 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’ne (TBDY-2018) Göre Deprem Yükleri

- Modelde yapılar aşağıdaki kabullere göre analiz edilecektir:

DD-2 olarak bahsi geçen, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan deprem yer hareketi düzeyine göre analiz yapılacaktır.

Yerel zemin sınıfı “B” kabulü yapılmıştır.

- Çalışma sahası<sup>2</sup> için AFAD’da yer alan harita üzerinden elde edilen boyutsuz spektral ivme katsayıları;  $S_S = 1,217$  ve  $S_1 = 0,331$  olarak bulunmuştur (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3).

<sup>1</sup> Camın elastisite modülü  $E = 70.000$  MPa; poisson oranı 0,23 ve birim hacim ağırlık  $\gamma_{\text{cam}} = 25$  kN/m<sup>3</sup> Lamine cam şu katmanlardan oluşmaktadır:

Tamamen temperli cam (FT): 8 mm , Hava boşluğu: 20 mm, Isı ile güçlendirilmiş cam (HT): 6 mm  
PVB ara katman: 1,52 mm , Isı ile güçlendirilmiş cam: 8 mm; Toplam cam kalınlığı  $t = 22$  mm.

<sup>2</sup> Haritada işaretlenen coğrafi koordinatlar; enlem için 40.982586° ve boylam için 28.817207° dir.

- Yerel zemin sınıfları ve yerel zemin sınıflarına bağlı olarak alınacak olan yerel zemin etki katsayıları  $F_S$  ve  $F_1$  sırası ile Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de verilmiştir. Yerel zemin etki katsayıları tablolarında harita spektral ivme katsayılarının ara değerleri için doğrusal enterpolasyon yapılabileceği belirtilmiştir.
- Tasarım spektral ivme katsayıları denklem 4.3 ve 4.4’e göre  $S_{DS} = 1,217 \times 0,9 = 1,095$  ve  $S_{D1} = 0,331 \times 0,8 = 0,265$  olarak hesaplanmıştır.

$$S_{DS} = S_S \times F_S \quad (4.3)$$

$$S_{D1} = S_1 \times F_1 \quad (4.4)$$

- Yapıların deprem hesabında eşdeğer deprem yükü yöntemi kullanılmıştır. Bir model aynı zamanda Mod Birleştirme Yöntemi ile de incelenmiştir.
- Herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için Yatay Elastik Tasarım Spektrum’u grafiğinde (Şekil 4.4) düşey eksenini oluşturan  $S_{ae}(T)$ ,  $T$ ’ye bağlı olarak yerçekimi ivmesi ( $g$ ) cinsinden denklem 4.5’te tanımlanmıştır.  $T_A$  ve  $T_B$  ise denklem 4.6 ile tanımlanır. Serbest yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu ( $T_L$ ) 6 s alınacaktır. Model için oluşturulan yatay elastik tasarım spektrumu grafiği Şekil 4.5’te verilmiştir.

$$\begin{aligned} S_{ae}(T) &= \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_A}\right) S_{DS} & (0 \leq T \leq T_A) \\ S_{ae}(T) &= S_{DS} & (T_A \leq T \leq T_B) \\ S_{ae}(T) &= \frac{S_{D1}}{T} & (T_B \leq T \leq T_L) \\ S_{ae}(T) &= \frac{S_{D1} T_L}{T^2} & (T_L \leq T) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Eşitliklerde;  $S_{ae}(T)$ : Yatay elastik tasarım spektral ivmeleri,  $T$ : Doğal titreşim periyodu,  $T_A$ ,  $T_B$ : Yatay tasarım spektrumu köşe periyotları’nı ifade etmektedir.

$$T_A = \left(0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}}\right) ; T_B = \left(\frac{S_{D1}}{S_{DS}}\right) \quad (4.6)$$

- Herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için Düşey Elastik Tasarım Spektrum’u grafiğinde (Şekil 4.6) düşey eksenini oluşturan  $S_{aeD}(T)$ , yatay deprem yer hareketi için tanımlanan kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı ve  $T$ ’ye bağlı olarak yerçekimi ivmesi ( $g$ ) cinsinden denklem 4.7’de tanımlanmıştır.  $T_A$  ve  $T_B$  ile  $T_{LD}$  ise denklem 4.8’de belirtildiği gibi tanımlanır. Model için oluşturulan düşey elastik tasarım spektrumu grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir.

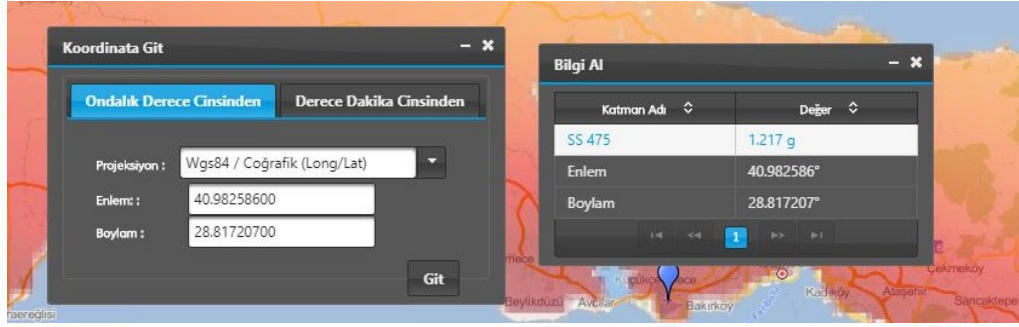
$$\begin{aligned}
S_{aeD}(T) &= \left(0,32 + 0,48 \frac{T}{T_{AD}}\right) S_{DS} & (0 \leq T \leq T_{AD}) \\
S_{aeD}(T) &= 0,8 S_{DS} & (T_{AD} \leq T \leq T_{BD}) \\
S_{aeD}(T) &= 0,8 S_{DS} \frac{T_{BD}}{T} & (T_{BD} \leq T \leq T_{LD})
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Eşitliklerde;  $S_{aeD}(T)$ : Düşey Elastik Tasarım Spektral İvmeleri,  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_{LD}$ : Düşey spektrum köşe periyotları'nı ifade etmektedir.

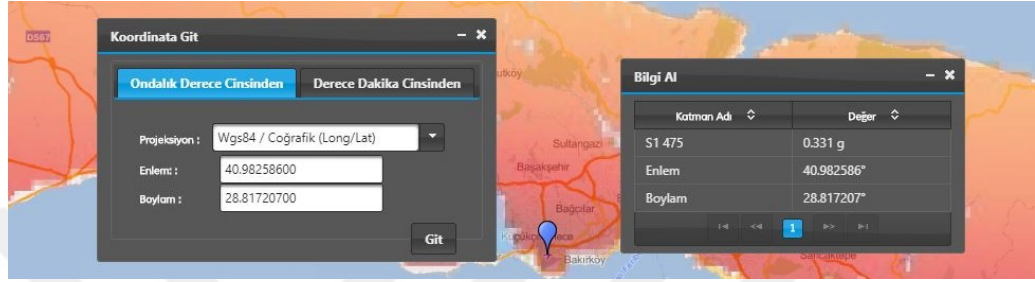
$$T_{AD} = \left(\frac{T_A}{3}\right), T_{BD} = \left(\frac{T_B}{3}\right), T_{LD} = \left(\frac{T_L}{2}\right) \tag{4.8}$$

- Çizelge 4.8'e göre Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R) "3", Dayanım Fazlalığı Katsayısı da (D) "2" alınmıştır.
- Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da görüldüğü gibi X ve Y yönleri için eşdeğer deprem yükleri programa tanımlanmıştır.
- Düşey deprem hesabında spektrum tanımlamak dışında bir diğer yöntem olan, yönetmelikte bulunan ve denklem 4.9'da ifade edilen yol da kullanılabilir. Eşdeğer deprem yüküne göre yapılan modellerde bu denklem kullanılmıştır. MBY ile farkı görmek adına hesaplanan tek modelde düşey spektrum kullanılmıştır. Yapı önem katsayısı, yapıların işyeri olarak kullanılacağı varsayıldığı için Çizelge 4.9'a dayanarak "1" alınmıştır.

$$E_d^{(Z)} \approx \left(\frac{2}{3}\right) S_{DS} G \tag{4.9}$$



Şekil 4.2 S<sub>s</sub> Değeri hesaplaması [73]



Şekil 4.3 S<sub>1</sub> Değeri hesaplaması [73]

Çizelge 4.5 Yerel zemin sınıfları tablosu [61]

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		(V <sub>s</sub> ) <sub>30</sub> [m/s]	(N <sub>60</sub> ) <sub>30</sub> [darbe/30 cm]	(C <sub>u</sub> ) <sub>30</sub> [kPa]
ZA	Sağlam, sert kayalar	>1500	-	-
ZB	Az ayrışmış, orta sağlam kayalar	760-1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrışmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360-760	>50	>250
ZD	Ortasıkı- sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180-360	15-50	70-250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya PI > 20 ve > %40 koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası (c <sub>u</sub> < 25 kPa) içeren profiller	<180	<15	<70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.) 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli (PI>50) killer, 4) Çok kalın (>35) yumuşak veya orta katı killer			

Çizelge 4.6 Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Kat Sayısı  $F_s$  [61]

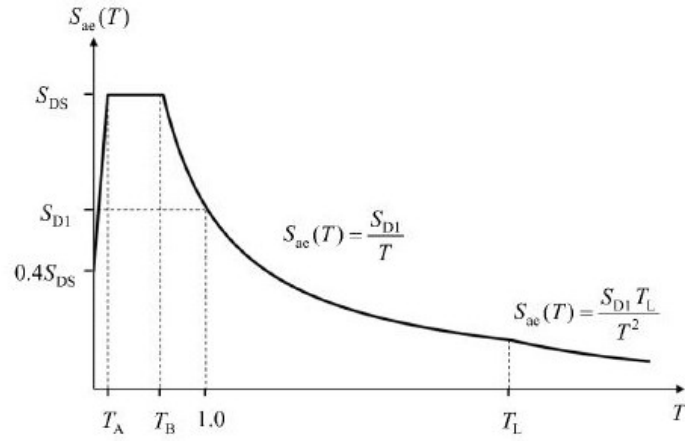
Yerel Zemin Sınıfı	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.5$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır					

Çizelge 4.7 1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı  $F_1$  [61]

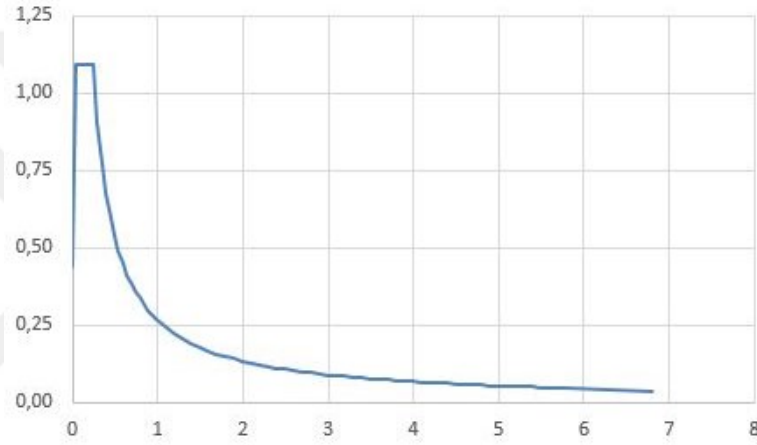
Yerel Zemin Sınıfı	$S_1 \leq 0.25$	$S_1 = 0.5$	$S_1 = 0.75$	$S_1 = 1$	$S_1 = 1.25$	$S_1 \geq 1.5$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır					

Çizelge 4.8 Bina taşıyıcı sistemleri için Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı, Dayanım Fazlalığı Katsayısı ve izin verilen bina yükseklik sınıfları [61]

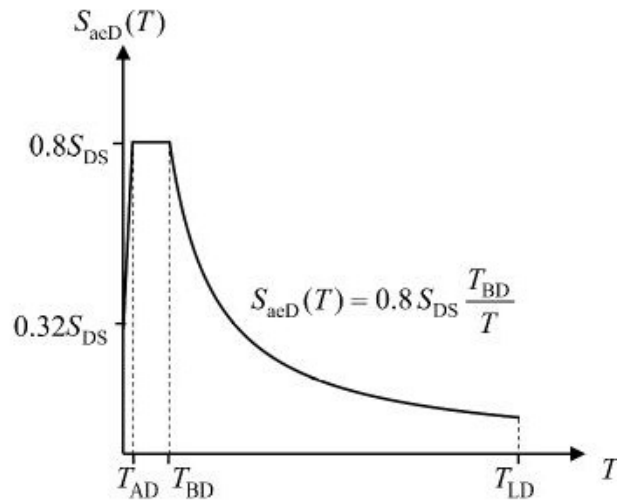
Bina Taşıyıcı Sistemi	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı $R$	Dayanım Fazlalığı Katsayısı $D$	İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfları $BYS$
<b>C3. Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler (Bkz. 4.3.4.1, 4.3.4.7)</b>			
C31. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran <i>süneklik düzeyi sınırlı</i> çelik çerçevelerle karşılandığı binalar	4	2.5	$BYS \geq 7$
C32. Deprem etkilerinin tamamının <i>süneklik düzeyi sınırlı</i> merkezi çaprazlı çelik çerçevelerle karşılandığı binalar	3	2	$BYS = 8$
C33. Deprem etkilerinin moment aktaran <i>süneklik düzeyi sınırlı</i> çelik çerçeveler ile <i>süneklik düzeyi sınırlı</i> merkezi çaprazlı çelik çerçeveler tarafından birlikte karşılandığı binalar	4	2	$BYS \geq 7$



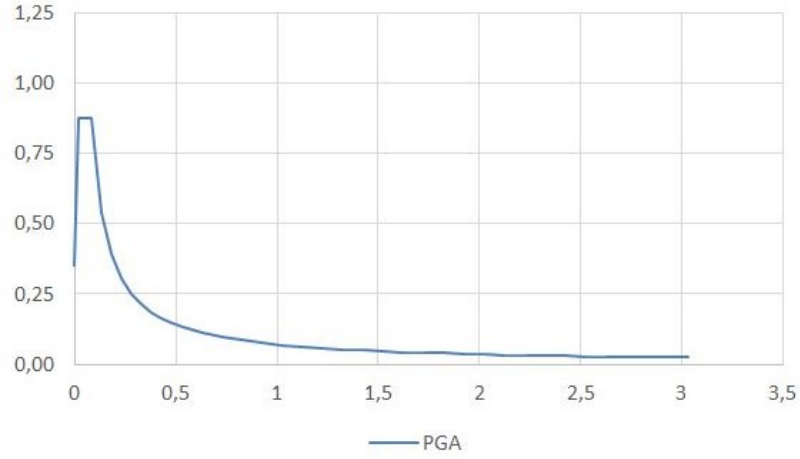
Şekil 4.4 TBDY - Yatay elastik tasarım spektrumu grafiği [61]



Şekil 4.5 Yatay elastik tasarım spektrumunun grafik gösterimi



Şekil 4.6 Düşey elastik tasarım spektrumu grafiği [61]



Şekil 4.7 Düşey elastik tasarım spektrumu grafik gösterimi

**TSC-2018 Seismic Load Pattern**

**Load Direction and Diaphragm Eccentricity**

Global X Direction  
 Global Y Direction

Ecc. Ratio (All Diaph.)

Override Diaph. Eccen.

**Time Period**

Approx. Period Ct (m), x =

Program Calc Ct (m), x =

User Defined T =

**Lateral Load Elevation Range**

Program Calculated  
 User Specified

Max Z

Min Z

**Seismic Coefficients**

0.2 Sec Spectral Accel, Ss

1 Sec Spectral Accel, S1

Long-Period Transition Period

Site Class

Site Coefficient, Fs

Site Coefficient, F1

**Calculated Coefficients**

SDS = Fs \* Ss

SDS = F1 \* S1

**Factors**

Response Modification, R

System Overstrength, D

Occupancy Importance, I

Şekil 4.8 X yönü - Eşdeğer deprem yükü yöntemine göre yük atanımı



TSC-2018 Seismic Load Pattern

<b>Load Direction and Diaphragm Eccentricity</b>	<b>Seismic Coefficients</b>
<input type="radio"/> Global X Direction	0.2 Sec Spectral Accel, Ss <input type="text" value="1,217"/>
<input checked="" type="radio"/> Global Y Direction	1 Sec Spectral Accel, S1 <input type="text" value="0,331"/>
Ecc. Ratio (All Diaph.) <input type="text" value="0,05"/>	Long-Period Transition Period <input type="text" value="8,"/>
Override Diaph. Eccen. <input type="button" value="Override..."/>	
<b>Time Period</b>	Site Class <input type="text" value="ZB"/>
<input type="radio"/> Approx. Period Ct (m), x = <input type="text"/>	Site Coefficient, Fs <input type="text" value="0,9"/>
<input checked="" type="radio"/> Program Calc Ct (m), x = <input type="text" value="0.10; 0.75"/>	Site Coefficient, F1 <input type="text" value="0,8"/>
<input type="radio"/> User Defined T = <input type="text"/>	<b>Calculated Coefficients</b>
<b>Lateral Load Elevation Range</b>	SDS = Fs * Ss <input type="text" value="1,0953"/>
<input checked="" type="radio"/> Program Calculated	SDS = F1 * S1 <input type="text" value="0,2648"/>
<input type="radio"/> User Specified <input type="button" value="Reset Defaults"/>	
Max Z <input type="text"/>	<b>Factors</b>
Min Z <input type="text"/>	Response Modification, R <input type="text" value="3,"/>
<input type="button" value="OK"/>	System Overstrength, D <input type="text" value="2,"/>
<input type="button" value="Cancel"/>	Occupancy Importance, I <input type="text" value="1,"/>

Şekil 4.9 Y yönü - Eşdeğer deprem yükü yöntemine göre yük atanımı

Çizelge 4.9 Bina kullanım sınıfları ve bina önem katsayıları tablosu [61]

Bina Kullanım Sınıfı	Binanın Kullanım Amacı	Bina Önem Katsayısı (I)
BKS = 1	<p><b>Deprem sonrası kullanımı gereken binalar, insanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar, değerli eşyanın saklandığı binalar ve tehlikeli madde içeren binalar</b></p> <p>a) Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminalleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri, vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları)</p> <p>b) Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kışlalar, cezaevleri, vb.</p> <p>c) Müzeler</p> <p>d) Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar</p>	1.5
BKS = 2	<p><b>İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar</b></p> <p>Alışveriş merkezleri, spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonları, ibadethaneler, vb.</p>	1.2
BKS = 3	<p><b>Diğer binalar</b></p> <p>BKS=1 ve BKS=2 için verilen tanımlara girmeyen diğer binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb.)</p>	1.0

#### 4.4.3.2 ASCE-7-16'ya Göre Deprem Yükleri

- TBDY-2018'in hazırlanmasında ASCE referans alındığı için, Bölüm 4.4.3.1'de bahsedilen terimler bu bölümde tekrar edilmemiştir. ASCE ve TBDY arasında iki farklılık bulunmaktadır. İlk farklılıktan dolayı;  $S_{DS}$  ve  $S_{D1}$  değerlerinin hesabında AFAD'dan DD1 depremine göre  $S_s$  ve  $S_1$  değerleri alınmıştır. En büyük deprem kayıtlarına göre hesap yapılan ABD'de tasarım deprem düzeyi için 2/3 katsayısı ile çarpılmış değerler kullanılmaktadır. Diğerleri ise yatay tasarım spektrumunda sabit yerdeğiştirmeye bölgesine geçiş periyodu 8.sn'dir.
- Yarı rijit birleşim konusunda literatürde, rijit birleşimlere nazaran daha az çalışma olduğundan R'nin 3 veya daha az alınması belirtilmektedir [61]. Bu bilgiye rağmen iki yönetmelik arasındaki farkı görmek adına aşağıda Çizelge 4.10'da gösterilen, yönetmeliğin ilgili tablosunun B3 satırındaki "3,25" değeri kullanılmıştır.
- X ve Y yönleri için sismik yük tasarım parametreleri ve eşdeğer deprem yükleri programa tanımlanmıştır (Şekil 4.10-13).
- AISC 360-16 şartnamesine göre tasarım gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.10 Sismik kuvvet dayanımlı sistemler için tasarım katsayıları ve faktörleri [66]

Seismic Force-Resisting System	ASCE 7 Section Where Detailing Requirements Are Specified	Response Modification Coefficient, $R^a$	Overstrength Factor, $\Omega_o^b$	Deflection Amplification Factor, $C_d^c$	Structural System Limitations Including Structural Height, $h_s$ (ft) Limits <sup>d</sup>				
					Seismic Design Category				
					B	C	D <sup>e</sup>	E <sup>e</sup>	F <sup>f</sup>
<b>B. BUILDING FRAME SYSTEMS</b>									
1. Steel eccentrically braced frames	14.1	8	2	4	NL	NL	160	160	100
2. Steel special concentrically braced frames	14.1	6	2	5	NL	NL	160	160	100
3. Steel ordinary concentrically braced frame	14.1	3/4	2	3/4	NL	NL	35 <sup>g</sup>	35 <sup>g</sup>	NP <sup>h</sup>

**ASCE 7-16 Seismic Load Pattern**

**Load Direction and Diaphragm Eccentricity**

Global X Direction  
 Global Y Direction

Ecc. Ratio (All Diaph.)

Override Diaph. Eccen.

**Time Period**

Approx. Period  $C_t$  (ft),  $x =$

Program Calc  $C_t$  (ft),  $x =$

User Defined  $T =$

**Lateral Load Elevation Range**

Program Calculated  
 User Specified

Max Z

Min Z

**Seismic Coefficients**

0.2 Sec Spectral Accel,  $S_s$

1 Sec Spectral Accel,  $S_1$

Long-Period Transition Period

Site Class

Site Coefficient,  $F_a$

Site Coefficient,  $F_v$

**Calculated Coefficients**

$SDS = (2/3) * F_a * S_s$

$SD1 = (2/3) * F_v * S_1$

**Factors**

Response Modification,  $R$

System Overstrength,  $\Omega$

Deflection Amplification,  $C_d$

Occupancy Importance,  $I$

Şekil 4.10 ASCE 7-16'ya göre X yönü sismik yük tasarım parametreleri

Load Case Data - Linear Static

Load Case Name: EQx\_ASCE [Set Def Name] [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Stiffness to Use:
 

- Zero Initial Conditions - Unstressed State
- Stiffness at End of Nonlinear Case

 Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case.

Analysis Type:
 

- Linear
- Nonlinear
- Nonlinear Staged Construction

Mass Source: Mass

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	EQx_ASCE	1,
Load Pattern	EQx_ASCE	1,

[Add] [Modify] [Delete] [OK] [Cancel]

Şekil 4.11 ASCE 7-16'ya göre X yönü sismik yük tanımlama

ASCE 7-16 Seismic Load Pattern

Load Direction and Diaphragm Eccentricity:
 

- Global X Direction
- Global Y Direction

 Ecc. Ratio (All Diaph.): 0,05 [Override...]

Time Period:
 

- Approx. Period Ct (ft), x =
- Program Calc Ct (ft), x = 0.028; 0.8
- User Defined T =

Lateral Load Elevation Range:
 

- Program Calculated
- User Specified [Reset Defaults]

 Max Z [ ]  
 Min Z [ ]

Seismic Coefficients:
 

- 0.2 Sec Spectral Accel, Ss: 2,118
- 1 Sec Spectral Accel, S1: 0,593
- Long-Period Transition Period: 8,

Site Class: B [ ]

Site Coefficient, Fa: 0,9  
 Site Coefficient, Fv: 0,8

Calculated Coefficients:
 

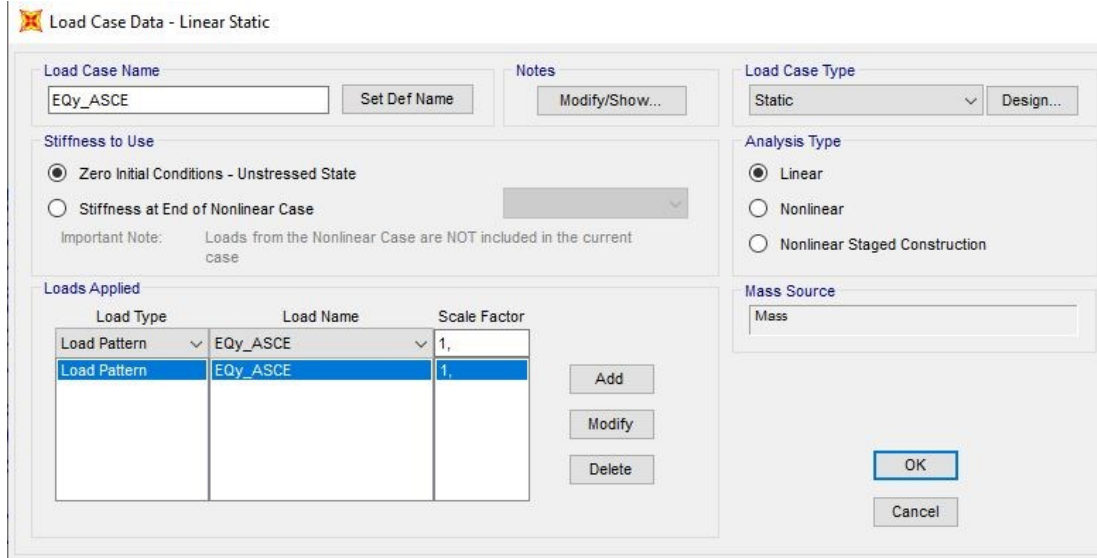
- SDS = (2/3) \* Fa \* Ss: 1,2708
- SD1 = (2/3) \* Fv \* S1: 0,3163

Factors:
 

- Response Modification, R: 3,25
- System Overstrength, Omega: 2,
- Deflection Amplification, Cd: 3,25
- Occupancy Importance, I: 1,

[OK] [Cancel]

Şekil 4.12 ASCE 7-16'ya göre Y yönü sismik yük tasarım parametreleri



Şekil 4.13 ASCE 7-16'ya göre Y yönü sismik yük tanımlama

#### 4.4.4 Yapıya Etkiyen Kar Yükleri

Kar yükleri modelde TS EN 1991-1-3 ve ASCE-7-16 Yönetmeliklerine göre hesaba katılmıştır.

##### 4.4.4.1 TS EN 1991-1-3'e Göre Kar Yükleri

- Yapı, İstanbul İli, Bakırköy ilçesinde (rakım: 65 m) olup, karakteristik zemin kar yükü ( $S_K$ )  $0,75 \text{ kN/m}^2$  olarak tanımlanmıştır.
- $S_K$  değeri meteorolojik ölçümlerden de kontrol edilmiştir. Çizelge 4.12'den maks. kar kalınlığı 75 cm olarak alınmış, kar birim hacim ağırlığı Çizelge 4.13'den  $2 \text{ kN/m}^3$  olarak seçilmiştir. Buradan, karakteristik zemin kar yükü  $S_K = 1,5 \text{ kN/m}^2$  olarak bulunur, dolayısıyla hesaplarda daha gerçekçi bu değer kullanılacaktır.
- Sürekli ve geçici tasarım çatı kar yükü (s) değerinin hesabı denklem 4.10'a göre yapılır.

$$s = \mu_i C_e C_t S_K \quad (4.10)$$

Denklemden; s: Çatı kar yükü değeri ( $\text{kN/m}^2$ ),  $\mu_i$ : Kar yükü şekil katsayısı,  $C_e$ : Yüzey Etkilenme Faktörü,  $C_t$ : Isı katsayısı'nı ifade etmektedir.

$C_e$ ,  $C_t$  katsayıları Çizelge 4.14'ten,  $\mu_i$  katsayısı ise Çizelge 4.15'ten belirlenir.

Konum itibarıyla  $C_e = 1$ , cam örtü kullanıldığı için  $C_t = 1$  ve çatı eğimi  $0^\circ$ - $30^\circ$  arası değişken olduğu için  $\mu_1 = 0,8$  kabul edilmiştir. Bu değerler 4.10 denkleminde yerine konularak,

Çatı kar yükü  $s = 1,2 \text{ kN/m}^2$  olarak belirlenir.

Kubbelerde kar yükü etkisinin belirlenmesinde, dengelenmemiş kar yüküne ait şekil katsayısı ( $\mu_3$ ) dikkate alınmalıdır. Topolojiye en uyumlu olan silindirik çatılar esas alınarak (Şekil 4.14, 4.15) kar perdelerinin olmadığı durum için, kar yükü şekil katsayısı denklem 4.11'e göre belirlenebilir.  $\mu_3$  için üst sınır değer, Şekil 4.14 ve Yönetmeliğin tavsiyesine göre 2,0'dır.

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

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

(4.11)

Bu bilgiler ışığında şekil katsayısı  $\mu_3 = 2$  alınmıştır.

Çizelge 4.11 Karakteristik zemin kar yükü ( $S_K$ ) değerleri  $\text{kN/m}^2$  [62]

		1	2	3	4
1	<b>Yapı yerinin denizden yüksekliği</b>	<b>BÖLGELER</b>			
	m	I	II	III	IV
	$\leq 200$	0,75	0,75	0,75	0,75
2	300	0,75	0,75	0,75	0,80
	400	0,75	0,75	0,75	0,80
	500	0,75	0,75	0,75	0,85
3	600	0,75	0,75	0,80	0,90
	700	0,75	0,75	0,85	0,95
	800	0,80	0,85	1,25	1,40
4	900	0,80	0,95	1,30	1,50
	1000	0,80	1,05	1,35	1,60
5	$> 1000$	1000 metreye tekabül eden değerler, 1500 metreye kadar %10, 1500 metreden yukarı yüksekliklerde %15 alınır.			
Kar yağmayan yerlerde kar yükü hesap değeri sıfır alınır					

Çizelge 4.12 İstanbul ili meteorolojik ölçüm tablosu [74]

İSTANBUL	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Son İklim Periyoduna ( 1929 - 2016)													
Ortalama Sıcaklık (°C)	6.0	6.1	7.7	12.0	16.8	21.4	23.8	23.8	20.1	15.7	11.7	8.2	14.4
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	8.5	9.0	10.9	15.5	20.0	24.6	26.6	26.8	23.7	19.2	14.8	10.7	17.5
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	3.2	3.1	4.2	7.7	12.1	16.5	19.5	20.1	16.8	13.0	8.9	5.4	10.9
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	3.6	3.4	4.4	6.3	8.5	10.4	11.3	10.4	8.2	5.4	4.0	2.5	78.4
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	17.2	15.1	13.7	10.2	8.0	6.1	4.2	4.9	7.4	11.2	13.0	17.2	128.2
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	104.4	78.2	71.5	46.1	34.2	35.9	32.5	40.1	60.6	87.8	101.2	122.7	815.2
Son İklim Periyoduna ( 1929 - 2016)													
En Yüksek Sıcaklık (°C)	22.0	24.7	29.3	33.6	34.5	40.2	41.5	40.5	37.9	34.2	27.8	25.8	41.5
En Düşük Sıcaklık (°C)	-13.9	-16.1	-11.1	-2.0	2.8	7.1	10.5	10.2	6.0	0.6	-7.2	-10.8	-16.1

En yüksek ve en düşük sıcaklıkların gerçekleşme tarihini görmek için fare imlecini değerlerin üstüne getiriniz.

Günlük Toplam En Yüksek Yağış Miktarı	Günlük En Hızlı Rüzgar	En Yüksek Kar
16.10.1985 <b>125.5 mm</b>	17.01.1970 <b>113.4 km/sa</b>	05.01.1942 <b>75.0 cm</b>

Çizelge 4.13 Karın ortalama gevşek yığın birim hacim ağırlığı tablosu [62]

Kar tipi	Yığın birim hacim ağırlığı (kN/m <sup>3</sup> )
Yeni	1,0
Yerleşmiş (Kar yağdıktan sonra birkaç saat veya gün geçmiş)	2,0
Eski (Kar yağdıktan sonra birkaç hafta veya ay geçmiş)	2,5 – 3,5
Islak	4,0

Çizelge 4.14 Farklı topografik alanlar için tavsiye edilen C<sub>e</sub> değerleri [62]

Topografik Bölge	C <sub>e</sub>
Rüzgara Açık <sup>1</sup>	0,8
Normal <sup>2</sup>	1,0
Korunmuş <sup>3</sup>	1,2

<sup>1</sup> Rüzgara açık topografik alanlar: her coğrafi yönden etkiye maruz kalan, arazi tarafından korunma imkanını olmadığı veya az olduğu daha yüksek yapıların veya ağaçların bulunmadığı engelsiz düz alanlar

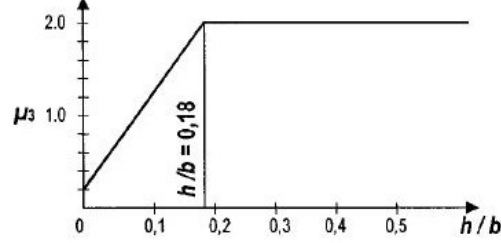
<sup>2</sup> Normal topografik alanlar: rüzgarın yapı üzerine etkisiyle kar kütlelerinin, arazi, diğer yapılar ve ağaçlar sebebiyle önemli bir değişime uğramadığı alanlar

<sup>3</sup> Korunmuş topografik alanlar: dikkate alınan yapının yüksekliğinin önemli ölçüde çevre arazisinden veya çevresindeki yüksek ağaçlardan ve/veya çevresindeki daha yüksek yapılardan düşük olduğu alanlar

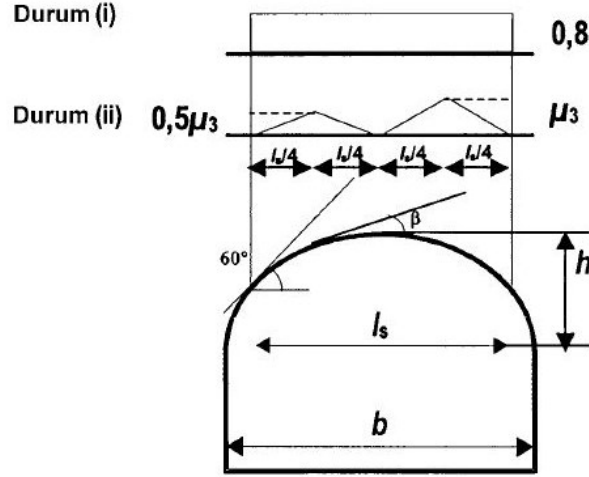
Isı katsayısı C<sub>t</sub>, yüksek sıcaklık iletiminden (>1 W/m<sup>2</sup>K) dolayı, özellikle binanın çatısı altındaki ısı kaybının çatı yüzeyini etkilemesi sebebiyle erimelerin meydana geldiği bazı cam kaplı çatılarda çatı kar yükündeki azalmanın hesaba katılması için kullanılır. Diğer bütün durumlar için: C<sub>t</sub> : 1,0 alınmalıdır.

Çizelge 4.15 Kar yükü şekil katsayıları tablosu [62]

Çatı eğim açısı, $\alpha$	$0^\circ < \alpha < 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1$	0,8	$0,8 (60 - \alpha) / 30$	0
$\mu_2$	$0,8 + 0,8 \alpha / 30$	1,6	-



Şekil 4.14 Farklı yükseklik/açıklık oranlarına sahip silindirik çatılar için tavsiye edilen kar yükü şekil katsayıları ( $\beta \leq 60^\circ$ ) [62]



Şekil 4.15 Silindirik çatılar için kar yükü şekil katsayıları [62]

#### 4.4.4.2 ASCE 7-16'ya Göre Kar Yükleri

- İlk adımda zemin kar ağırlığı  $p_g$  belirlenir. Bölüm 4.4.4.1'de hesaplanan  $p_g = 1,5$   $\text{kN/m}^2$  esas alınacaktır.
- Düz çatı yükü ( $p_f$ ) denklem 4.12 ve 4.13 dikkate alınarak hesaplanır.

$$p_f = 0,7 C_e C_t I_s p_g \quad (4.12)$$

Denklemdede;  $C_e$ : Yüzey etkilenme katsayısı,  $C_t$ : Sıcaklık katsayısı,  $I_s$ : Kar yükü hesabı için önem katsayısı,  $p_g$ : Zemin kar ağırlığı'nı ( $\text{kN/m}^2$ ) ifade etmektedir.

$C_e$ ; Çizelge 4.16'ya göre "B" kategorisi için 0,9 olarak belirlenir.

$C_t$ ; yapı ısıtılacağı için, Çizelge 4.17'ye göre 1,0 alınır.



$I_s$ , yapı 2 numaralı risk sınıfında olduğu için (Çizelge EK-B.1) 1,0 kabul edilecektir.

Düz çatıya etki eden kar yükü 4.12 numaralı denklemden  $p_f = 0,96 \text{ kN/m}^2$  olarak hesaplanır. Ancak, Yönetmeliğe göre düz çatı kar yükü ( $p_f$ ), minimum düz çatı kar yükünden ( $p_m$ ) az olamaz. Denklem 4.13'e göre hesaplama yapıldığında  $p_m = 1,5 \text{ kN/m}^2$  bulunur.

$$p_m = I_s \times p_g \quad (4.13)$$

Bu durumda bulunan 4.12'den hesaplanan  $p_f$  değeri,  $p_m$ 'den düşük çıktığı için;

$p_f = p_m = 1,5 \text{ kN/m}^2$  değeri esas alınacaktır.

- Eğimli çatı tasarım kar yükü ( $p_s$ ) yönetmelikte yer alan ve denklem 4.14'te yer verilen eşitliğe göre hesaplanır.

$$p_s = C_s \times p_f \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.14)$$

Yönetmeliğe göre, eğimli çatı faktörü ( $C_s$ ) için, Şekil 4.16'dan faydalanılarak  $C_s = 1$  kabul edilmiştir<sup>1</sup>. Bu durumda eğimli çatı tasarım kar yükü, diğer bir deyişle dengeli kar yükü,

$p_s = 1,5 \text{ kN/m}^2$  olarak elde edilir.

- Dengelenmemiş kar yükü durumu için,  $0,5 \times p_f = 0,75 \text{ kN/m}^2$  ile  $C_s \times 2p_f / C_e = 3,34 \text{ kN/m}^2$  arasında değişen yayılı yükler alanlara iterasyon yapılarak etkilmiştir<sup>2</sup>.

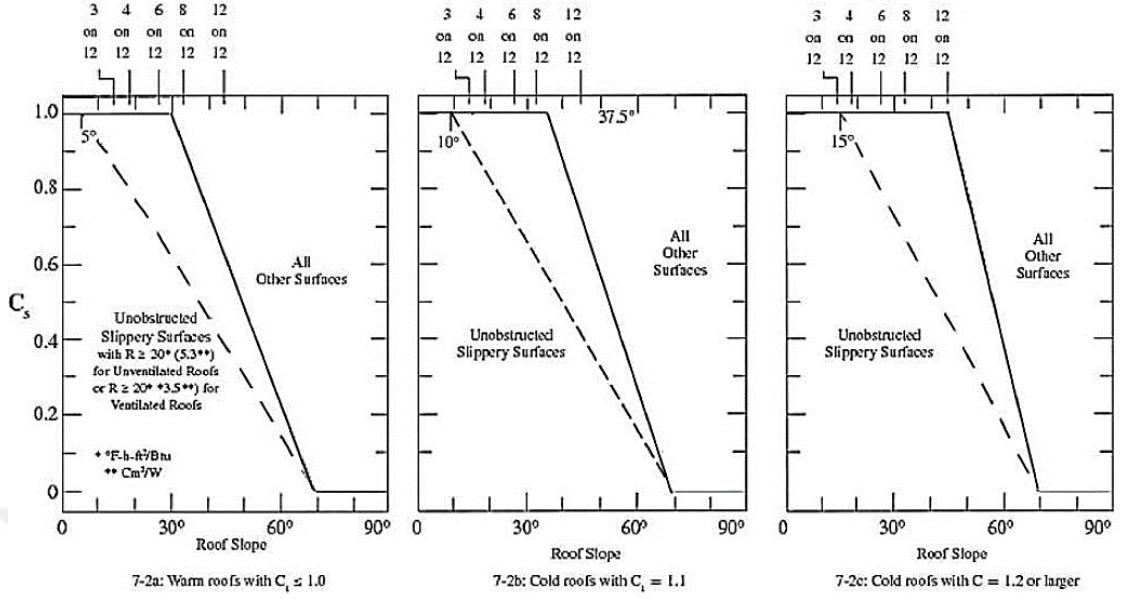
Çizelge 4.16 Yüzey etkilenme faktörleri  $C_e$  [66]

Surface Roughness Category	Exposure of Roof <sup>a</sup>		
	Fully Exposed	Partially Exposed	Sheltered
B (see Section 26.7)	0.9	1.0	1.2
C (see Section 26.7)	0.9	1.0	1.1
D (see Section 26.7)	0.8	0.9	1.0
Above the tree line in windswept mountainous areas	0.7	0.8	NA
In Alaska, in areas where trees do not exist within a 2-mi (3-km) radius of the site	0.7	0.8	NA

<sup>1</sup> Kubbelerin her bir halkada eğimi değişmektedir. Değişen eğime göre  $C_s$ , 0-1 arasında değer almaktadır, eğim  $< 30^\circ$  ise 1 alınır. Yapıların bir kısmında dengelenmemiş yük faktörü azaltımına gidilebilir; ancak kar yüklemesi stabilite hesaplarında çoğunlukla kritik yükleme olduğu için, daha konservatif bir yaklaşım benimsenip, azaltım yapılmamıştır.

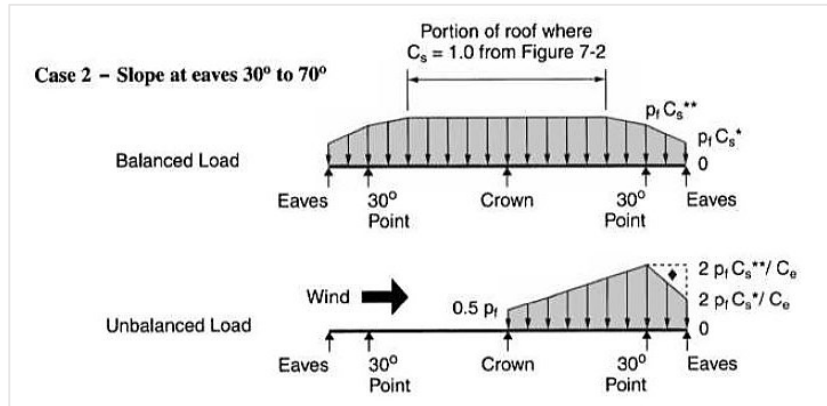
<sup>2</sup> H/D oranı 0,16 olan kubbelerde Şekil 4.17, 0,33 olan kubbelerde Şekil 4.18'de gösterilen durum uygulanmalıdır. Bununla birlikte çalışma detaylarında da belirtildiği üzere  $C_s$  katsayısına azaltıma gidilmeyip yönetmeliğin öngördüğü yüklerden çok daha fazlası analize katılmıştır.

Çizelge 4.17 Sıcaklık faktörleri  $C_t$  [66]

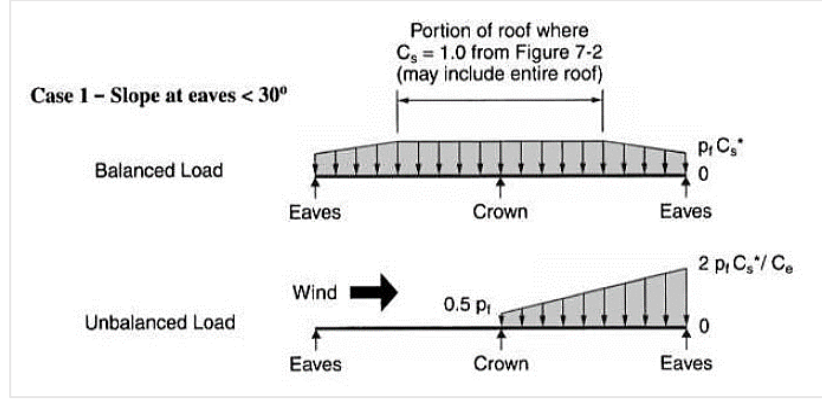


Thermal Condition <sup>a</sup>	$C_t$
All structures except as indicated below	1.0
Structures kept just above freezing and others with cold, ventilated roofs in which the thermal resistance (R-value) between the ventilated space and the heated space exceeds $25^\circ\text{F} \times h \times \text{ft}^2/\text{Btu}$ ( $4.4 \text{ K} \times \text{m}^2/\text{W}$ )	1.1
Unheated and open air structures	1.2
Freezer building	1.3
Continuously heated greenhouses <sup>b</sup> with a roof having a thermal resistance (R-value) less than $2.0^\circ\text{F} \times h \times \text{ft}^2/\text{Btu}$ ( $0.4 \text{ K} \times \text{m}^2/\text{W}$ )	0.85

Şekil 4.16 Eğimli çatı faktörünün ( $C_s$ ) belirlenmesi için grafikler [66]



Şekil 4.17 Dengeli ve Dengelenmemiş Yükleme Şekilleri Durum 1 [66]



Şekil 4.18 Dengeli ve Dengelenmemiş Yükleme Şekilleri Durum 2 [66]

#### 4.4.5 Yapıya Etkiyen Rüzgar Yükleri

Rüzgar etkilerinin yapıya yansıtılmasında TS EN 1991-1-4 ve ASCE 7-16 Yönetmelikleri dikkate alınacaktır.

##### 4.4.5.1 TS EN 1991-1-4'e göre Rüzgar Yükleri

- Yapı üzerine etkiyen rüzgar basınçları, esas hız kaynaklı rüzgar basınçları ve kısa süreli hız değişikliklerinden meydana gelen rüzgar basınçlarının toplamından oluşmaktadır. Şekil 4.20'de yer alan grafik, ortalama (mean) ve ani (gust) hızların zeminden yüksekliği ile değişimini göstermektedir. Şekil 4.21'deki grafikte ise ortalama (mean) ve ani (gust) hızlarının zamana bağlı değişimi verilmiştir.
- Ortalama rüzgar hızı denklem 4.15'te yer alan eşitliğe göre hesaplanır.

$$v_m(z) = c_r(z) c_o v_b \quad (4.15)$$

Denklemdede;  $c_r(z)$ : Yükseklik ile değişen engebelilik katsayısı,  $c_o$ : Orografi katsayısı,  $v_b$ : Esas rüzgar hızı'nı ifade etmektedir.

- Esas rüzgar hızı  $v_b$ , arazi kategorisi II'de yerden 10 m yükseklikte yılın herhangi bir bölümünün ve rüzgar yönünün bir fonksiyonu olarak tanımlanır (Çizelge EK-C.1). İstanbul için esas rüzgar hızı<sup>1</sup>, yönetmeliğin ilgili maddesi gereğince 28 m/s (100 km/saat) olarak alınmıştır [74].
- Engebelilik faktörü  $c_r(z)$  TS EN 1991-1-4 ile uyumlu olarak, denklem 4.16'ya göre hesaplanır.  $z_o$  ve  $z_{min}$  değerleri yapının bulunduğu araziye uygun olarak Çizelge EK-

<sup>1</sup> Esas rüzgar hızı ( $v_b$ ), 10 dakikalık ortalama rüzgar hızıdır.

C.1'den alınır<sup>1</sup>, burada  $z_0$ , arazi kategorisi II için 0.05,  $z_{\min}$  ise 5'tir.  $z_{\max}$  ise yönetmeliğin ilgili maddesine uygun olarak 200 m alınmalıdır [63] ve  $k_r$  hesabı 4.17'deki denklem ile 0,19 bulunur.

$$c_r(z) = k_r \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4.16)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad z \leq z_{\min}$$

Eşitlikte;  $z_0$ : Engebelilik uzunluğu ve  $k_r$ :  $z_0$ 'a bağlı arazi katsayısı'dır.

$$k_r = 0.19 \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} \quad (4.17)$$

$$k_r = 0.19 \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} = 0.19 \left( \frac{0,05}{0,05} \right)^{0.07} = 0,19$$

- $c_r(z)$  değeri kubbelerin tepe noktası yüksekliğine göre farklı değerler almaktadır. Örneğin, 70 metre çaplı 1/3 basıklık oranına sahip kubbeler için ilgili hesaplama ile 0,468 değerini almaktadır.

$$c_r(z) = k_r \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) = 0,19 \ln \left( \frac{23,3}{2} \right) = 0,468$$

- Ortalama rüzgar hızının bulunması için gerekli olan orografi katsayısı rüzgarın yaklaştığı yöndeki eğime bağlı olarak hesaplanır. Rüzgarın yaklaştığı yöndeki kısmın eğimi ( $\Phi$ ) 0.05'in altında olduğu için orografi katsayısı ( $c_o$ ) yönetmelikte de belirtilen denklem 4.18'e göre 1 alınmıştır.
- Bu durumda  $v_m$  denklem 4.15 ile hesaplanarak 13,13 m/s bulunur.

$$\begin{array}{lll} \Phi < 0,05 & \text{için} & c_o = 1 \\ 0,05 < \Phi < 0,3 & \text{için} & c_o = 1 + 2s \Phi \\ \Phi > 0,3 & \text{için} & c_o = 1 + 0,6s \end{array} \quad (4.18)$$

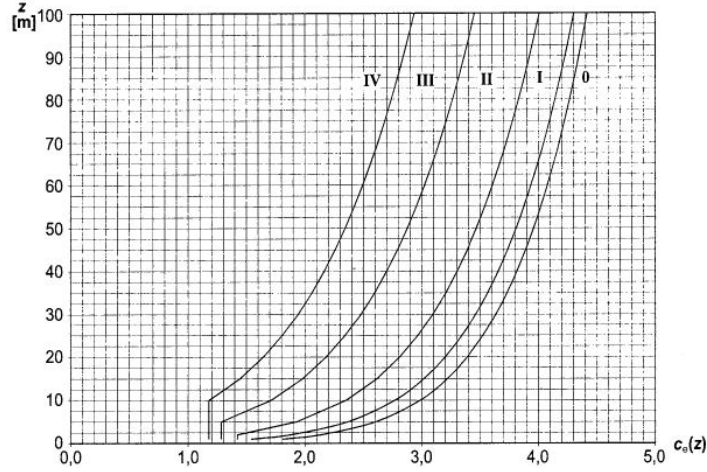
<sup>1</sup> Arazi kategorilerinin belirlenmesinde çizelgede belirtilen tanımlara ilave olarak TS EN 1991-1-4 şartnamesinde de yayınlanan ve Şekil EK-C.1'de sunulan görsellerden yararlanarak da arazi kategori seçimi yapılabilir.

Denklem 4.19’da,  $q_b$ ’nin (esas rüzgar hızından kaynaklanan rüzgar basıncı) havanın yoğunluğuna bağlı olarak hesabı ve  $q_p(z)$  (tepe hız kaynaklı rüzgar basıncı) hesabına yer verilmiştir.  $\rho$  değeri için yönetmelikte 1,25 alınması tavsiye edilmektedir.

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 \quad (4.19)$$

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

- $q_b = \frac{1}{2} (1,25)(28)^2 = 0,49 \text{ kN/m}^2$  olarak hesaplanır. Ve  $q_p(z)$  de  $1,421 \text{ kN/m}^2$  olarak hesaplanmış olur.
- Burada  $c_e(z)$  yüksekliğin bir fonksiyonu olan maruz kalma katsayısıdır. Yer seviyesinden yüksekliğin tanımlanan arazi kategorilerinin bir fonksiyonu olarak Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Kullanılacak  $c_e(z)$  değeri 2,9 olarak seçilir.



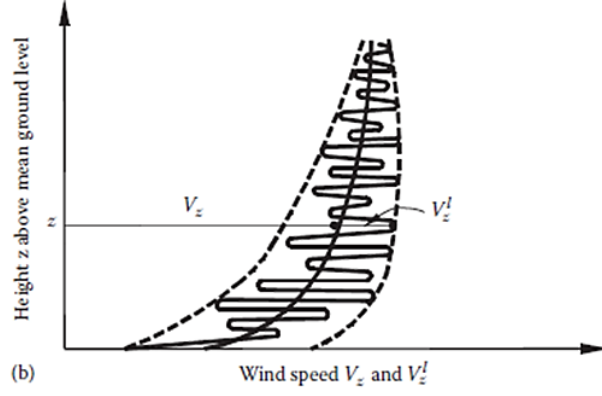
Şekil 4.19  $c_e(z)$  maruz kalma katsayısının grafik gösterimi [63]

- Rüzgar yükleri, yapının dış kabuğunda oluşturduğu dış rüzgar basıncının ve tamamen kapalı olmayan yapılarda rüzgarın yapı içine girmesi ile yapının iç yüzeylerinde meydana gelen iç rüzgar basıncının oluşması sebebiyle meydana gelir. Tez kapsamında değerlendirilen jeodezik ve diamatik kubbelerin tamamen kapalı olması nedeniyle yalnızca dış basınç denklem 4.20’deki eşitliğe uygun olarak hesaplanmıştır.

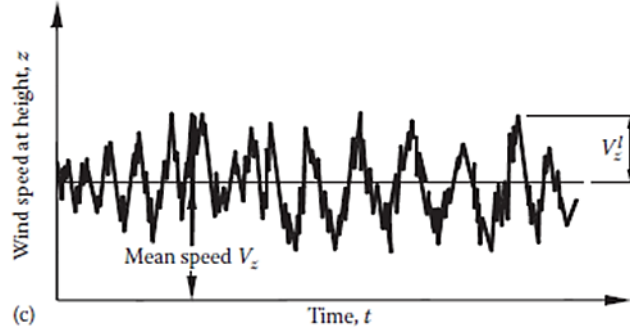
$$w_e = q_p(z) c_{pe} \quad (4.20)$$

Denklem 4.20’de yer alan  $c_{pe}$ , TS EN 1991-1-4 yönetmeliğinde ifade edilen dış basınç için verilen basınç katsayısıdır ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Bu şekil üzerinde verilen yönetmelik bilgisine göre hesaplamalar yapılmış ve modelde kullanılan parametreler aşağıda gösterilmiştir.

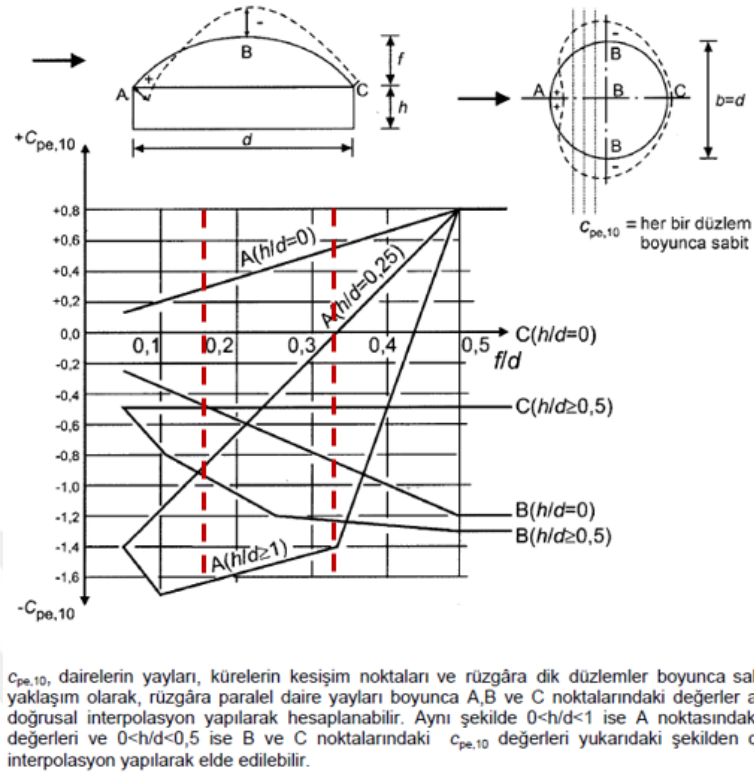
$$d = 40 \text{ m}; f = 6,5 \text{ m}; f/d = 0,1625; h/d = 0 \quad , \quad A = 0,3; B = 0,5; C = 0$$



Şekil 4.20 Ortalama hız ve ani hızın zemin yüksekliğine göre değişimi [63]



Şekil 4.21 Ortalama hız ve ani hızın zamana göre değişimi [63]



Şekil 4.22 Dairesel tabanlı kubbeler için tavsiye edilen  $c_{pe,10}$  dış basınçları [63]

#### 4.4.5.2 ASCE 7-16'ya Göre Rüzgar Yükleri

- Bu yönetmelikte rüzgar basınçlarının hesaplanmasında 3 saniyelik ortalama rüzgar hızı kullanılmaktadır. ASCE 7-16 yönetmeliğinde yer alan çelik yapıların tasarım, hesap ve yapım esaslarına göre 28 m/s rüzgar hızı 10 dakikalık ortalama rüzgar hızına karşılık gelmektedir. Rüzgar hızlarının dönüşümü aynı yönetmelikte belirtilen ve Şekil 4.23'te yer alan grafik yardımıyla yapılmış ve 3 saniyelik ortalama rüzgar hızı (esas rüzgar hızı)  $40,15 \text{ m/s} (28 / 1,06) \times 1,52 = 40,15 \text{ m/s}$  olarak bulunmuştur. Buna göre rüzgar basıncı ASCE 7-16 yönetmeliğine uygun olarak denklem 4.21 ile hesaplanır.

$$q_z = 0.613K_zK_{zt}K_dK_eV^2 \text{ N/m}^2 \quad (4.21)$$

Denklemden;  $K_z$ : Maruz Kalma Faktörü,  $K_{zt}$ : Topografik Faktör,  $K_d$ : Rüzgar Yön Faktörü,  $K_e$ : Zemin Yükselti Faktörü,  $V$ : Esas Rüzgar Hızı'nı ifade etmektedir.

- Rüzgar basıncı hesabında kullanılan zemin yükselti faktörü ( $K_e$ ), ASCE 7-16 yönetmeliğinde yer alan ve Çizelge 4.18'e göre seçilmektedir. Bu tabloya göre rakımı 305 metreden düşük olan bölgeler için  $K_e = 1$  alınmaktadır.
- Topografik faktör ( $K_{zt}$ ) ASCE 7-16 yönetmeliğinde de ifade edildiği üzere denklem 4.22'ye göre hesaplanmaktadır. Tez kapsamında hesaplanan yapıların bulunduğu bölge koşulları ASCE 7-16 yönetmeliğinde belirtilen tüm koşullar sağlanamadığı için yönetmelikte de bildirildiği üzere  $K_{zt} = 1$  alınmıştır.

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 \quad (4.22)$$

- Bu çalışma kapsamında maruz kalma faktörü ( $K_z$ ), yönetmelikte yer alan ve Çizelge EK-C.2'de yer verilen bilgiler ışığında belirlenmiştir. Bu çizelge içerisinde C sınıfı için verilen  $K_z$  değerleri tez çalışması için uygundur. Maruz kalma faktörü ( $K_z$ ) ayrıca yönetmelikte yer alan denklem 4.23 ve Çizelge EK-C.3'ten yola çıkarak da hesaplanabilir. Tüm modeller için rüzgar hesabı katsayıları ayrı ayrı bulunmuştur. 40 m çaplı,  $H/D = 0,1625$  olan model için tepe noktasında (B)  $K_z = 0,9$ 'dur.

$$4,6m \leq z \leq z_g \text{ için } K_z = 2,01(z/z_g)^{2/\alpha} \quad (4.23)$$

$$z < 4,6m \text{ için } K_z = 2,01(15/z_g)^{2/\alpha}$$

- Rüzgar basıncı hesabında kullanılan rüzgar yön faktörü ( $K_d$ ) için Çizelge EK-C.4'te verilen tabloya göre dairesel kubbelere uygun olan 1.0 değeri alınmıştır. Buna göre tasarım rüzgar basıncı denklem 4.24'e uygun olarak hesaplanır.

$$p = qGC_p - q_i(GC_{pi}) \quad (4.24)$$

Eşitlikte;  $q$  : Esas rüzgar basıncı,  $G$  : Fırtına etkisi faktörü  $C_p$  : Dış basınç katsayısı,  $q_i$  : İç basıncı,  $GC_{pi}$ : İç basınç katsayısı'nı ifade etmektedir.

- Fırtına etkisi faktörü ( $G$ ) ASCE 7-16'nin ilgili bölümüne uygun olarak rijit yapılar için 0,85 olarak alınmıştır. Dış basınç katsayısı ( $C_p$ ) yönetmelikte verilen Şekil 4.24'teki parametrelere uygun olarak hesaplanmıştır.



- İç basınç katsayısı ( $GC_{pi}$ ) ASCE 7-16 yönetmeliğinde yapının kapalılık durumuna göre sınıflandırılarak verilmiştir. Çizelge EK-C.5'te verilen bilgiler ışığında  $GC_{pi} \pm 0,18$  dir. Analizde kullanılan modelin  $C_p$  parametreleri aşağıdaki gibidir.

$$d = 40\text{m}; f = 6,5\text{m}; f/d = 0,1625; h/d = 0$$

$$A = 0,3; B = 0,5; C = 0$$

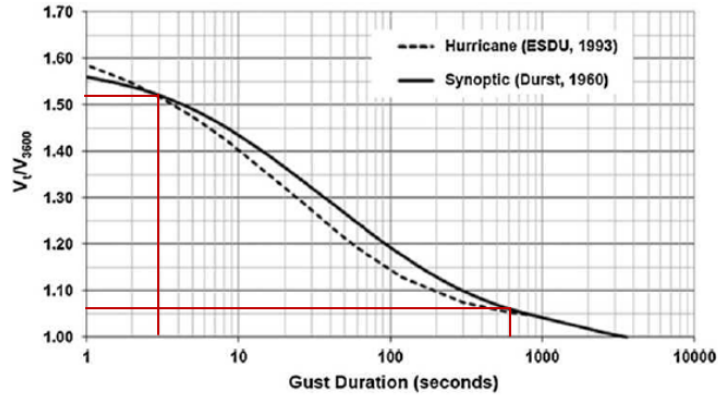
- Tüm bulunan katsayılar denklem 4.21'de yer alan hesaplama formülünde yerine koyulduğunda  $q_z$  aşağıdaki gibi hesaplanarak  $0,89 \text{ kN/m}^2$  bulunur.

$$q_z = 0,613 \times 0,9 \times 1 \times 1 \times (40,15)^2 = 889 \text{ N/m}^2 = 0,89 \text{ kN/m}^2$$

- Tasarım rüzgar basıncı ( $p$ ) da denklem 4.24'e göre aşağıdaki gibi hesaplanmış olur.

$$p = (0,89 \times 0,85 \times 0,5) \pm (0,89 \times 0,18) \text{ kN/m}^2$$

$$= 0,378 \pm 0,160 \text{ kN/m}^2$$

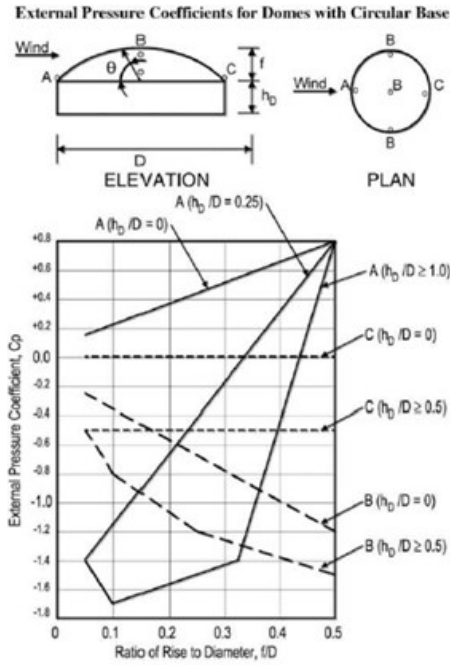


Şekil 4.23 Ortalama rüzgar hızı [66]

Çizelge 4.18 Zemin yükselti faktörü ( $K_e$ ) tablosu [66]

Ground Elevation above Sea Level		Ground Elevation Factor $K_e$
ft	m	
<0	<0	See note 2
0	0	1.00
1,000	305	0.96
2,000	610	0.93
3,000	914	0.90
4,000	1,219	0.86
5,000	1,524	0.83
6,000	1,829	0.80
>6,000	>1,829	See note 2

Diagrams



Şekil 4.24 Dış basınç katsayısı ( $C_p$ ) diyagramı [66]

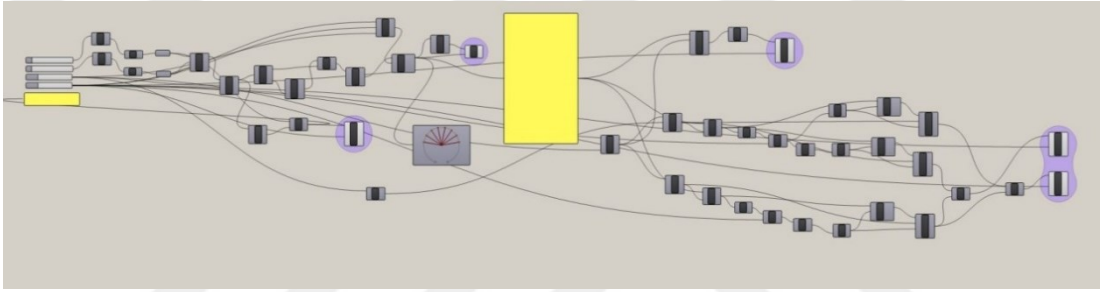
## 4.5 Model Kubbe Analizleri ve Değerlendirmesi

Bu bölümde inceleme konusu olan kubbeler için, mimari model tasarımı ve statik analizler yer almaktadır. Modellemede 1/3, 1/6 basıklık oranları ve iki adet farklı çap (40 ve 70 m) için toplam sekiz farklı kubbe geometrisi oluşturulmuştur.

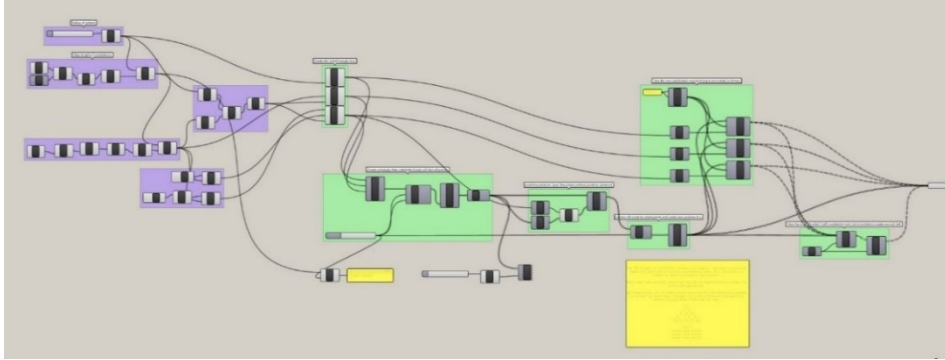
### 4.5.1 Mimari Modelleme

Kubbe sistemde yapı geometrisinin hatasız oluşturulması, gerek analiz aşaması gerekse montaj aşaması için, ön kusurlara neden olmamak adına büyük öneme sahiptir. Mimari

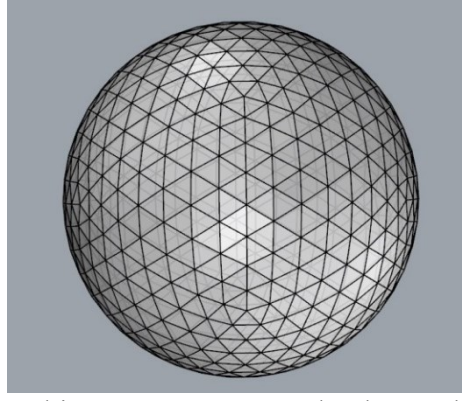
modellemede 3 boyutlu modelleme araçlarından Rhinoceros 3B programı kullanılmıştır. Zaman ekonomisi ve boyut hassasiyeti için, parametrik modelleme aracı Grasshopper, Rhinoceros programına dahil edilmiştir. Yazılımda diamatik kubbeler için geliştirilen algoritma ağacı Şekil 4.25'te, jeodezik kubbeler için geliştirilen algoritma ağacı ise Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Şekil 4.25 ve 4.26'daki her bir kutuda yapının geometrisini oluşturan parametreler bulunmaktadır. Her bir parametrenin yapacağı değişiklik diğer değişkenleri otomatik olarak güncellemekte, bu da tasarımcı için kısa sürede pek çok modeli hızlıca üretip, daha fazla analiz yapabilmeye imkan vermektedir. Programda oluşturulan jeodezik kürenin görseli Şekil 4.27'de, 70 metre çapı ve H/D oranı 1/3 olan diamatik ve jeodezik kubbe görselleri de Şekil 4.28'de verilmiştir.



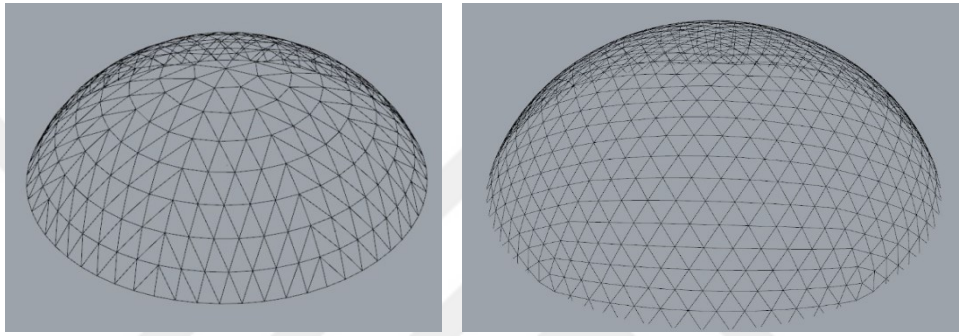
Şekil 4.25 Grasshopper yazılımında diamatik kubbeler için geliştirilen algoritma ağacı



Şekil 4.26 Grasshopper yazılımında jeodezik kubbeler için geliştirilen algoritma ağacı



Şekil 4.27 Jeodezik kürenin Rhinoceros programında oluşturulmuş model görseli

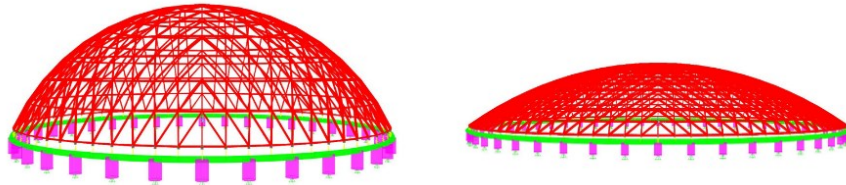


Şekil 4.28 70 metre çaplı,  $H/D = 1/3$  oranındaki diamatik (Soldaki) ve jeodezik (Sağdaki) kubbe modellerinin Rhinoceros programından alınan görselleri

Oluşturulan 8 model, dxf uzantılı olarak kaydedilip, mühendislik analizleri için SAP2000 programına aktarılmıştır.

#### 4.5.2 Yük Atamaları ve Modellerin Oluşturulması

CSI yazılımı olan SAP2000 programına aktarılan modeller, en alttaki çekme çemberi ve kolonlar gibi eksiklikleri giderilip, yüklemelerin yapılmasına hazır hale getirilmiştir.  $1/3$  ve  $1/6$  basıklık oranına sahip kubbelerin görselleri Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29 Basıklık oranı  $1/3$  (Soldaki) ve  $1/6$  (Sağdaki) olan kubbelerin görselleri

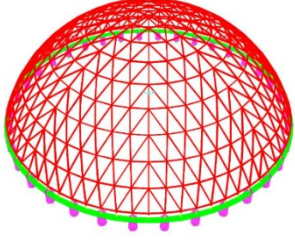
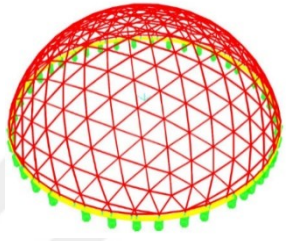
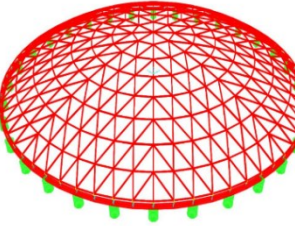
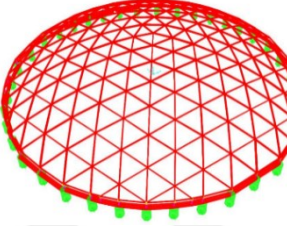
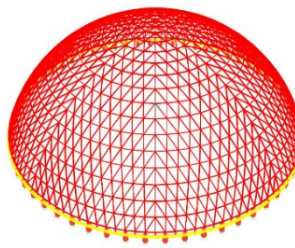
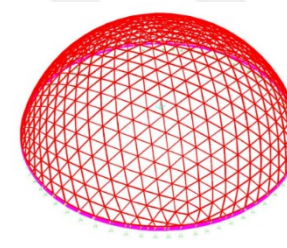
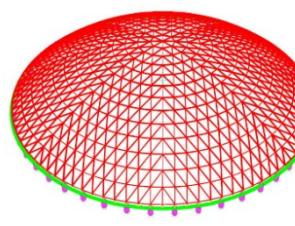
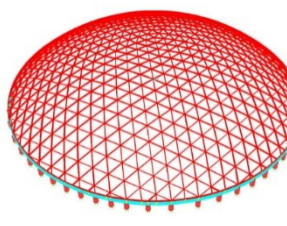
SAP2000 modellemesi için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Elemanların malzeme açısından doğrusal elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir.

- Dügüm noktaları yarı-rijit kabul edilmiş, düğüm noktalarının modellenmesinde<sup>1</sup>, patentli bir ürünün sayısal verileri kullanılmış<sup>2</sup>, kiriş ucu dönme yayı karakteristikleri (yayın) programa tanımlanmıştır (Şekil 4.30).

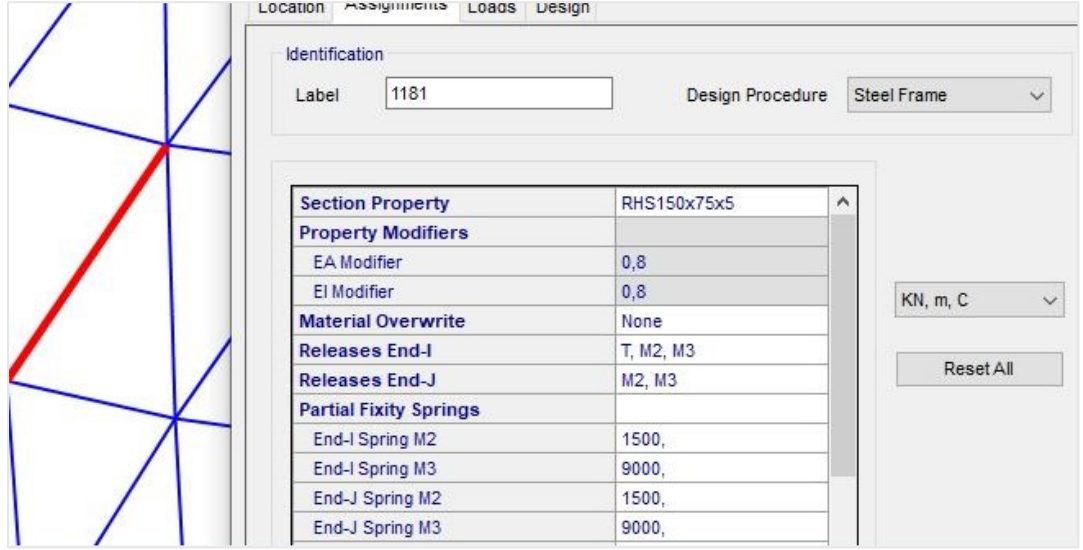
Modelde oluşturulan diamatik ve jeodezik kubbeler ve modelden çıkan 3 boyutlu görselleri Çizelge 4.19’da verilmiştir.

Çizelge 4.19 Analizi yapılan kubbelerin 3 boyutlu görselleri

D, H/D	Diamatik Kubbe	Jeodezik Kubbe
40 m, 1/3		
40 m, 1/6		
70 m, 1/3		
70 m, 1/6		

<sup>1</sup> Bu tür bir düğüm noktası Bölüm 3’deki deneysel örneklerde de aktarıldığı gibi, bulonları da dahil olmak üzere, birleşimin monotonik yükler altında ikinci mertebe elasto-plastik davranışı deneysel ve sonlu eleman yöntemleri ile teorik olarak ortaya konulur.

<sup>2</sup> Hem uzunluk hem de kullanılan profilin benzerliği (S355 sınıfı RHS 150×75×5) nedeniyle Novum Structures LLC firmasının Akasya AVM/İstanbul projesinde kullandığı değerler birebir kabul edilmiştir.



Şekil 4.30 SAP2000 programına girilen kiriş ucu yay değerleri

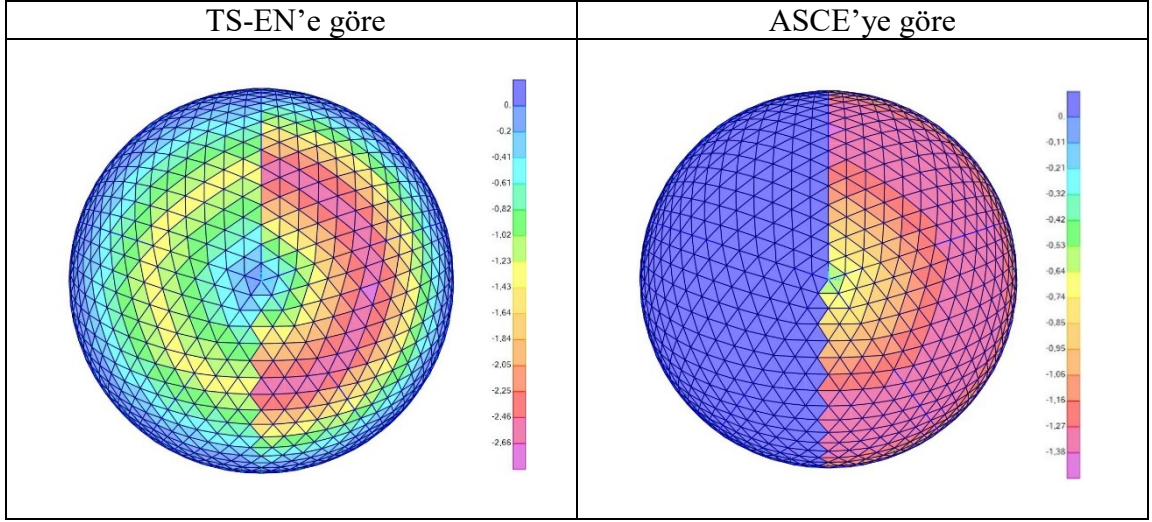
70 m çapındaki kubbelerde eleman uzunlukları ve kesitler artmıştır, düğüm noktası sayısal verileri aynen alınmıştır. Daha gerçekçi modelleme için kapsamlı birleşim analiz ve deneyleri tez kapsamı dışında tutulmuştur.

Yükler ile ilgili olarak:

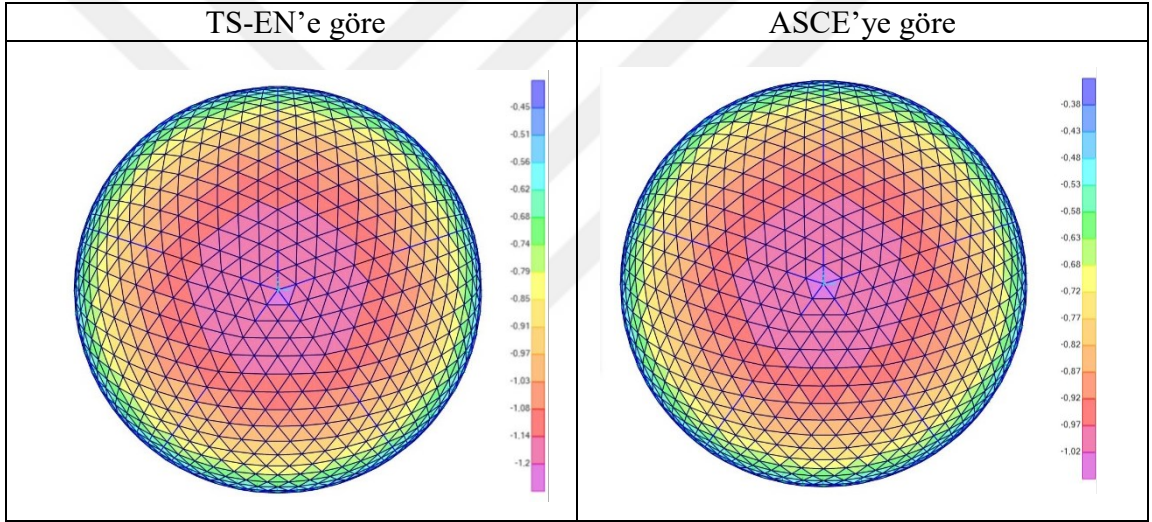
- Sıcaklık yüklemesi doğrudan taşıyıcı sistem profillerine uygulanmıştır.
- Profillerin zati ağırlığı otomatik olarak hesaba katılmaktadır.
- Rüzgar ve kar yükü ile cam yüzeyin zati ağırlığı çelik profiller arası alanı örten yüzeysel elemanlara yayılı olarak etkilmiştir. Kar ve rüzgar yüklerinin alanlara aktarımında enterpolasyon yapılmıştır, her bir dilime etkiyen yük iterasyon ile belirlenip programa girilmiştir.

Örnek olması açısından 70 m çap ve 1/3 basıklık oranına sahip jeodezik kubbe için yük atamaları yapılmış ve programdan çıkan görseller Çizelge 4.20, 4.21 ve 4.22’de verilmiştir.

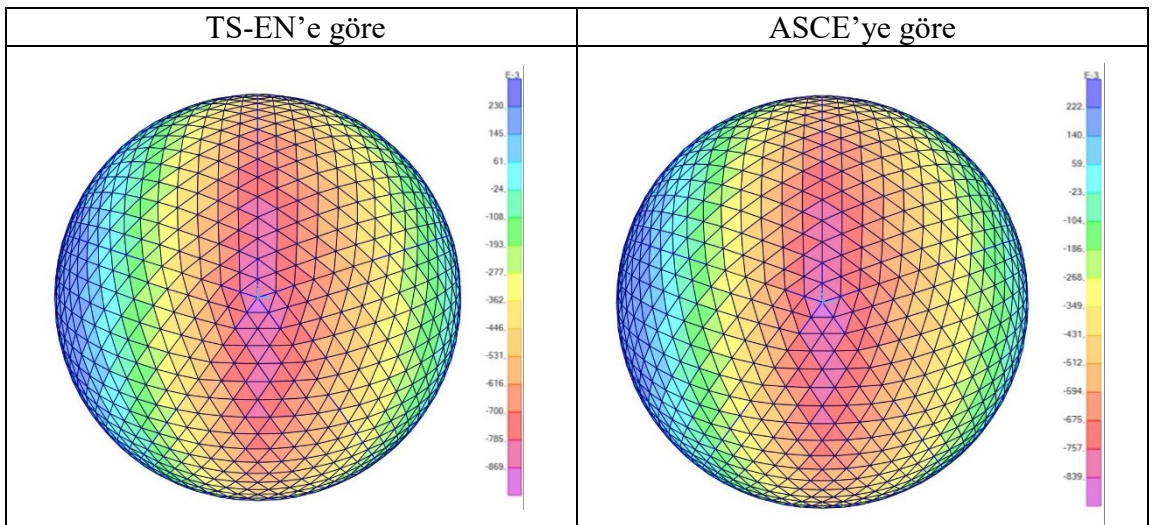
Çizelge 4.20 Dengelenmemiş kar yükleri ataması gösterimi



Çizelge 4.21 Dengelenmiş kar yükleri ataması gösterimi

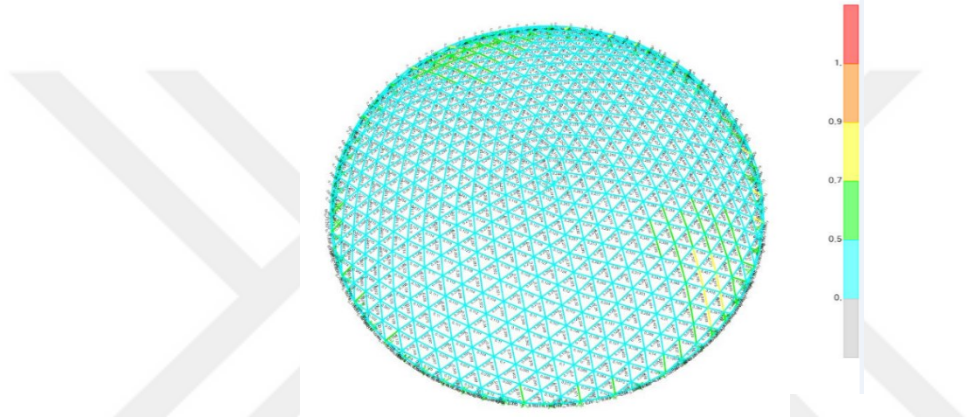


Çizelge 4.22 Rüzgar yükleri ataması gösterimi



### 4.5.3 Mühendislik Analizleri ve Değerlendirilmesi

Genel analiz metoduna göre stabilite tasarımında, hem Türkiye çelik yönetmeliğinde hem de AISC 360-16'da, geometrik kusurların etkisinin hesaba katılması için; kullanılan fiktif yükün ( $H/500$ ) 0,002 katsayısı ile hesaplamaya dahil edilebileceği belirtilmiştir [65]. Ancak AISC 341-16'da çapraz elemanların kolonlara bağlandığı düğümlerde daha hassas bir çözüm bulmak adına katsayının 0,006 olarak alınması gerektiği de belirtilmiştir [64]. Kubbe özel yapılar olduğu için fiktif yük katsayısı 0,006 alınarak analizler yapılmıştır. Modellerdeki tüm profiller yanal burulmalı burkulma durumuna karşı hassas olmamasından dolayı kapalı kutu profiller tercih edilmiştir.

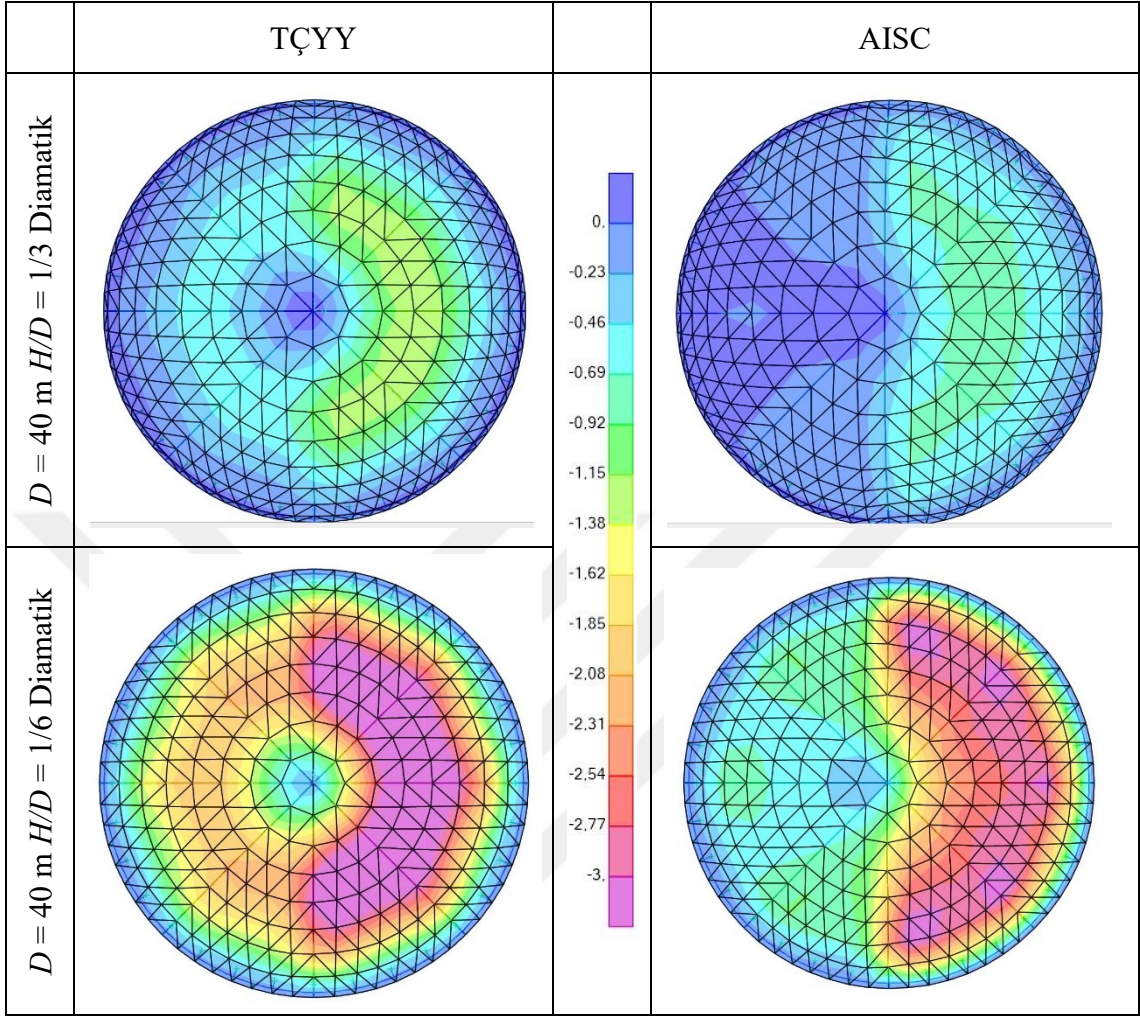


Şekil 4.31 Örnek model ( $D=70$  m ve  $H/D=1/6$  olan jeodezik kubbe) için AISC P-M oranları renk skalası

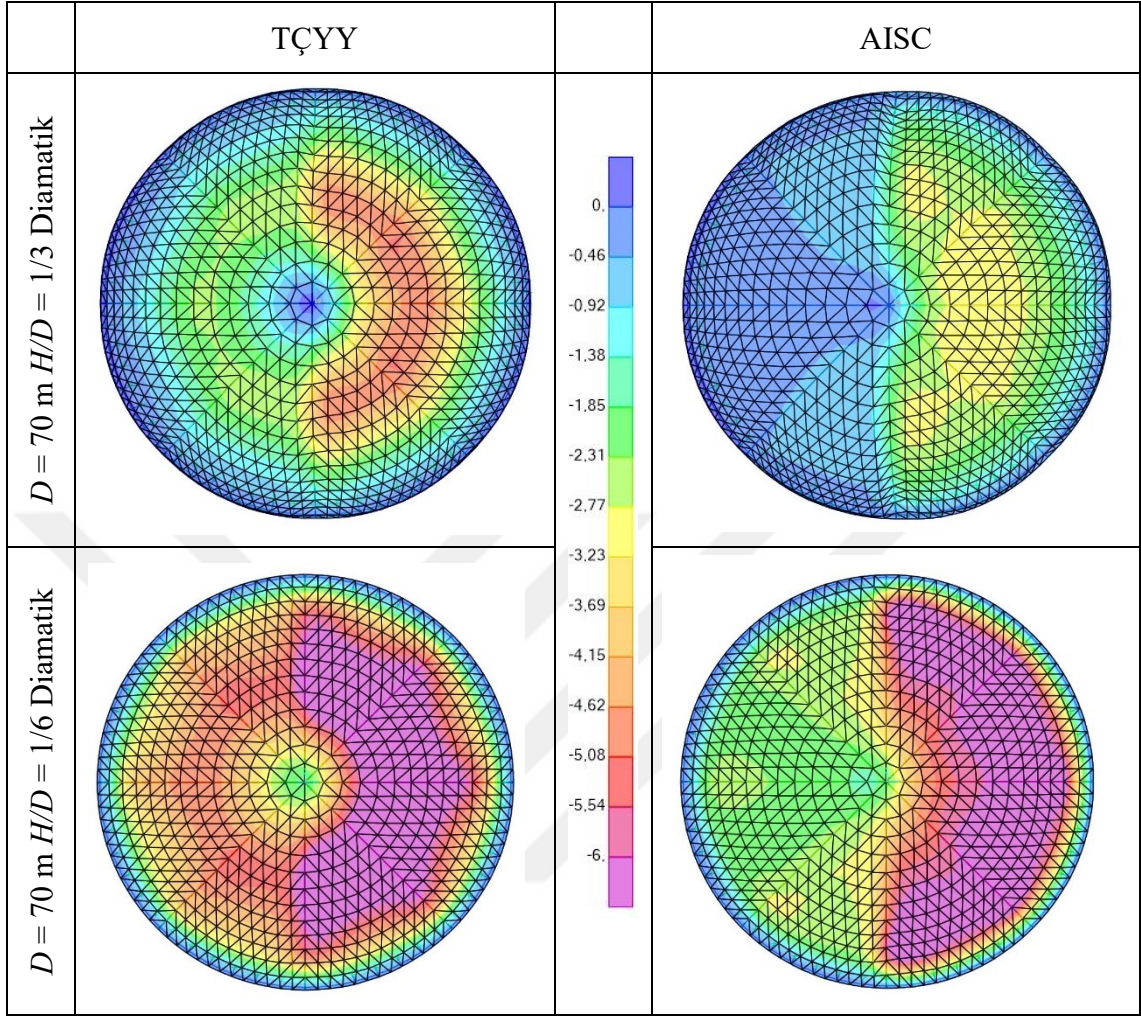
Kubbe modellerinin her birinin en elverişsiz koşullar altında oluşan yer değiştirme gösterimi Çizelge 4.23 - 4.26 arasında verilmiştir.



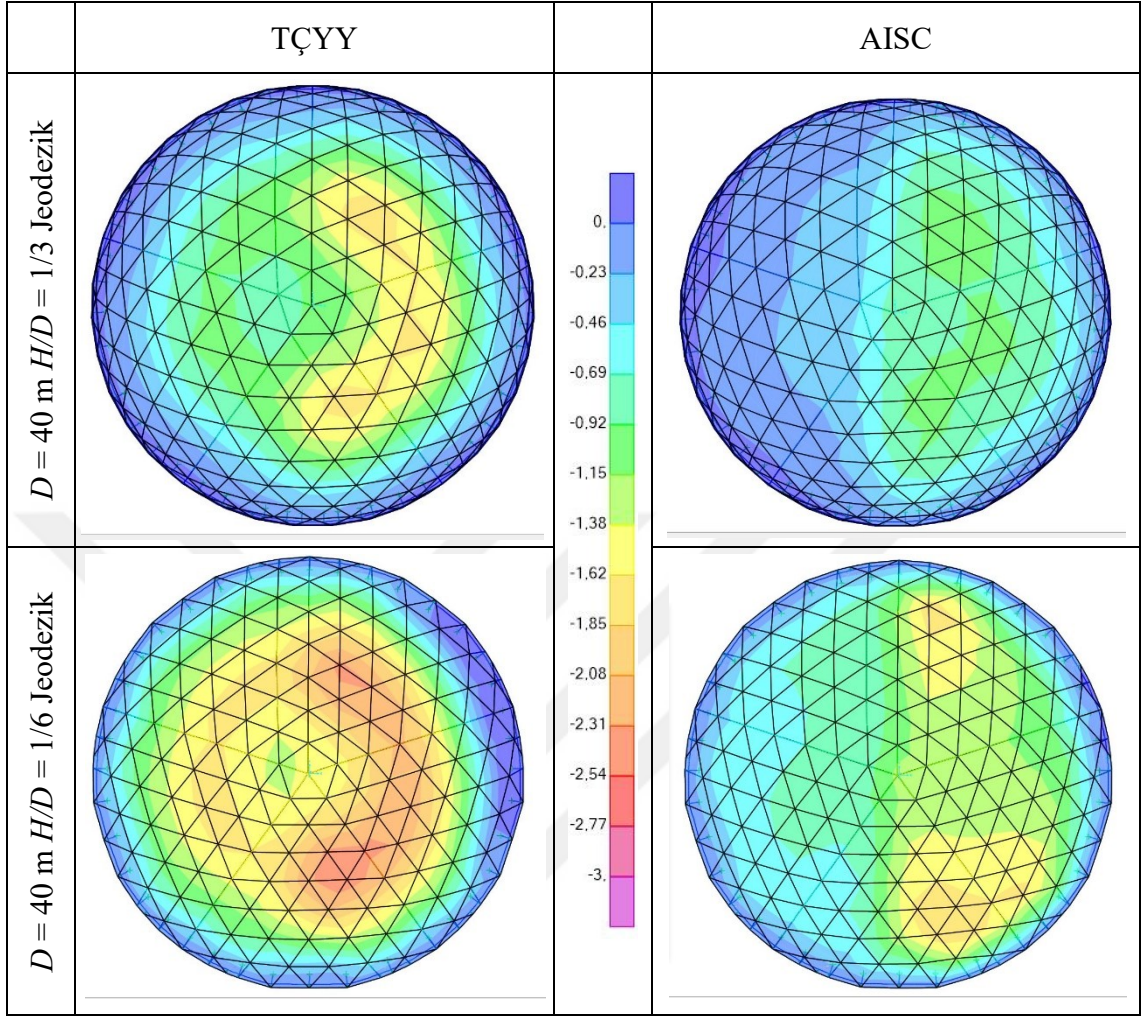
Çizelge 4.23 40 m çaplı diamatik kubbelerin en elverişsiz kombinasyon altında oluşan yer değiştirme gösterimi (cm)



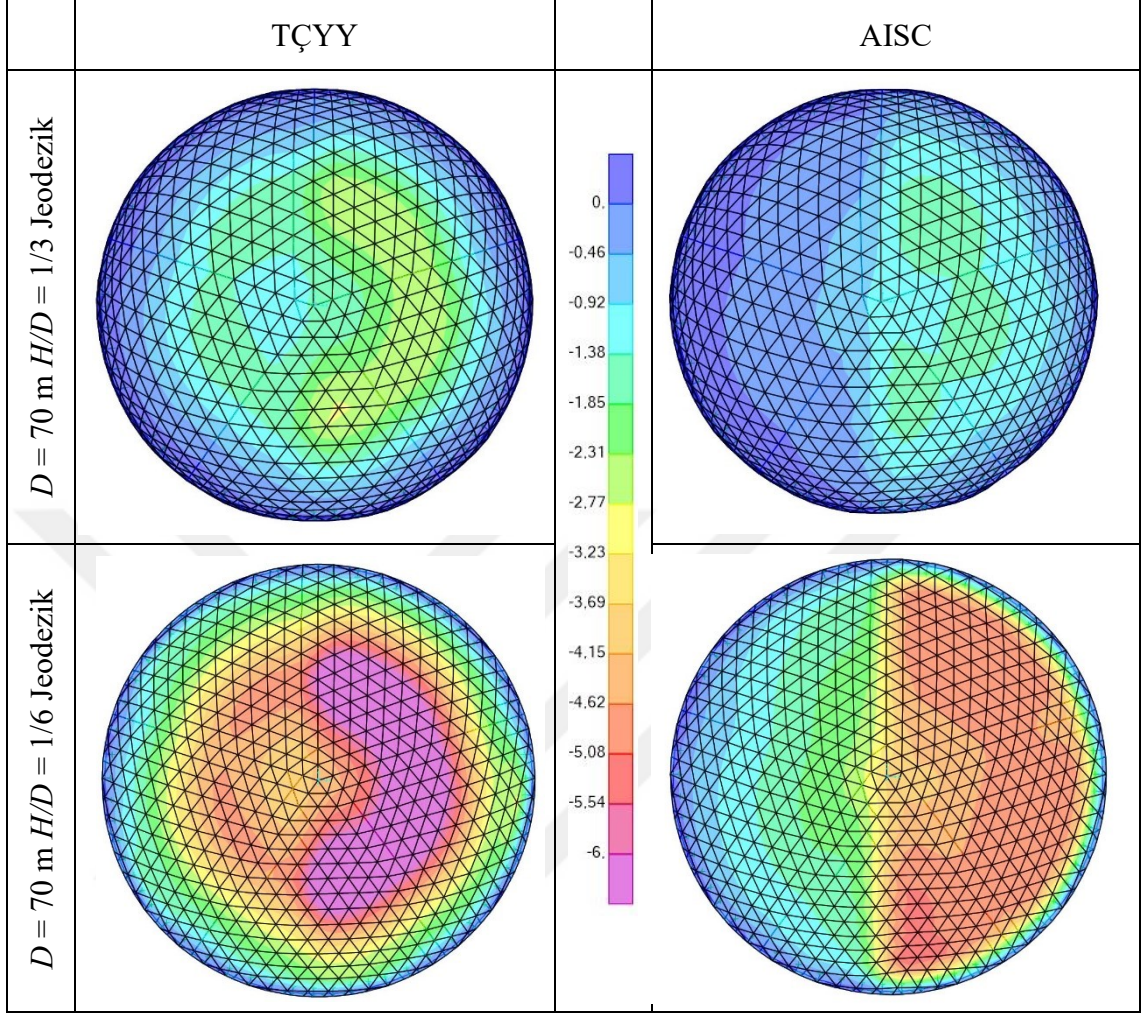
Çizelge 4.24 70 m çaplı diamatik kubbelerin en elverişsiz kombinasyon altında oluşan yer değiştirme gösterimi (cm)



Çizelge 4.25 40 m çaplı jeodezik kubbelerin en elverişsiz kombinasyon altında oluşan yer değiştirme gösterimi (cm)



Çizelge 4.26 70 m çaplı jeodezik kubbelerin en elverişsiz kombinasyon altında oluşan yer değiştirme gösterimi (cm)



Tüm modeller AISC ve TS-EN şartnamelere uygun şekilde taşıma gücü kontrolünden geçirilmiş; eğilme, aksenal kuvvet ve kesmen dayanımı ile ilgili kesit taşıma güçleri kontrol edilmiştir.

- TS-EN normlarına göre kubbelere etkiyen yüklemeler daha yüksek değerlere sahip olduğundan, AISC'ye göre %10 - %15 daha yüksek kapasite ile yapı elemanlarının çalışmasına sebep olmuştur. Çoğu eleman her iki yönetmelik kapsamında da %50 ve altı kapasitede bulunmaktadır.
- Modellerin kolon kotuna yaklaştıkça, özellikle asimetrik kar yüklemesinden dolayı elemanlarda aksenal yük (basınç) değeri artmakta ve bu nedenle kapasiteler AISC normlarında %70 - 75, TS-EN normlarında ise maksimum %80 ila %85 düzeyine ulaşmaktadır.

- Tüm modellerde en elverişsiz kesit tesirleri denklem 4.24'te belirtilen kombinasyondan oluşmuştur.

$$1,2 G + 1,6 \text{ Asimetrik S} + 0,8W + T \quad (4.24)$$

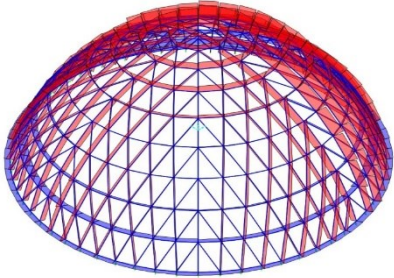
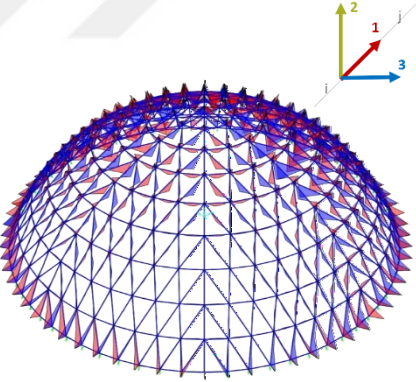
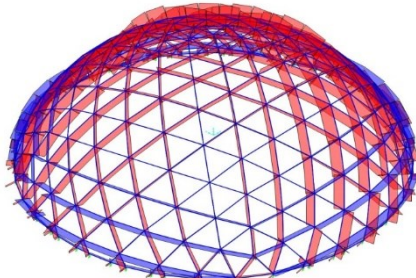
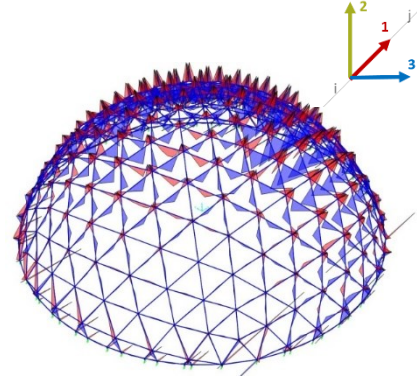
Elemanlarda hakim kesit tesiri aksenal yüküdür, momentler ve kesme kuvveti değerleri oldukça düşük mertebelerde kalmaktadır. Dengelenmemiş (asimetrik) başta olmak üzere kar yüklemesini içeren kombinasyonların en olumsuz sonuçları tüm modellerde vermiştir.

Sıcaklık etkisi (T) kombinasyonu da gözardı edilmeyecek düzeyde basınç kuvveti oluşturmaktadır.

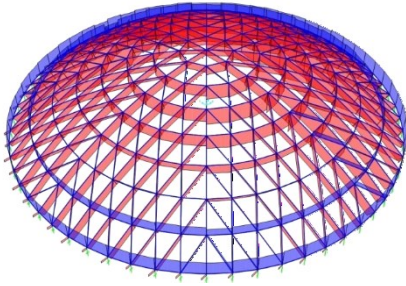
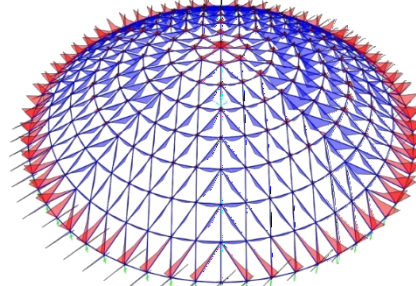
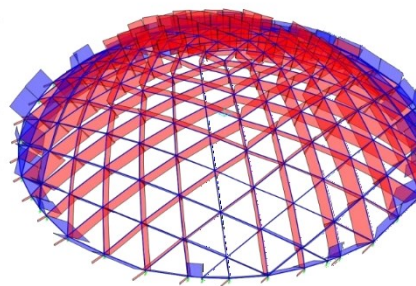
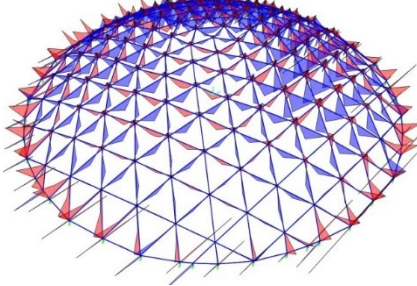
Örnek olarak incelenen jeodezik kubbe ( $D = 70$  m ve  $H/D = 1/6$ ) modelinde maksimum 100 kN aksenal yük tespit edilmiştir. Tasarımda daha ekonomik bir çözüm elde etmek için, çekme çemberine yaklaştıkça, tepeden aşağı doğru artan et kalınlıklarına sahip profiller kullanılabilir.

Kubbeleri oluşturan çekme çemberi dışındaki çelik kutu profillerinin kesit tesirleri her bir kubbe için sunulmuştur. En elverişsiz kombinasyona ait (4.24 numaralı denklem ) aksenal yük ve moment değişiminin görselleri ile zarf kombinasyonundan elde edilen kesit tesirleri sonuçları verilmiştir (Çizelge 4.27-4.30).

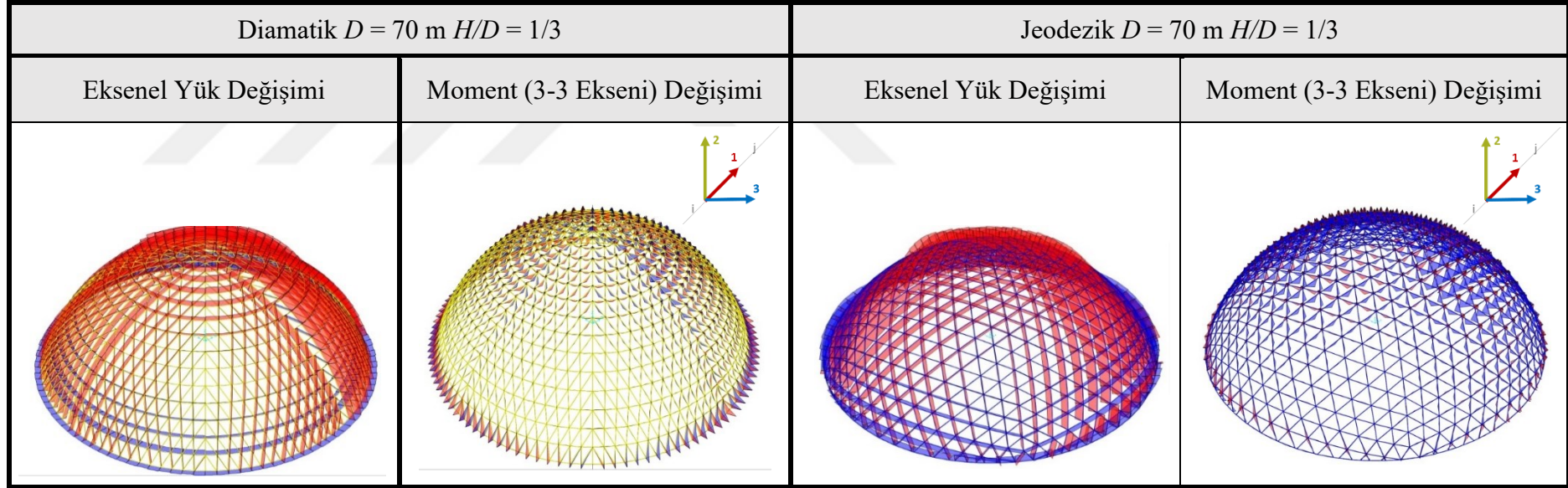
Çizelge 4.27  $D = 40$  m ve  $H/D = 1/3$  olan kubbelerin kesit tesirlerinin gösterimi ve en elverişsiz kesit tesirlerinin sayısal değerleri

Diamatik $D = 40$ m $H/D = 1/3$		Jeodezik $D = 40$ m $H/D = 1/3$	
Eksenel Yük Değişimi	Moment (3-3 Eksen) Değişimi	Eksenel Yük Değişimi	Moment (3-3 Eksen) Değişimi
			
Diamatik $D = 40$ m $H/D = 1/3$		Jeodezik $D = 40$ m $H/D = 1/3$	
TÇYY	AISC	TÇYY	AISC
$N_{Basınç} = 180$ kN	$N_{Basınç} = 120$ kN	$N_{Basınç} = 173$ kN	$N_{Basınç} = 147$ kN
$N_{Çekme} = 105$ kN	$N_{Çekme} = 80$ kN	$N_{Çekme} = 118$ kN	$N_{Çekme} = 108$ kN
$M_{Maks} = 5$ kNm	$M_{Maks} = 4$ kNm	$M_{Maks} = 6$ kNm	$M_{Maks} = 5$ kNm
$V_{Maks} = 6$ kN	$V_{Maks} = 4$ kN	$V_{Maks} = 9$ kN	$V_{Maks} = 6$ kN

Çizelge 4.28  $D = 40$  m ve  $H/D = 1/6$  olan kubbelerin kesit tesirlerinin gösterimi ve en elverişsiz kesit tesirlerinin sayısal değerleri

Diamatik $D = 40$ m $H/D = 1/6$		Jeodezik $D = 40$ m $H/D = 1/6$	
Eksenel Yük Değişimi	Moment (3-3 Eksen) Değişimi	Eksenel Yük Değişimi	Moment (3-3 Eksen) Değişimi
			
Diamatik $D = 40$ m $H/D = 1/6$		Jeodezik $D = 40$ m $H/D = 1/6$	
TÇYY	AISC	TÇYY	AISC
$N_{\text{Basınç}} = 273$ kN	$N_{\text{Basınç}} = 202$ kN	$N_{\text{Basınç}} = 253$ kN	$N_{\text{Basınç}} = 270$ kN
$N_{\text{Çekme}} = 156$ kN	$N_{\text{Çekme}} = 158$ kN	$N_{\text{Çekme}} = 372$ kN	$N_{\text{Çekme}} = 375$ kN
$M_{\text{Maks}} = 8$ kNm	$M_{\text{Maks}} = 10$ kNm	$M_{\text{Maks}} = 10$ kNm	$M_{\text{Maks}} = 11$ kNm
$V_{\text{Maks}} = 6$ kN	$V_{\text{Maks}} = 5$ kN	$V_{\text{Maks}} = 9$ kN	$V_{\text{Maks}} = 10$ kN

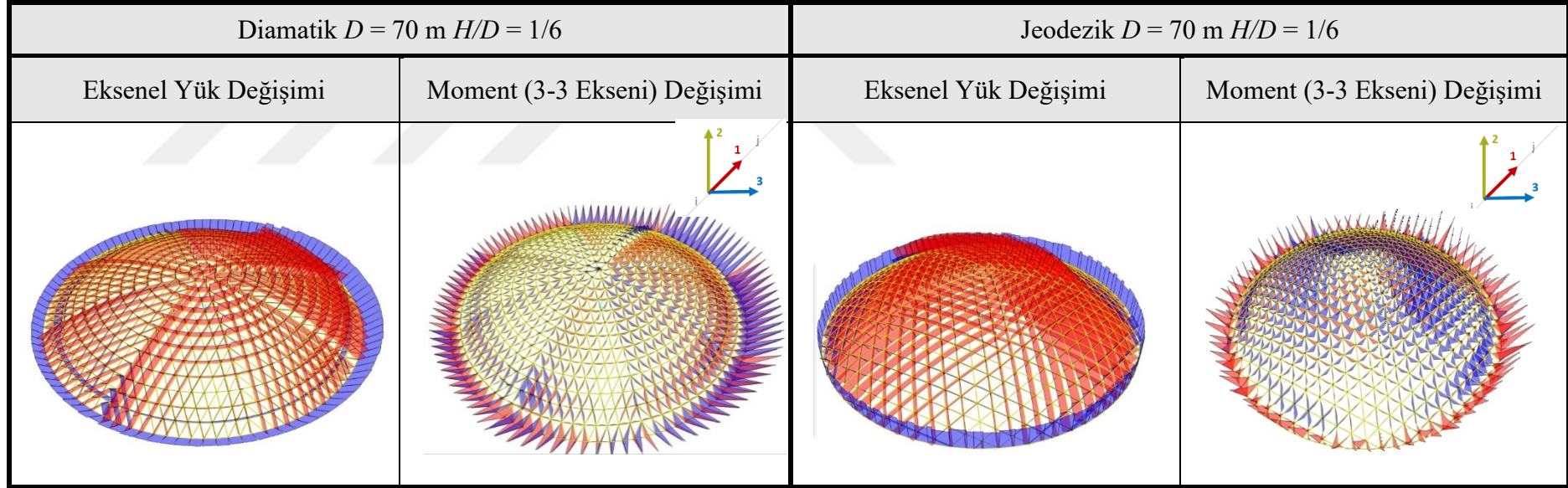
Çizelge 4.29  $D = 70$  m ve  $H/D = 1/3$  olan kubbelerin kesit tesirlerinin gösterimi ve en elverişsiz kesit tesirlerinin sayısal değerleri



Diamatik $D = 70$ m $H/D = 1/3$		Jeodezik $D = 70$ m $H/D = 1/3$	
TÇYY	AISC	TÇYY	AISC
$N_{Basınç} = 355$ kN	$N_{Basınç} = 230$ kN	$N_{Basınç} = 307$ kN	$N_{Basınç} = 257$ kN
$N_{Çekme} = 230$ kN	$N_{Çekme} = 190$ kN	$N_{Çekme} = 238$ kN	$N_{Çekme} = 250$ kN
$M_{Maks} = 8$ kNm	$M_{Maks} = 8$ kNm	$M_{Maks} = 8$ kNm	$M_{Maks} = 6$ kNm
$V_{Maks} = 7$ kN	$V_{Maks} = 5$ kN	$V_{Maks} = 6$ kN	$V_{Maks} = 10$ kN



Çizelge 4.30  $D = 70$  m ve  $H/D = 1/6$  olan kubbelerin kesit tesirlerinin gösterimi ve en elverişsiz kesit tesirlerinin sayısal değerleri



Diamatik $D = 70$ m $H/D = 1/6$		Jeodezik $D = 70$ m $H/D = 1/6$	
TÇYY	AISC	TÇYY	AISC
$N_{Basınç} = 562$ kN	$N_{Basınç} = 415$ kN	$N_{Basınç} = 484$ kN	$N_{Basınç} = 443$ kN
$N_{Çekme} = 541$ kN	$N_{Çekme} = 565$ kN	$N_{Çekme} = 660$ kN	$N_{Çekme} = 603$ kN
$M_{Maks} = 28$ kNm	$M_{Maks} = 33$ kNm	$M_{Maks} = 28$ kNm	$M_{Maks} = 22$ kNm
$V_{Maks} = 13$ kN	$V_{Maks} = 15$ kN	$V_{Maks} = 17$ kN	$V_{Maks} = 14$ kN

#### 4.5.4 Düşey Yer Değiştirme Sonuçları

8 modele ait TÇYY ve AISC yönetmeliklerine göre sehim şartı kontrol edilmiştir. Tüm modeller gerekli  $L/300$  şartını sağlamaktadır. Modellerdeki her bir kubbe tipinin TÇYY ve AISC Yönetmeliklerine göre maksimum düşey yer değiştirme değerleri Çizelge 4.36'da verilmiştir. Basıklığın artmasının burkulma yük faktöründe olduğu gibi, yer değiştirme değerlerinin artması üzerinde de olumsuz etkisi bulunmaktadır. TS EN 1991-1-3'e göre kar yükü değerleri ASCE 7-16'ya kıyasla daha büyük olduğundan, oluşan sehimler de daha büyük çıkmıştır.

Çizelge 4.31 Düşey yer değiştirme sonuçları tablosu

Model	Yönetmelik	Maksimum Düşey Yer Değiştirme (cm)
<b>Diamatik, <math>D = 40</math> m, <math>H/D = 1/3</math></b>	AISC	0,52
	TÇYY	0,68
<b>Diamatik, <math>D = 40</math> m <math>H/D = 1/6</math></b>	AISC	1,45
	TÇYY	1,73
<b>Diamatik, <math>D = 70</math> m, <math>H/D = 1/3</math></b>	AISC	1,5
	TÇYY	2,36
<b>Diamatik, <math>D = 70</math> m, <math>H/D = 1/6</math></b>	AISC	3,5
	TÇYY	3,86
<b>Jeodezik, <math>D = 40</math> m, <math>H/D = 1/3</math></b>	AISC	0,55
	TÇYY	0,73
<b>Jeodezik, <math>D = 40</math> m <math>H/D = 1/6</math></b>	AISC	1,27
	TÇYY	1,77
<b>Jeodezik, <math>D = 70</math> m, <math>H/D = 1/3</math></b>	AISC	0,95
	TÇYY	1,32
<b>Jeodezik, <math>D = 70</math> m, <math>H/D = 1/6</math></b>	AISC	2,5
	TÇYY	3,64


#### 4.5.5 Kesit Tesirleri

Kubbelerin tasarımında etkili olan kar, deprem ve rüzgar yüklemelerinin yapının taban kotunda oluşturduğu aksenal kuvvetler her bir model için ayrı ayrı sunulmuştur. Ayrıca, yapı elemanlarında oluşan baskın kesit tesirinin aksenal yük olduğu, çapraz elemanlarda basınç değerinin, moment ve kesme kuvvetine nazaran oldukça büyük olduğu belirtilmişti. Kubbeyi kolonlara bağlayan en alt halkada ise çekme kuvveti baskın olmaktadır. Bu nedenle, çekme etkisini karşılamak için, 70 m açıklık geçilen modellerde daha büyük mukavemete sahip (RHS 500×300×20) kesitler seçilmiştir.


#### 4.5.5.1 Mesnet Tepkileri

Modellenen her bir kubbe için mesnet tepkileri Çizelge 4.32-4.39 arasında verilmiştir.

Çizelge 4.32  $D = 40$  m,  $H/D = 1/3$  olan diamatik kubbenin mesnet tepkileri

Diamatik, $D = 40$ m, $H/D = 1/3$			X Yönü (kN)	Y Yönü (kN)	Z Yönü (kN)
Kar	SNOW_TS EN		-	-	1506
	SNOW_ASCE		-	-	1280
Dengelenmemiş Kar	ASNOW_TS EN		-	-	1319
	ASNOW_ASCE		-	-	1092
Rüzgar	WIND_TS EN		-	-	482
	WIND_ASCE		-	-	465
Deprem	Eqx_TBDY		1190	-	-
	Eqy_TBDY		-	1190	-
	Eqx_ASCE		1196	-	-
	Eqy_ASCE		-	1196	-
	Eqz_TBDY		-	-	702
	Eqz_ASCE		-	-	702

Çizelge 4.33  $D = 40$  m,  $H/D = 1/6$  olan diamatik kubbenin mesnet tepkileri

Diamatik, $D = 40$ m, $H/D = 1/6$			X Yönü (kN)	Y Yönü (kN)	Z Yönü (kN)
Kar	SNOW_TS EN		-	-	1506
	SNOW_ASCE		-	-	1279
Dengelenmemiş Kar	ASNOW_TS EN		-	-	1183
	ASNOW_ASCE		-	-	1092
Rüzgar	WIND_TS EN		-	-	288
	WIND_ASCE		-	-	277
Deprem	Eqx_TBDY		1175	-	-
	Eqy_TBDY		-	1175	-
	Eqx_ASCE		1041	-	-
	Eqy_ASCE		-	1041	-
	Eqz_TBDY		-	-	703
	Eqz_ASCE		-	-	703


Çizelge 4.34  $D = 70$  m,  $H/D = 1/3$  olan diamatik kubbenin mesnet tepkileri

Diamatik, $D = 70$ m, $H/D = 1/3$		X Yönü (kN)	Y Yönü (kN)	Z Yönü (kN)
Kar	SNOW_TS EN	-	-	4616
	SNOW_ASCE	-	-	3923
Dengelenmemiş Kar	ASNOW_TS EN	-	-	3908
	ASNOW_ASCE	-	-	3350
Rüzgar	WIND_TS EN	-	-	1487
	WIND_ASCE	-	-	1434
Deprem	EQx_TBDY	2044	-	-
	EQy_TBDY	-	2044	-
	EQx_ASCE	2254	-	-
	EQy_ASCE	-	2254	-
	EQz_TBDY	-	-	1838
	EQz_ASCE	-	-	1838


Çizelge 4.35  $D = 70$  m,  $H/D = 1/6$  olan diamatik kubbenin mesnet tepkileri

Diamatik, $D = 70$ m, $H/D = 1/6$		X Yönü (kN)	Y Yönü (kN)	Z Yönü (kN)
Kar	SNOW_TS EN	-	-	4615
	SNOW_ASCE	-	-	3922
Dengelenmemiş Kar	ASNOW_TS EN	-	-	3703
	ASNOW_ASCE	-	-	3349
Rüzgar	WIND_TS EN	-	-	949
	WIND_ASCE	-	-	915
Deprem	EQx_TBDY	3078	-	-
	EQy_TBDY	-	3078	-
	EQx_ASCE	3108	-	-
	EQy_ASCE	-	3108	-
	EQz_TBDY	-	-	1649
	EQz_ASCE	-	-	1649

Çizelge 4.36  $D = 40$  m,  $H/D = 1/3$  olan jeodezik kubbenin mesnet tepkileri

Jeodezik, $D = 40$ m, $H/D = 1/3$			X Yönü (kN)	Y Yönü (kN)	Z Yönü (kN)
<b>Kar</b>	SNOW_TS EN	-	-	1534	
	SNOW_ASCE	-	-	1303	
<b>Dengelenmemiş Kar</b>	ASNOW_TS EN	-	-	1313	
	ASNOW_ASCE	-	-	1154	
<b>Rüzgar</b>	WIND_TS EN	-	-	510	
	WIND_ASCE	-	-	492	
<b>Deprem</b>	EQx_TBDY	1272	-	-	
	EQy_TBDY	-	1272	-	
	EQx_ASCE	1255	-	-	
	EQy_ASCE	-	1255	-	
	EQz_TBDY	-	-	754	
	EQz_ASCE	-	-	754	

Çizelge 4.37  $D = 40$  m,  $H/D = 1/6$  olan jeodezik kubbenin mesnet tepkileri

Jeodezik, $D = 40$ m, $H/D = 1/6$			X Yönü (kN)	Y Yönü (kN)	Z Yönü (kN)
<b>Kar</b>	SNOW_TS EN	-	-	1551	
	SNOW_ASCE	-	-	1318	
<b>Dengelenmemiş Kar</b>	ASNOW_TS EN	-	-	1266	
	ASNOW_ASCE	-	-	1172	
<b>Rüzgar</b>	WIND_TS EN	-	-	325	
	WIND_ASCE	-	-	314	
<b>Deprem</b>	EQx_TBDY	1305	-	-	
	EQy_TBDY	-	1305	-	
	EQx_ASCE	1154	-	-	
	EQy_ASCE	-	1154	-	
	EQz_TBDY	-	-	632	
	EQz_ASCE	-	-	632	

Çizelge 4.38  $D = 70$  m,  $H/D = 1/3$  olan jeodezik kubbenin mesnet tepkileri

Jeodezik, $D = 70$ m, $H/D = 1/3$		X Yönü (kN)	Y Yönü (kN)	Z Yönü (kN)
Kar	SNOW_TS EN	-	-	4552
	SNOW_ASCE	-	-	3868
Dengelenmemiş Kar	ASNOW_TS EN	-	-	3955
	ASNOW_ASCE	-	-	3359
Rüzgar	WIND_TS EN	-	-	1471
	WIND_ASCE	-	-	1419
Deprem	EQx_TBDY	3326	-	-
	EQy_TBDY	-	3326	-
	EQx_ASCE	3562	-	-
	EQy_ASCE	-	3562	-
	EQz_TBDY	-	-	1935
	EQz_ASCE	-	-	1935

Çizelge 4.39  $D = 70$  m,  $H/D = 1/6$  olan jeodezik kubbenin mesnet tepkileri

Jeodezik, $D = 70$ m, $H/D = 1/6$		X Yönü (kN)	Y Yönü (kN)	Z Yönü (kN)
Kar	SNOW_TS EN	-	-	5273
	SNOW_ASCE	-	-	4481
Dengelenmemiş Kar	ASNOW_TS EN	-	-	4489
	ASNOW_ASCE	-	-	4094
Rüzgar	WIND_TS EN	-	-	1096
	WIND_ASCE	-	-	1058
Deprem	EQx_TS EN	3310	-	-
	EQy_TS EN	-	3310	-
	EQx_ASCE	3422	-	-
	EQy_ASCE	-	3422	-
	EQz_TS EN	-	-	1764
	EQz_ASCE	-	-	1764

#### 4.5.5.2 Çekme Çemberi Kesit Tesirleri

Çekme çemberi kesit tesirleri her bir modellenen kubbe için Çizelge 4.40'da verilmiştir.

Çizelge 4.40 Çekme çemberinde oluşan maksimum kesit tesirleri tablosu

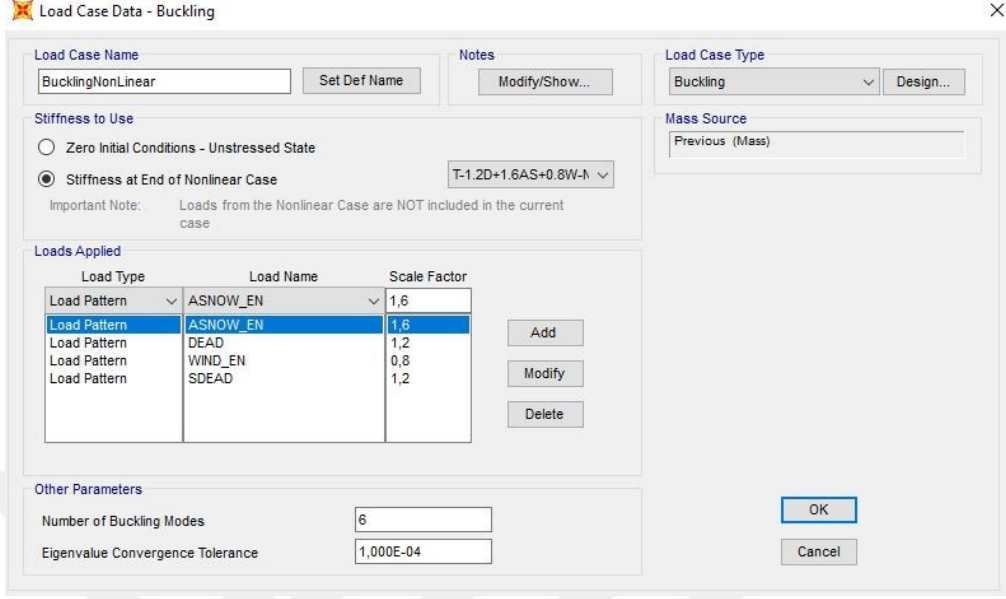
Çekme Çemberinde Oluşan Maksimum Kesit Tesirleri							
Model	Yönetmelik	P (kN)	V2 (kN)	V3 (kN)	T (kNm)	M2 (kNm)	M3 (kNm)
Diamatik, $D = 40$ m, $H/D = 1/3$	AISC	405	16	35	6	3	6
	TÇYY	394	26	53	1	16	4
Diamatik, $D = 40$ m, $H/D = 1/6$	AISC	1049	33	-3	21	29	-2
	TÇYY	1036	35	-4	15	25	14
Diamatik, $D = 70$ m, $H/D = 1/3$	AISC	1283	31	47	1	26	10
	TÇYY	1212	36	80	1	51	9
Diamatik, $D = 70$ m, $H/D = 1/6$	AISC	3125	74	37	7	-6	-27
	TÇYY	2966	69	34	13	16	-3
Jeodezik, $D = 40$ m, $H/D = 1/3$	AISC	548	141	1	0	-1	211
	TÇYY	506	231	1	0	-1	348
Jeodezik, $D = 40$ m, $H/D = 1/6$	AISC	1199	9	-4	5	-4	12
	TÇYY	1159	21	-4	6	-3	29
Jeodezik, $D = 70$ m, $H/D = 1/3$	AISC	1485	51	6	1	6	47
	TÇYY	1413	16	1	0	3	65
Jeodezik, $D = 70$ m, $H/D = 1/6$	AISC	3621	21	11	36	14	19
	TÇYY	3337	46	11	30	11	67

#### 4.5.6 Stabilité Analizleri ve Değerlendirilmesi

Tüm modeller için ayrı ayrı yapılan burkulma analizinde en kritik kombinasyonlar tespit edilmiş; azaltılmış rijitlik ve ikinci mertbe etkilerinin de hesaba katılması ile burkulma yük faktörleri belirlenmiştir. Modellerdeki burkulma yük faktörü minimum 1 olacak şekilde eleman boyutları seçilmiştir. Örnek gösterim olması adına; 70 metre çapında ve 1/6 basıklık oranındaki jeodezik kubbenin stabilitesini kaybettiği yükleme tipi denklem 4.25'te tanımlanan eşitlikle verilmiştir.

$$[1,2 G + 1,6 \text{ Asimetrik S} + 0,8W] + 1,13 \times [1,2 G + 1,6 \text{ Asimetrik S} + 0,8W] \quad (4.25)$$

Modellerde çap büyüdükçe ve basıklık artıkça kritik burkulma yüküne erişim kolaylaşmaktadır.



Şekil 4.32 Burkulma için programa yapılan tanımlama

Burkulma analizi sonuçları, modellenen her bir kubbe tipi için Çizelge 4.41’de verilmiştir.

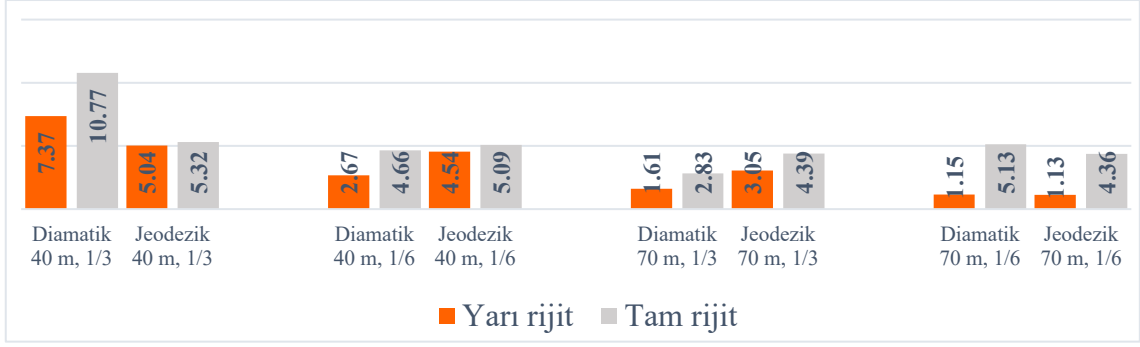
Çizelge 4.41 Burkulma analizi sonuçları

Kubbe Tipi	Burkulma Faktörü	
	Diamatik Kubbe	Jeodezik Kubbe
$D = 40$ m ve $H/D = 1/3$	7,37	5,04
$D = 40$ m ve $H/D = 1/6$	2,67	4,54
$D = 70$ m $H/D = 1/3$	1,61	3,05
$D = 70$ m ve $H/D = 1/6$	1,15	1,13

Yarı rijitliğin yapı stabilitesinde ne derece önemli olduğunu görebilmek adına, kıyaslama amaçlı aynı yapıların düğüm noktalarının tam rijit olması sonucunda burkulma faktörü ve yarı rijitliğe göre kıyaslaması Çizelge 4.42’de gösterilmiştir.



Çizelge 4.42 Yarı ve tam rijit düğüm noktaları için burkulma faktörü



Çizelge 4.42 incelendiğinde yarı rijit düğüm noktalı modellerde stabilite hassasiyetinin daha yüksek olduğu gözükmemektedir. Yarı rijit düğüm noktalı modellerde basıklık, burkulma faktörünü oldukça düşürmektedir. Açıklığın artması da burkulma faktörünü azaltıcı bir değişken olarak görünmektedir. Kubbe tipleri ile burkulma faktörü arasında tek başına anlamlı bir ilişki görülmemiştir. Tam rijit düğüm noktalı modellerde yarı rijit düğümlü modellere göre temel iki farklılık görülmüştür. İlki; kubbelerde basıklık oranı ile burkulma faktörü arasında anlamlı bir ilişki bulunmamasıdır; hesaplamalara göre basıklık oranının artması burkulma faktörü değerlerini artırır veya azaltır şeklinde net bir ifadeye bulunulamamaktadır. İkinci farklılık ise burkulma faktörlerinin daha yüksek değerlerde bulunmasıdır.

#### 4.5.7 Vurgu Stabilitesi Tahkiki

Geniş açıklıklı ve özellikle de basık tek tabakalı sistemlerde vurgu stabilitesi (snap-through), yapının emniyeti açısından göz önünde tutulmalıdır. Düğüm noktalarında doğrusal olmayan geometrik davranışın sergilendiği bu stabilite sorununun çözümü için doğrusal olmayan denge denklemlerinin analizi gereklidir. Bu denklemlerin çözümünde Newton-Raphson ve Arc Length metodları kullanılmaktadır. Vurgu stabilitesi tahkikinde ise yer değiştirme temelli yaklaşım olması ve kritik burkulma yükü değerinden sonraki burkulma sonrası bölgedeki yük - yer değiştirme denge yolunun doğru tespit edilebilmesi sebeplerinden dolayı arc length metod kullanılmalıdır. SAP2000 programında Newton-Raphson metodu kullanılabildiği için, vurgu stabilitesi tahkiki tez kapsamı dışında tutulmuştur.

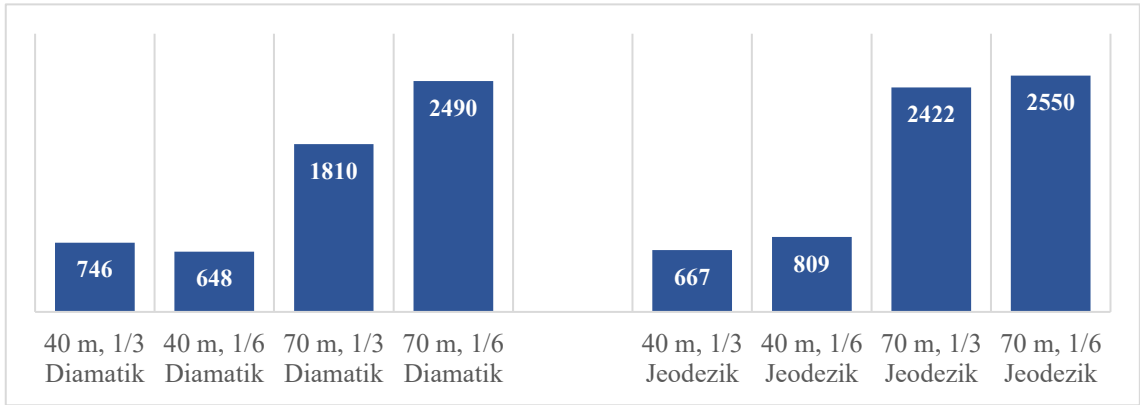
#### 4.5.8 Modellerin Maliyet Hesabı

Tüm modellere ait maliyet listesi Çizelge 4.43'te, kubbelerin çelik tonajlarının karşılaştırma grafiği de Çizelge 4.44'te sunulmuştur.

Çizelge 4.43 Maliyet hesabı tablosu

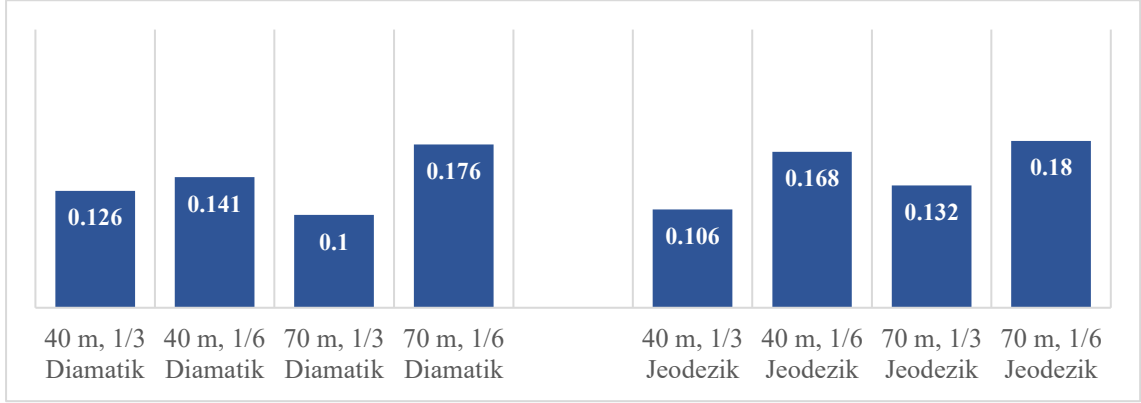
	Kesit	Adet	Ağırlık (kN)	Toplam Ağırlık (kN)
Diamatik, $D = 40$ m, $H/D = 1/3$	RHS150×75×5	1008	450	746
	RHS400×400×20	72	294	
Diamatik, $D = 40$ m $H/D = 1/6$	RHS150×75×5	800	354	648
	RHS400×400×20	64	294	
Diamatik, $D = 70$ m, $H/D = 1/3$	RHS150×75×5	2760	1295	1810
	RHS500×300×20	120	515	
Diamatik, $D = 70$ m, $H/D = 1/6$	RHS300×75×6	2080	1975	2490
	RHS500×300×20	104	515	
Jeodezik, $D = 40$ m, $H/D = 1/3$	RHS150×75×5	745	370	667
	RHS400×400×20	70	297	
Jeodezik, $D = 40$ m $H/D = 1/6$	RHS150×75×10	495	510	809
	RHS400×400×20	50	299	
Jeodezik, $D = 70$ m, $H/D = 1/3$	RHS150×75×10	1960	1911	2422
	RHS500×300×20	130	511	
Jeodezik, $D = 70$ m, $H/D = 1/6$	RHS300×75×6	1815	2000	2550
	RHS500×300×20	115	550	

Çizelge 4.44 Kubbe tipi ve çelik maliyet karşılaştırmalı grafik (kN)



Kubbelerin yüzey alanına karşılık gelen çelik maliyetinin karşılaştırmalı grafiği  $1 \text{ m}^2$ 'lik alanda kullanılan çelik miktarı (kN) olarak Çizelge 4.45'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.45 Kubbelerin yüzeyinde kullanılan çelik maliyetlerinin karşılaştırması (kN)



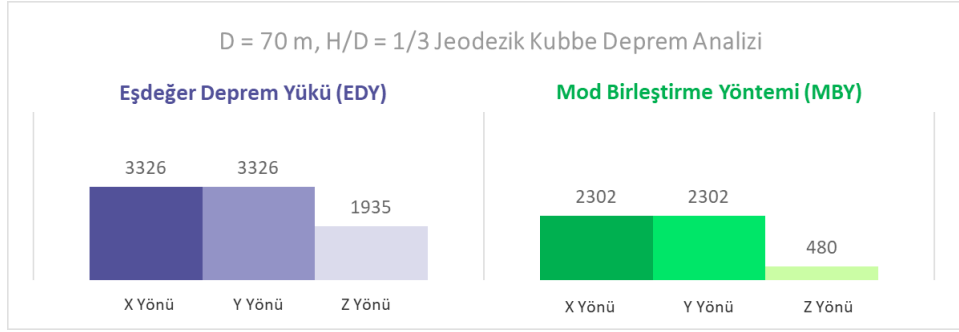
#### 4.5.9 Yapıların Modal Analizi

Yapıların modal analizi, yapının dinamik davranışı hakkında daha fazla bilgi sahibi olmak adına yapılmıştır. Tüm modellerde ortak özellik, geleneksel yapılara nazaran çok daha yüksek mod sayısı ile etkin modal kütlelerin TBDY'nin istediği %95 oranına ulaşabilmesidir. Basıklık arttıkça, %95 etkin modal kütle için gerekli mod sayısı azalmaktadır. Basıklığın hakim periyoda etkisi düşük seviyededir. Basıklığın yüksek olduğu modellerde düşey mod şekli daha öne çıkmaktadır. Bu nedenle düşey deprem kuvvetinin miktarı basıklıkla birlikte artmaktadır. Jeodezik kubbeler, aynı geometrik özelliklere sahip olduğu diamatik kubbelere nazaran daha düşük periyoda sahiptir. Bu da daha rijit bir davranış sergileyeceği anlamına gelmektedir. Modal analiz ile hesaplanan düşey deprem kuvveti, basıklığa bağlı olmaksızın, tüm modellerde, denklem 4.7 olarak belirtilen eşitlik aracılığıyla bulunan değerlerden oldukça düşük çıkmaktadır.

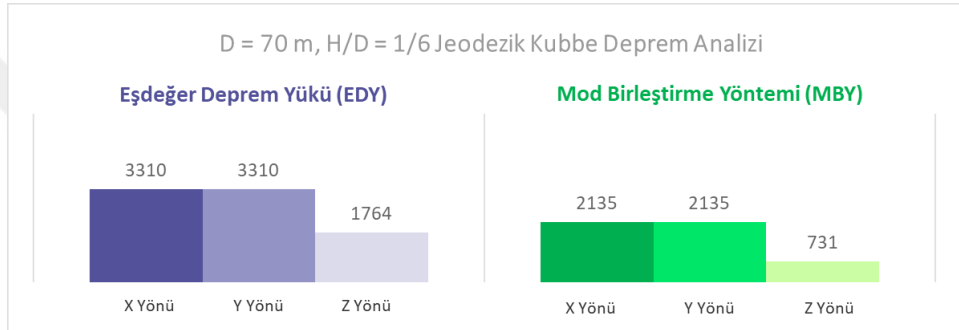
Çizelge 4.46 Modellerin modal analiz bilgilerinin tablo gösterimi

Kubbe Modeli	Toplam Modal Kütlelerin %95 Oranına Ulaştığı Mod Sayısı	Hakim Periyot (T <sub>xy</sub> )
Diamatik, $D = 40$ m, $H/D = 1/3$	350	0,20 sn
Diamatik, $D = 40$ m, $H/D = 1/6$	266	0,23 sn
Diamatik, $D = 70$ m, $H/D = 1/3$	>1000	0,36 sn
Diamatik, $D = 70$ m, $H/D = 1/6$	650	0,33 sn
Jeodezik, $D = 40$ m, $H/D = 1/3$	287	0,18 sn
Jeodezik, $D = 40$ m, $H/D = 1/6$	164	0,17 sn
Jeodezik, $D = 70$ m, $H/D = 1/3$	686	0,24 sn
Jeodezik, $D = 70$ m, $H/D = 1/6$	592	0,29 sn

Çizelge 4.47 70 m, 1/3 Jeodezik kubbenin MBY ve EDY yöntemlerine göre deprem yüklerinin kıyası

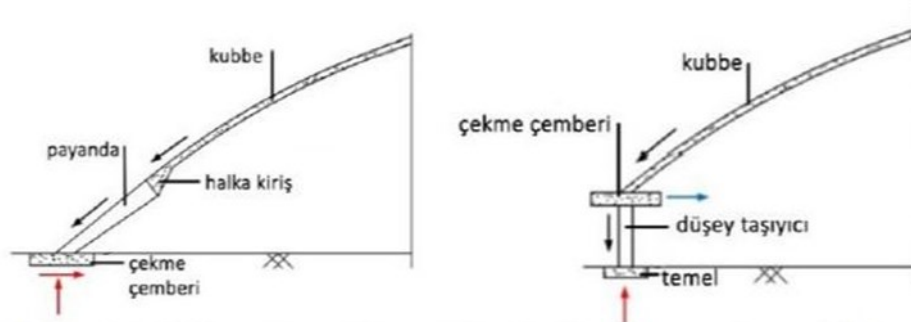


Çizelge 4.48 70 m, 1/6 Jeodezik kubbenin MBY ve EDY yöntemlerine göre deprem yüklerinin kıyası



#### 4.5.10 Kolonlu Kubbelerin Davranışa Etkisi

Kubbeler üzerine yapılan çalışmalarda temele mesnetlenme konusu üzerinde pek az çalışma yapılmıştır. Mesnetlenme konusunda uygulamalarda kullanılan iki yöntem mevcuttur. Payandalı ve kolonlu yöntemler ile kubbeler altyapıya ya da zemine yükünü aktarabilmektedir [75].



Şekil 4.33 Payandalı (Soldaki) ve kolonlu (Sağdaki) yöntemin gösterimi [75]



Şekil 4.34 Al Rashid AVM, Suudi Arabistan [76]

Tez kapsamında hazırlanan sekiz kubbede de kolonlu yöntem tercih edilmiştir. Aynı yönteme ait uygulama çalışması da Şekil 4.34’te sunulmuştur. 1 m çaplı dairesel kolonlar modellerde kullanılmıştır.

Kubbelerin stabilitesinde ve kar yüklemesine göre yapılan tahkiklerde kolonların etkisi değişikliğe neden olmamaktadır. Rüzgar yüklemesinde ise kesiti etkileyecek değişim meydana gelmemekle beraber yüklerin dağılımı değişmektedir. En kayda değer fark deprem analizinde olmaktadır. Yapıların modal analizinde etkin kütle katılımı çok daha yüksek mod sayısı ile olmaktadır. Yüksek frekanslı modlar yapının davranışında daha etkin olmaktadır.

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında üretilen tek tabakalı kubbelerin taşıyıcı sistem analizlerinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- TBDY-2018, TS-EN 1991 1-3, TS EN 1991 1-4 ve TÇYY-2016 Yönetmeliklerine göre belirlenen rüzgar, deprem ve kar yüklemeleri ile bu yüklemelerin tahkiki sonucu oluşan kesit tesirleri; ASCE 7-16 yönetmeliğine göre hazırlanan yüklemeler ve AISC yönetmeliğine göre yapılan tahkiklerden daha elverişsiz sonuçlar vermektedir.
- Kar ve rüzgar yüklemeleri için Türkiye'deki mevcut yönetmelikler Eurocode normu olması nedeniyle, ASCE 7-16'ya kıyasla yaklaşım farklılıkları mevcuttur. ASCE 7-16'da rüzgar hızı 3 sn'lik aralıklar ile ölçülür ve türbülans etkileri dikkate alınırken, TS-EN standartlarında ölçüm periyodu 10 dk'dır. Bu durum hesaplanan hız basınçlarında farklılığa neden olmaktadır.
- TS-EN 1991 1-3'e göre belirlenen dengelenmemiş kar yüklemesi için yapının tamamı göz önüne alınırken; ASCE 7-16'ya göre dengelenmemiş kar yüklemesi yapının yarısına etkitilmektedir. Bu farklılık tabanda oluşan devrilme momenti değerleri arasında büyük farklılığa neden olmaktadır.
- Kubbe analizinde en elverişsiz kesit tesirlerine sebep olan yüklemeler; dengelenmemiş kar, kar, deprem ve rüzgar yüklemeleri olarak sıralanmaktadır.
- Kolon kotuna yaklaştıkça, özellikle dengelenmemiş kar yüklemesinden dolayı, elemanlarda aksenal kuvvet (basınç) değeri artmakta ve bu nedenle kapasitelerde oran; AISC normlarında maksimum %70-75, TÇYY normlarında ise maksimum %80-85 düzeyine ulaşmaktadır.

- Sıcaklık farkından oluşan yük değeri, özellikle açıklığın ve basıklığın büyük olduğu kubbelerde 100 kN eksenel kuvvet mertebelerine ulaşmaktadır.
- Basıklık arttıkça elemanlardaki basınç kuvveti artmaktadır. Kubbelerde basıklık arttıkça basınç kuvvetleri; diamatik tarzı kubbeler için %52-58, jeodezik tarzı kubbeler için %46-58 oranında artmaktadır.
- Çekme çemberindeki eksenel kuvvet, basıklık oranının 1/6 olduğu modellerde, 1/3 olanlara nazaran 2-2,5 kat daha fazla çıkmaktadır. Kubbe tiplerine göre ise eksenel kuvvet seviyelerinde önemli bir farklılık bulunmamakla birlikte jeodezik kubbelerde daha fazla çekme kuvveti oluşmaktadır.
- Kubbeler, sehim açısından değerlendirildiğinde; jeodezik kubbelerde açıklığın 70 metre olduğu modellerin daha az sehim yaptığı gözükmemektedir. Her iki kubbe tipi de sehim şartını rahatlıkla sağlamaktadır.
- Burkulma yük faktörleri incelendiğinde basıklığın ve açıklığın artması kritik burkulma yüküne erişimi yakınlaştırmaktadır. Basıklık oranının artması ile burkulma yük faktörleri; 40 m diamatik kubbelerde %64, jeodezik kubbelerde %10; 70 m diamatik kubbelerde %29, jeodezik kubbelerde %63 azalmaktadır.
- 40 metre açıklıklı kubbelerde periyot aralığı 0,17 - 0,23 sn'dir. 70 metre açıklıklı kubbelerde ise periyot aralığı 0,24 - 0,36 sn dir. 40 metre açıklıklı jeodezik kubbeler dışındaki modellerde basıklık arttıkça, periyot uzamaktadır. Jeodezik kubbeler, aynı özelliklere sahip diamatik kubbelere kıyasla %10 - %33 kadar daha düşük periyoda sahiptir.
- Kubbelerin kolonlu olup olmaması da yapıların dinamik davranışına etki etmektedir. Özellikle deprenselliğin yüksek olduğu bölgelerde, ön tasarım aşamasında da kolonlu çalışmalar yapılması önerilmektedir. Etkin modal kütlelerin %95 mertebesine ulaşabilmesi için çok daha fazla sayıda modun hesaplanması gereklidir. Yüksek frekanslı modların yapının dinamik davranışına hakimiyeti daha fazla olmaktadır.
- Basıklık ve açıklık arttıkça depremin meydana getirdiği kesit tesirleri büyümektedir. Depremin düşey yönlü etkisi jeodezik kubbelerde modellerin basıklığı arttıkça küçülmektedir.
- Kubbelerin depreme karşı analizinde; hem analiz süresinin uzun olması, hem de oluşan taban kesme kuvvetlerinin düşük olması nedenlerinden dolayı "Mod Birleştirme Yöntemi" yerine "Eşdeğer Deprem Yüğü" yöntemi önerilmektedir.

- Kullanılan elik profillerin ağırlıkları incelendiğinde, 40 metre açıklıklı modellerde, basıklığın az olması (1/3) durumunda jeodezik %12; yüksek olması (1/6) durumunda ise diamatik kubbe daha %25 daha ekonomik sonuçlar vermektedir. 70 metre açıklıklı modellerde ise, basıklığın az olması durumunda diamatik %34 daha ekonomik kalırken, yüksek olması durumunda diamatik ve jeodezik kubbeler hemen hemen eşit (%2 fark) bir ekonomikliğe sahiptir.





## KAYNAKLAR

- [1] United Nations, (2009), “World Urbanization Prospects”, New York/USA.
- [2] IASS (International Association for Shell and Spatial Structures), (1982), “Analyses, Design and Realization of Space Frames”, Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures, Madrid/Spain.
- [3] Lan, T.T., (2005), Space Frame Structures, Structural Engineering Handbook (Second Edition), Waifah ve Eric (Derl.), CRC Press LLC, USA.
- [4] Savaşır, K. ve Tuğrul, F., (2014), “Uzay Kafes Sistemlerle Yaratılabilecek Üst Örtülerin Yüzey Geometrilerinin İncelenmesi: Heydar Aliyev Merkezi Örneği”, 7. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu, İstanbul.
- [5] Changi Airport, “Now Boarding”, <http://nowboarding.changiairport.com/discover-changi/instagram-worthy-photos-at-jewel.html>, 12.05.2019.
- [6] Architonic, <https://www.architonic.com/en/project/studio-fuksas-the-new-milan-trade-fair/5103915>, 12.05.2019.
- [7] CNN, “Louvre Abu Dhabi Receives 1 Million Visitors in Its First Year”, <https://edition.cnn.com/style/article/louvre-abu-dhabi-first-year/index.html>, 01.02.2019.
- [8] Gulf Business, “Concrete Work On Abu Dhabi’s Louvre Museum Almost Complete”, <https://gulfbusiness.com/concrete-work-abu-dhabis-louvre-museum-almost-complete/>, 01.02.2019.
- [9] Go Shop Beijing, “The Water Cube - National Aquatics Center”, <https://goshopbeijing.com/the-water-cube-national-aquatics-center-2738.html>, 24.02.2019.
- [10] Arup, “National Aquatics Center (Water Cube): A Form Inspired by the Natural Formation of Soap Bubbles”, <https://www.arup.com/projects/chinese-national-aquatics-center>, 24.02.2019.
- [11] Verlag, K.K., (1985), IL 31 Bambus – Bamboo, Stuttgart.
- [12] Savaşır, K., (2016), “Kubbelerin Yapım Sistemlerinin Yük Aktarım Prensiplerine Göre İrdelenmesi”, 8. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu, İstanbul.

- [13] Massachusetts Institute of Technology (MIT), “The Roman Pantheon”, <http://web.mit.edu/21h.405/www/Pantheon/Pantheon/Dome.html>, 25.02.2019.
- [14] Lonely Planet, “Change of Plan in Italy as Rome’s Pantheon Will Stay Free to Visitors”, <https://www.lonelyplanet.com/news/2019/01/09/rome-pantheon-free-visitor-entry/>, 25.02.2019.
- [15] Structurae – International Database and Gallery of Structures, <https://structurae.net/photos/11325-palazzetto-dello-sport-rome>, 26.02.2019.
- [16] Australian Broadcasting Corporation (ABC), “Shine Dome Canberra”, <https://www.abc.net.au/radionational/programs/blueprintforliving/shine-dome-canberra/7451700>, 26.02.2019.
- [17] Paristoric, “La Bourse de Commerce”, <http://www.paristoric.com/index.php/paris-d-hier/lieux-historiques/1453-la-bourse-de-commerce?tmpl=component>, 26.02.2019.
- [18] Architecture, “Circlehouse/Fichtebunker”, [http://www.cordia-schlegelmilch.de/fotografie/architektur/?DOC\\_INST=5](http://www.cordia-schlegelmilch.de/fotografie/architektur/?DOC_INST=5), 26.02.2019.
- [19] Weller, B., Tasche, M. ve Baatz, J., (2009), “Lamella Roof Constructions by Hugo Junkers”, Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures - Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia/Spain.
- [20] Tamke, M., Riber, J. ve Jungjohann, H., , (2010), “Generated Lamella”, CITA-Center for Information Technology and Architecture, Acadia 10:340-347.
- [21] Detail Inspiration, “Discussion: Pure Invention? – The Lamella Halls of the Aviation Pioneer Hugo Junkers”, <https://inspiration.detail.de/discussion-pure-invention-the-lamella-halls-of-the-aviation-pioneer-hugo-junkers-113111.html?lang=en>, 26.02.2019.
- [22] Britannica, “Astrodome”, <https://www.britannica.com/topic/Astrodome>, 19.06.2019.
- [23] The Guardian, “Houston's Astrodome: 'the Eighth Wonder of the World' – A History Of Cities in 50 Buildings”, <https://www.theguardian.com/cities/2015/apr/09/houston-astrodome-wonder-world-history-cities-50-buildings>, 26.02.2019.
- [24] AV Network, “Zeiss-Planetarium Jena Upgrades With Barco Projection”, <https://www.avnetwork.com/news/zeiss-planetarium-jena-upgrades-with-barco-projection>, 26.02.2019.
- [25] Fireblace, W., (2013), “The Missing Planet”, Architectural Association-AA Files 66:126-145.
- [26] Hugh Dutten Associés - HDA, “Maritime Museum - Osaka”, <https://www.hda-paris.com/project/maritime-museum-osaka-japon/>, 01.07.2019.
- [27] Antarticsun, “Dome Deconstruction Photos by Forest Banks”, <https://antarticsun.usap.gov/features/contentHandler.cfm?id=1990>, 01.07.2019.

- [28] Wikimedia Commons - the free media repository, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Queen\\_Mary\\_Dome\\_\(3298007004\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Queen_Mary_Dome_(3298007004).jpg), 26.02.2019.
- [29] SCI Architects, “Fukuoka YAHOO! Dome”, <https://sciarch.com/projects/fukuoka-yahoo-dome/>, 26.02.2019.
- [30] Only in Your State, “The World’s Largest Indoor Desert is Right Here in Nebraska And You’ll Want To Visit”, <https://www.onlyinyourstate.com/nebraska/worlds-largest-indoor-desert-ne/>, 26.02.2019.
- [31] Sophianopoulos, D., Argyriou, A. ve Papanikolaou, C., (2011), “Second Order Plastic Analysis and Design of a Steel Schwedler Dome by Means of Special Software”, 7th National Conference on Steel Structures, Volos/Atina.
- [32] Strixis Techniki, “Ξενοδοχείο Rodos Palace”, <https://www.stirixistech.com/projects/rodospalace/>, 27.02.2019.
- [33] Rodos Palace, <https://www.rodos-palace.gr/rhodes-banquets-and-exclusive-catering/>, 27.02.2019.
- [34] Geometrica, “Domes”, <https://www.geometrica.com/en/latestnews/domes>, 01.01.2019.
- [35] Gasometer City, <http://www.gasometer-city.eu/gasometer.htm>, 25.02.2019.
- [36] Makowski, Z.S., (1984), Analysis, Design and Construction of Braced Domes, Nichols Publishing Company, New York/USA.
- [37] Krystal Grand Punta Cancun, <https://en.krystalgrand-puntacancun.com/photos/>, 15.06.19.
- [38] Houston Chronicle, “Astrodome Redevelopment Plan May Be Underfunded”, <https://www.houstonchronicle.com/business/real-estate/article/Astrodome-redevelopment-plan-may-be-underfunded-13558923.php#photo-16608949>, 14.03.2019.
- [39] Vardar, Ö., (2012), “Tek Tabakalı Uzay Kafes Sistemlerin Tasarımı”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [40] Ermiş, T., (2014), “Düzgün Çokyüzlülerin Metrik Geometrilere İlişkileri”, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Matematik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı Doktora Tezi, Eskişehir.
- [41] Ramaswamy, G.S., Eekhout, M. ve Suresh, G.R., (2002), Analysis, Design and Construction of Steel Space Frames, Thomas Telford Publishing, London/[34] Kingdom.
- [42] Colorado State University, “Spherical Geodesic Grids.”, <http://kiwi.atmos.colostate.edu/rr/groupPIX/ross/ross1/ross1.html>, 01.04.2019.
- [43] Zip Tie Domes, <https://www.ziptiedomes.com/faq/What-Is-Geodesic-Dome-Frequency-Explained.htm>, 13.02.2019.

- [44] Mungan, İ., (2003), “Üç Olağanüstü Çelik Strüktür”, Çelik Yapılar – TUCSA (Türk Yapısal Çelik Derneği) Yayını, 6-10.
- [45] World Stadiums, “Nagoya Dome”, [http://www.worldstadiums.com/stadium\\_pictures/asia/japan/nagoya\\_dome.html](http://www.worldstadiums.com/stadium_pictures/asia/japan/nagoya_dome.html), 12.03.2019.
- [45] Iwasaki Electric, “Nagoya Dome”, <https://www.eye.co.jp/projects/examples/detail/id/spb14/cid/6/sid/18/>, 12.03.2019.
- [47] Novum Structures, “Salvador Dali Museum”, <https://novumstructures.com/project/salvador-dali-museum/>, 14.03.2019.
- [48] Albertyn, H.L., Haas, T.N. ve Dunaiski, P.E., (2014), “Accounting for Momentrotation Behaviour of Connections in Portal Frames”, Journal of the South African Institution of Civil, 960:69-75.
- [49] Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Yönetmelik, (2016).
- [50] Stephan, S., Pan, F. ve Huang, Y., (2010), “The Freeform Structure of the UAE Pavilion at the Shanghai EXPO 2010”, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Spatial Structures – Permanent and Temporary, Shanghai/China.
- [51] Ma, H., Shan, Z. ve Fan, F., (2017), “Dynamic Behaviour and Seismic Design Method of A Single-Layer Reticulated Shell with Semi-Rigid Joints”, Thin-Walled Structures, 119:544-557.
- [52] Stephan, S., Sánchez-Alvarez, J. ve Knebel, K., (2004), “Reticulated Structures on Free-Form Surfaces”, MERO GmbH & Co. KG, Würzburg, Germany.
- [53] Gioncu, V., (1995), “Buckling of Reticulated Shells: State of the Art”, International Journal of Space Structures, 10:1-46.
- [54] Kaya, M.P., (2006), “Mevcut Betonarme Binaların Deprem Performanslarının Belirlenmesinde Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Yöntemlerin Karşılaştırılması Üzerine Sayısal Bir İnceleme”, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [55] Hrinda, G.A., (2010), “Snap-Through Instability Patterns in Truss Structures”, AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th, Florida/USA.
- [56] Fan, F., Cao, Z. ve Shen, S., (2010), “Elasto-plastic stability of single-layer reticulated shells”, Thin-Walled Structures, 48:827-836.
- [57] Kato, S., Kim, J.M. ve Cheong, M.M., (2003), “A New Proportioning Method for Member Sections of Single Layer Reticulated Domes Subjected to Uniform and Non-Uniform Loads”, Engineering Structures, 25:1265-1278.
- [58] Ma, H., Yu, L., Fan, F. ve Yu, Z., (2019), “Mechanical Performance of an Improved Semi-Rigid Joint System Under Bending and Axial Forces for Aluminum Single-Layer Reticulated Shells”, Thin-Walled Structures, 142:322-339.

- [59] Wei, D.M ve Gao, S.F., (2017), “Seismic Response Analysis of K8 Pattern Single-Layer Reticulated Domes Under Vertical Rare Earthquakes”, *Procedia Engineering*, 210:417-424.
- [60] Zhao, Z., Liu, H. ve Chen, Z., (2017), “Thermal Behavior of Large-Span Reticulated Domes Covered by ETFE Membrane Roofs Under Solar Radiation”, *Thin-Walled Structures*, 115:1-11.
- [61] TBDY (Türk Bina ve Deprem Yönetmeliği), (2018), “Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar”.
- [62] TS EN 1991-1-3, (2009), Yapı Üzerindeki Kar Yükleri ile İlgili Türk Standardı.
- [63] TS EN 1991-1-4, (2005), Yapı Üzerindeki Rüzgar Yükleri ile İlgili Türk Standardı.
- [64] AISC 341-16, (2016), “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings”.
- [65] AISC 360-16, (2016), “Specification for Structural Steel Buildings”.
- [66] ASCE SEI 7-16, (2016), “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures”.
- [67] Roesset, J.M. ve Yao, J.T.P., (2001), “Suggested Topics for a Civil Engineering Curriculum”, *The 2001 American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition, New Mexico/USA*.
- [68] Estrada, H., (2007), “Using the AISC Steel Buildings Case Study in a Structural Engineering Course Sequence”, *The 2007 American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition, Hawaii/USA*.
- [69] Sarma, K.C. ve Adeli, H., (2005), “Comparative Study of Optimum Designs of Steel High Rise Building Structures Using Allowable Stress Design and Load and Resistance Factor Design Codes”, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Vol. 10: Issue 1.
- [70] Demirtaş, A.E., (2012), “A Comparative Study On Direct Analysis Method And Effective Length Method In One-Story Semi-Rigid Frames”, *Middle East Technical University Natural and Applied Sciences Civil Engineering Master thesis, Ankara*.
- [71] Durmaz, M.G., (2015), “Çelik Yapılarda Stabilite Analizi Yaklaşımlarının Değerlendirilmesi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, İstanbul*.
- [72] Yamada, S., Takeuchi, A., Tada, Y. ve Tsutsumi K., (2001), “Imperfection-Sensitive Overall Buckling of Single-Layer Lattice Domes”, *Journal of Engineering Mechanics*, 127: 382-386.
- [73] AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı), “Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması”, <https://tdth.afad.gov.tr/>, 02.05.2019.
- [74] Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ISTANBUL>, 04.04.2019.

- [75] Segal, E.M. ve Adriaenssens, S., (2013), “Norfolk Scope Arena: A US Dome with a Unique Configuration of Interior Ribs and Buttresses”, Proc. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Beyond the Limits of Man, Poland.
- [76] Polarkon, “Al Rashid Alışveriş Merkezi Çatı Konstrüksiyonları”, <http://www.polarkon.com.tr/?portfolio=al-rashid-mall>, 15.07.2019.
- [77] Paech, C., (2016), “Structural Membranes Used in Modern Building Facades”, *Procedia Engineering*, 155:61-70.
- [78] Robinson, L.A., (2005), “Structural Opportunities of EFTE (ethylene tetra fluoro ethylene)”, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- [79] Vural N., (2004), “Uzay Kafes Sistemlerinde Örtü Malzemesi Seçimi”, 2. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi, İstanbul.
- [80] Wilson, A.G. ve Brown, W.P., (1964), “Thermal Characteristics of Double Windows”, Window Performance and New Technology National Research Council, Canada.
- [81] Şenkal, F., (2005), “Farklı Cam Türlerinin Performans Kriterlerinin İncelenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 1:15-21.
- [82] Şişecam, “Mimari Camlar”, <http://www.sisecamduzcam.com/tr/faaliyet-alanlarimiz/mimari-camlar>, 19.05.2019.
- [83] Subramanian, N., (2011), *Steel Structures: Design and Practice*, Oxford University Press, New Delhi.
- [84] Harris, R., Haskins, S. ve Roynon, J., (2008), “The Savill Garden Gridshell Design and Construction”, *The Structural Engineer*, 86:27-34.
- [85] Ahmed, M. ve Stutzki, C., (2015), “Steel/Aluminum Grid Shells for Skylights”, *Structures Congress 2015*, Oregon/USA.
- [86] Ding, Y., Chen, Z.T., Zong, L. ve Yan, J.B., (2017), “A Theoretical Strut Model for Severe Seismic Analysis of Single-Layer Reticulated Domes”, *Journal of Consturctional Steel Research*, 128:661-671.
- [87] Zhi, X.D., Nie, G.B., Fan, F. ve Shen, S.Z., (2012), “Vulnerability and Risk Assessment of Single-Layer Reticulated Domes Subjected to Earthquakes”, *Journal of Structural Engineering*, 138:1505-1514.
- [88] Ma, H., Ren, S. ve Fan, F., (2016), “Parametric Study and Analytical Characterization of the Bolt–Column (BC) Joint for Single-Layer Reticulated Structures”, *Engineering Structures*, 123:108-123.
- [89] Li, H., Wang, J., Ren, X. ve Lu, W., (2015), “Dynamic Collapse Analysis of Reticulated Shell Structures with Substructures”, 2015 International Conference on Structural, Mechanical and Material Engineering, Dalian/China.
- [90] López, A., Puente, I. ve Serna, M.A., (2007), “Direct Evaluation of the Buckling Loads of Semi-Rigidly Jointed Single-Layer Latticed Domes Under Symmetric Loading”, *Engineering Structures*, 29: 101-109.

- [91] Yang, F., Zhi, X. ve Fan, F., (2019), “Effect Of Complex Damping on Seismic Responses of A Reticulated Dome and Shakin Table Test Validation”, *Thin-Walled Structures*, 134:407-418.
- [92] Tissaoui, J., (1991), “Stability Analysis of the Church of the Nazarane Varax Dome”, Virginia Polytechnic Institute and State University Thesis (M.S.), USA.
- [93] Xiong, Z., Guo, X., Luo, Y. ve Zhu S., (2017), “Elasto-Plastic Stability of Single-Layer Reticulated Shells with Aluminium Alloy Gusset Joints”, *Thin-Walled Structures*, 115:165-175.



## **TEK TABAKALI KAFES SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ÖRTÜLER**

Tek tabakalı uzay kafes sistemlerinde kullanılan örtüler 5 ana tipte malzemeden olabilir. Bu malzemeler membran, cam, plastik, metal ve ahşaptır.

### **A-1 Membran Örtüler**

Tek tabakalı uzay kafes sistemlerinde kullanılacak olan membranlar; çekme kuvvetiyle oluşan ön germe kuvveti ile şekil alan bir forma sahiptirler ve hem taşıyıcı hem de örtü görevi görürler. Bu membran örtü malzemelerinin dayanımları yüksek, hem ses hem de ısı izolasyonu olan, kendi kendini temizleyebilme özelliğine sahip ve yangına karşı dayanıklı olması gereklidir [77]. Membran örtü malzemesi olarak kullanılan temel tipteki malzemeler PVC, PTFE ve ETFE'dir. Bu malzeme tipine sahip örtüler sistemdeki yükleri kablolara, çelik kolonlara veya kafes sistemlere aktarmaktadır.

#### **a. PVC Türü Membranlar**

En çok kullanılan membran türlerinden biri olan PVC (Polyvinil Chloride) polyester veya polivinil gibi yüksek dayanımlı elyaf malzemelerden oluşmaktadır.

PVC membran örtüde asıl taşıyıcı rolü üstlenen elyaf liflerden elde edilen özel kumaştır. Bu lifler dış çevre koşullarına dayanıklılık göstermesi için farklı kimyasal ve fiziksel malzemelerle kaplanabilirler. PVC bir membran örtüde en içte temel ürünü olan elyaf malzemeler bulunur, onu çevreleyen ana kaplama ve en dışta da koruyucu yüzey kaplamaları yer alır. Genelde 20 yıllık ömürleri vardır [77].

#### **b. PTFE Türü Membranlar**

PTFE (Poly Tetra Fluoro Ethylene) bir başka membran örtü malzemesi tipidir. Bu tip membran örtüler cam elyaf üzeri PTFE'den oluşmaktadır. Dayanıklılığını artırmak için



ek bir kimyasal madde kullanımını gerektirmez ama bu nedenle de PVC'ye göre pahalı bir malzemedir. Ömürleri de PVC'den daha uzun olup 30 yıl civarındadır.

#### **c. ePTFE Türü Membranlar**

ePTFE (Expanded Poly Tetra Fluoro Ethylene) membran örtüleri saf PTFE malzemesinden üretilmektedir. ePTFE türü membran örtüler, baz kumaş olarak genişletilmiş ve FTPE ile kaplama yapılmıştır. Esnek ve geri dönüştürülebilir bir malzemedir.

#### **d. ETFE Türü Membranlar**

ETFE (Etilen Tetra Florür Etilen) membran malzemeler uçak sanayisi için geliştirilmiş olup ışık geçirgenliği ve hafif olmasından dolayı mimaride de kullanılan bir materyal haline gelmiştir. Işık geçirgenliği %85-90'lar civarında olduğundan yapının dış mekan gibi doğal şekilde aydınlatılmasını sağlar [78]. Hafifliği sayesinde geniş açıklıklar rahat şekilde geçilebilir. Yüzeyine toz ve benzeri maddeler yapışmaz ve kendi kendini temizleme özelliğine sahiptir, periyodik temizleme maliyeti açısından da avantaj yaratır. Çift cam tekniği ile sağlanan ısı yalıtımından daha iyi bir ısı yalıtımına sahiptir. Kullanım ömürleri 30 yıldan fazladır.

ETFE membran malzemeler yüksek polimerli kimyasal maddelerden olduğundan PTFE membran malzemelere göre daha sınırlı elastikiyet sahibidir bu nedenle tek tabakalı kafes sistemlerde daha fazla kullanılmaktadır. Ayrıca ETFE membran örtü elemanları daha kompleks olduğundan hiperbolik paraboloid kubbe yüzeylerinde de çok rahat kullanılabilir. Kullanım şekilleri tek cidar (germe), iki cidar ve üç cidar şişme yastık şeklinde olabilir.

PVC, PTFE ve ETFE membran örtü malzemelerinin temel özellikleri Çizelge EK-A.1'de verilmiştir.

Çizelge EK-A.1 Membran örtü türleri karşılaştırma

Özellik	PVC	PTFE	ETFE
Ömür	20 yıl	30 yıl	30+ yıl
Genişlik	2 m	5 m	2 m
Kalınlık	0.5 – 1.14 mm	0.3 – 1 mm	0.012 – 0.5 mm
UV Korunumu	%90	%100	%100
Saydamlık	%5.5 - %12	%10 - %12	%80 - 95
Çekme Dayanımı	7 - 62 MPa	10 - 43 MPa	50 MPa
Akma Dayanımı	16- 19 MPa	9 - 30 MPa	21 - 23 MPa
Uzama Şekil Değişirmesi	%24 - %145	%50 - %650	%600
	14 – 84 MPa Eğilme Dayanımı	5 MPa Kayma Dayanımı	500 N/mm Yırtılma Dayanımı
Yangın Dayanımı	B1 <sup>1</sup> (DIN 4102) <sup>2</sup>	A2 <sup>1</sup> (DIN 4102)	B1 (DIN 4102)

## A-2 Cam Örtüler

Cam malzemelerin ana maddesi saydamlık özelliği sağlayan silisyum dioksittir. Saydamlık oranı camlarda %80 ile %98 oranlarındadır. Bu özelliği ile en saydam plastikten bile daha saydam olma özelliği taşıyarak mekanda en iyi aydınlatmayı sağlar [79]. Cam malzemelerin seçiminde gün ışığı geçirgenliği, ışığı ve rengi nasıl yansıttığı, ısı yalıtım özellikleri göz önünde bulundurularak projeye en uygun cam malzeme seçimi yapılmaktadır.

Uzay kafes sistemlerde örtü malzemesi olarak kullanılan temel cam türleri; hava tabakalı (çift cam) ürünler, güneş ışınımı kontrol camları, düşük yayımlı (Low-E) camlar olarak öne çıkmaktadır.

Çift cam olarak da bilinen hava tabakalı cam ürünler, en az iki adet cam plakanın arasına ortam basıncına uygun olarak gazlar veya kuru hava doldurulması suretiyle yalıtımın sağlandığı malzemelerdir. Çift camların ısı özellikleri, hem hava boşluğunun hem de çerçevelerin veya kanatların özelliklerine bağlıdır [80].

Güneş ışınlarını kontrol etme özelliği bulunan, renkli ya da ışık yansıtımlı camlar iç mekandaki iklimlendirme ve konforu sağlayabilmektedirler. Renkli özelliği olan camların kullanımları projeye uygunluklarına göre değerlendirilmeli, sergi veya hastane gibi ışığın önemli olduğu yapılarda camın performansı iyi değerlendirilmelidir [81].

Düşük yayımlı camların, saydam olmaları ve yansıtıcı özelliği olmaması nedeniyle gün ışığını düz cam kadar iyi seviyede iç mekana aktarırlar. Sıradan çift camlara göre ısı yalıtım özellikleri ve ultraviyole ışınları engelleme performansı daha iyidir [82]. Low-E camlar, ortam ısısının cam yüzeyinde dengeli dağılması sayesinde, cam iç yüzeyinde buğu olmasını zorlaştırır.

### **A-3 Plastik Esaslı Malzemeler**

PVC malzemeler, polikarbonat levhalar, cam elyaf takviyeli polyester levhalar (CTP) uzay kafes sistemlerinde kullanılan plastik ana maddeli malzemelerdir. PVC'lerin çapmaya karşı dayanımları cam malzemelere göre iyi, polikarbonat levhalara göre daha kötü bir performansa sahiptir. Polikarbonat levhalar renk ve kalınlığa bağlı olarak %90'lara varan ışık geçirgenliğine sahiptir. Aynı zamanda yapıları itibariyle polikarbonat levhalar ile camla yapılması mümkün olmayan estetik formlar oluşturulabilmektedir.

### **A-4 Metal Esaslı Malzemeler**

Uzay kafes sistemlerinde örtü olarak kullanılabilen metal türündeki malzemeler alüminyum levhalar ve galvanizli saç levhalardır. Alüminyum çatı kaplama levhaları özel form verilmiş bir dış yüzey, genellikle poliüretan malzeme kullanılarak oluşturulmuş bir orta tabaka ve dış yüzeyde de metal levhalardan meydana gelmektedir. Dayanımları yüksek ve ısı yalıtım özellikleri iyidir. Galvanizli saç levhalar ise kırılma dayanımı bulunmayan ve çeşitli profillerde üretilebilen; ısı ve ses yalıtımı açısından zayıf malzemelerdir.

### **A-5 Ahşap Çatı Alt Kaplamaları**

Ahşap malzemeler içinde çatı örtü malzemesi olarak kullanılabilen OSB (Oriented Strand Board), fırınlamış ahşap malzemenin yongalanıp preslenip plaka haline getirilmiş halidir. Suya ve neme dayanıklıdır. Dekoratif olması nedeniyle hem tavan hem de tabanlarda kaplama malzemesi olarak kullanılabilirler.

## KAR YÜKÜ HESABI İLE İLGİLİ ÇİZELGELER

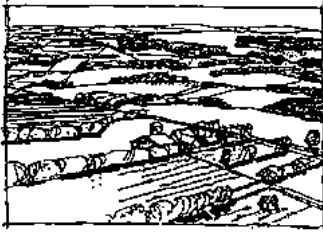
Çizelge EK-B.1 Yapı risk kategorileri [66]

Use or Occupancy of Buildings and Structures	Risk Category
Buildings and other structures that represent low risk to human life in the event of failure	I
All buildings and other structures except those listed in Risk Categories I, III, and IV	II
Buildings and other structures, the failure of which could pose a substantial risk to human life	III
Buildings and other structures, not included in Risk Category IV, with potential to cause a substantial economic impact and/or mass disruption of day-to-day civilian life in the event of failure	
Buildings and other structures not included in Risk Category IV (including, but not limited to, facilities that manufacture, process, handle, store, use, or dispose of such substances as hazardous fuels, hazardous chemicals, hazardous waste, or explosives) containing toxic or explosive substances where the quantity of the material exceeds a threshold quantity established by the Authority Having Jurisdiction and is sufficient to pose a threat to the public if released <sup>a</sup>	
Buildings and other structures designated as essential facilities	IV
Buildings and other structures, the failure of which could pose a substantial hazard to the community	
Buildings and other structures (including, but not limited to, facilities that manufacture, process, handle, store, use, or dispose of such substances as hazardous fuels, hazardous chemicals, or hazardous waste) containing sufficient quantities of highly toxic substances where the quantity of the material exceeds a threshold quantity established by the Authority Having Jurisdiction and is sufficient to pose a threat to the public if released <sup>a</sup>	
Buildings and other structures required to maintain the functionality of other Risk Category IV structures	

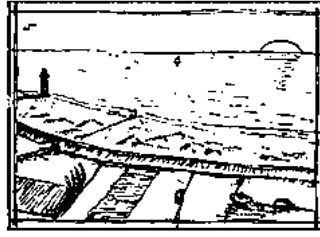
## RÜZGAR YÜKÜ HESABI İLE İLGİLİ ÇİZELGE VE ŞEKİLLER

Çizelge EK-C.1 Arazi kategorileri ve arazi parametreleri [63]

Arazi kategorisi		$Z_0$ m	$Z_{min}$ 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 en az 15 metreyi aşan binalarla kaplı alan	1,0	10



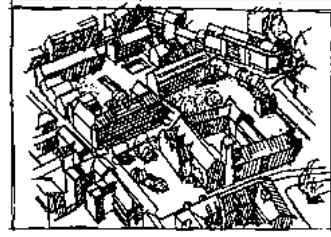
Kategori 0



Kategori I



Kategori II



Kategori III



Kategori IV

Şekil EK-C.1 Arazi kategorileri [63]

Çizelge EK-C.2  $K_z$  katsayıları tablosu [66]

Height above Ground Level, $z$		Exposure		
ft	m	B	C	D
0–15	0–4.6	0.57 (0.70) <sup>a</sup>	0.85	1.03
20	6.1	0.62 (0.70) <sup>a</sup>	0.90	1.08
25	7.6	0.66 (0.70) <sup>a</sup>	0.94	1.12
30	9.1	0.70	0.98	1.16
40	12.2	0.76	1.04	1.22
50	15.2	0.81	1.09	1.27
60	18.0	0.85	1.13	1.31
70	21.3	0.89	1.17	1.34
80	24.4	0.93	1.21	1.38
90	27.4	0.96	1.24	1.40
100	30.5	0.99	1.26	1.43
120	36.6	1.04	1.31	1.48
140	42.7	1.09	1.36	1.52
160	48.8	1.13	1.39	1.55
180	54.9	1.17	1.43	1.58
200	61.0	1.20	1.46	1.61
250	76.2	1.28	1.53	1.68
300	91.4	1.35	1.59	1.73
350	106.7	1.41	1.64	1.78
400	121.9	1.47	1.69	1.82
450	137.2	1.52	1.73	1.86
500	152.4	1.56	1.77	1.89

<sup>a</sup>Use 0.70 in Chapter 28, Exposure B, when  $z < 30$  ft (9.1 m).

**Notes**

- The velocity pressure exposure coefficient  $K_z$  may be determined from the following formula:  
For  $15 \text{ ft (4.6 m)} \leq z \leq z_g$   $K_z = 2.01(z/z_g)^{2/\alpha}$   
For  $z < 15 \text{ ft (4.6 m)}$   $K_z = 2.01(15/z_g)^{2/\alpha}$
- $\alpha$  and  $z_g$  are tabulated in Table 26.11-1.
- Linear interpolation for intermediate values of height  $z$  is acceptable.
- Exposure categories are defined in Section 26.7.

Çizelge EK-C.3 Arazi maruz kalma sabitleri ( $K_z$  hesabındaki  $\alpha$  ve  $z_g$  için) [66]

Customary Units										
Exposure	$\alpha$	$z_g$ (ft)	$\bar{\alpha}$	$\bar{b}$	$\bar{\alpha}$	$\bar{b}$	$c$	$e$ (ft)	$\bar{e}$	$z_{\min}$ (ft) <sup>a</sup>
B	7.0	1,200	1/70	0.84	1/4.0	0.45	0.30	320	1/3.0	30
C	9.5	900	1/9.5	1.00	1/6.5	0.65	0.20	500	1/5.0	15
D	11.5	700	1/11.5	1.07	1/9.0	0.80	0.15	650	1/8.0	7
S.I. Units										
Exposure	$\alpha$	$z_g$ (m)	$\bar{\alpha}$	$\bar{b}$	$\bar{\alpha}$	$\bar{b}$	$c$	$e$ (m)	$\bar{e}$	$z_{\min}$ (m) <sup>a</sup>
B	7.0	365.76	1/7	0.84	1/4.0	0.45	0.30	97.54	1/3.0	9.14
C	9.5	274.32	1/9.5	1.00	1/6.5	0.65	0.20	152.40	1/5.0	4.57
D	11.5	213.36	1/11.5	1.07	1/9.0	0.80	0.15	198.12	1/8.0	2.13

<sup>a</sup> $z_{\min}$  = minimum height used to ensure that the equivalent height  $\bar{z}$  is the greater of  $0.6h$  or  $z_{\min}$ . For buildings or other structures with  $h \leq z_{\min}$ ,  $\bar{z}$  shall be taken as  $z_{\min}$ .

Çizelge EK-C.4 Yapı tipine göre rüzgar yön faktörü tablosu [66]

Structure Type	Directionality Factor $K_d$
<b>Buildings</b>	
Main Wind Force Resisting System	0.85
Components and Cladding	0.85
<b>Arched Roofs</b>	0.85
<b>Circular Domes</b>	1.0 <sup>a</sup>
<b>Chimneys, Tanks, and Similar Structures</b>	
Square	0.90
Hexagonal	0.95
Octagonal	1.0 <sup>a</sup>
Round	1.0 <sup>a</sup>
<b>Solid Freestanding Walls, Roof Top Equipment, and Solid Freestanding and Attached Signs</b>	0.85
<b>Open Signs and Single-Plane Open Frames</b>	0.85
<b>Trussed Towers</b>	
Triangular, square, or rectangular	0.85
All other cross sections	0.95

<sup>a</sup>Directionality factor  $K_d = 0.95$  shall be permitted for round or octagonal structures with nonaxisymmetric structural systems.

Çizelge EK-C.5  $GC_{pi}$  tablosu [66]

Table 26.13-1 Main Wind Force Resisting System and Components and Cladding (All Heights): Internal Pressure Coefficient, ( $GC_{pi}$ ), for Enclosed, Partially Enclosed, Partially Open, and Open Buildings (Walls and Roof)

Enclosure Classification	Criteria for Enclosure Classification	Internal Pressure	Internal Pressure Coefficient, ( $GC_{pi}$ )
Enclosed buildings	$A_o$ is less than the smaller of $0.01A_g$ or 4 sq ft (0.37 m) and $A_{oi}/A_{gi} \leq 0.2$	Moderate	+0.18
			-0.18
Partially enclosed buildings	$A_o > 1.1A_{oi}$ and $A_o >$ the lesser of $0.01A_g$ or 4 sq ft (0.37 m) and $A_{oi}/A_{gi} \leq 0.2$	High	+0.55
			-0.55
Partially open buildings	A building that does not comply with Enclosed, Partially Enclosed, or Open classifications	Moderate	+0.18
			-0.18
Open buildings	Each wall is at least 80% open	Negligible	0.00



## **YAPI MALZEMESİ OLARAK ÇELİK**

Yapısal çelik, karbon ve demirden oluşan bir alaşımdır. Yaygın olarak kullanılan yapısal çeliğin karbon oranı arttıkça akma gerilmesi de artmaktadır, buna karşılık süneklik ve kaynaklanabilirlik azalmaktadır. Yüksek karbonlu çelikler daha da gevreklerdir.

Tek tabakalı uzay kafes sistemlerde yapı malzemesi olarak kullanılan çeliğin birçok avantajı bulunmaktadır [83].

- Çeliğin dayanım/ağırlık oranı yüksektir.
- Yapısal çeliğin özellikleri üniform ve homojen olup, öngörülebilirdir.
- Yüksek sünekliğe sahiptir.
- Betonarme yapılara nazaran, daha kolay ve çabuk üretim kolaylığı sağlar.
- Yapım aşamasında, diğer malzemelerin aksine, hava koşullarından etkilenmez.
- Geri dönüşümü mümkün bir malzemedir.

Çeliğin önemli avantajlarını yanı sıra bazı dezavantajları ve dikkat edilmesi gereken bir takım hususlar mevcuttur [83].

- Korozyona karşı bir hassas malzemedir. Dış hava koşullarının yaratacağı olumsuz etkilere karşı galvanizleme veya çinko bakımından zengin boya ile boyanarak korunması gerekir.
- Yüksek sıcaklıklardan olumsuz etkilenir, yangına karşı tedbir alınması gerekir.
- Gerilme yığılmalarından ya da hidrojene maruz kalmadan kaynaklanan gevrek kırılmalara ve yorulmalara karşı hassas olabilir.

Yapısal çelik elemanlarda kullanılan alaşım kimyasal elementlerin önemli faydaları ve zararları Çizelge EK-D.1’te verilmiştir.

Çizelge EK-D.1 Yapısal çelik elemanlarda kullanılan alaşım kimyasal elementler

Kimyasal element	En önemli faydaları	Zararları
Karbon (C)	Çeliğin dayanımını artırır.	Çok fazla karbon, çeliğin sünekliğini ve kaynaklanabilirliğini azaltır.
Bakır (Cu)	Düşük miktarlarda eklendiğinde, karbon çeliğinin dayanımı ve korozyon dayanımını artırır.	Çok fazla bakır, çeliğin kaynaklanabilirliğini azaltır.
Vanadyum (V)	Çeliğin dayanımını ve kırılma tokluğunu artırır. Çeliğin kaynaklanabilirliğini ve çentik dayanımını negatif yönde etkilemez.	
Nikel (Ni)	Çeliğin dayanımını, korozyon dayanımını ve kırılma tokluğunu artırır.	Kaynaklanabilirliği azaltır.
Molibden (Mo)	Çeliğin dayanımını ve korozyon dayanımını artırır.	Çeliğin çentik dayanımını düşürür.
Krom (Cr)	Paslanmaz çelikte kullanılan ana alaşım kimyasal elementtir. Bakırla kullanıldığında çeliğin dayanımı ve korozyon dayanımını artırır.	
Kolombiyum (Cb)	Düşük miktarlarda kullanıldığında çeliğin dayanımını artırır.	Çeliğin çentik dayanımını önemli ölçüde azaltır.
Manganez (Mn)	Çeliğin dayanımını ve çentik dayanımını artırır.	Kaynaklanabilirliği azaltır.
Silikon (Si)	Çeliğin üretimi sırasında sıcak çeliğin deoksidasyonu için kullanılır ve çeliğin tokluk seviyesinin iyileşmesine yardımcı olur.	Kaynaklanabilirliği azaltır.
Oldukça düşük miktarlardaki diğer alaşım elementleri arasında nitrojen de vardır; çok düşük miktarlarda kullanımına izin verilen elementler arasında fosfor ve sülfür de vardır.		

## ÖZGEÇMİŞ

---

### Kişisel Bilgiler

Ad Soyad	Tayfun KARA
Doğum Tarihi	28.07.1988
Doğum Yeri	İstanbul
İletişim/e-mail	tayfunkara07@gmail.com

### Öğrenim Durumu

Yüksek Lisans	2012-2019	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programı
Lisans	2008-2012	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği
Lise	2003-2007	Samih Ayverdi Anadolu Lisesi

### Yabancı Dil

İngilizce