ÇELİK UZAY KAFES KUBBE SİSTEMLERİNİN TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ VE TÜRK ÇELİK YAPILAR TASARIM YÖNETMELİĞİNE GÖRE ANALİZ VE TASARIMI

MEHMET ALİ BEKTAŞ

MAYIS 2023

DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK UZAY KAFES KUBBE SİSTEMLERİNİN TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ VE TÜRK ÇELİK YAPILAR TASARIM YÖNETMELİĞİNE GÖRE ANALİZ VE TASARIMI

MEHMET ALİ BEKTAŞ

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALINDA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

MAYIS 2023

DİYARBAKIR

ÇELİK UZAY KAFES KUBBE SİSTEMLERİNİN TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ VE TÜRK ÇELİK YAPILAR TASARIM YÖNETMELİĞİNE GÖRE ANALİZ VE TASARIMI

Mehmet Ali BEKTAŞ tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü** _____

Prof. Dr. Mehmet Sedat HAYALİOĞLU
Danışman, **İnşaat Mühendisliği**
Ana Bilim Dalı, Dicle Üniversitesi _____

Sınav Jürisi:

Prof. Dr. Halil GÖRGÜN(*)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi _____

Prof. Dr. Mehmet Sedat HAYALİOĞLU(**)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi _____

Doç. Dr. Burak YÖN
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Munzur Üniversitesi _____

ONAY

Savunma Tarihi: 26 / 05 / 2023

(*) Sınav Jürisi kısmının birinci satırına Jüri Başkanının bilgilerini yazınız.
(**) Sınav Jürisi kısmının ikinci satırına Tez Danışmanının bilgilerini yazınız.



Aileme…

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılayıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: Mehmet Ali BEKTAŞ

İmza:

TEŞEKKÜR

Bu proje çalışmasının her aşamasında her türlü yardımını, bilimsel birikimlerini ve tecrübelerini paylaşıp bana yol gösteren çok kıymetli hocam Prof. Dr. Mehmet Sedat HAYALİOĞLU'na teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Çetinkayalar Yapı Elemanları A.Ş. Genel Müdürü Sait ÇETİNKAYA'ya tezimi hazırlarken göstermiş olduğu anlayış için teşekkür ederim.

Tez sürecinde verdiği motivasyon ve desteğinden dolayı Makine Yüksek Mühendisi Hüsnüyusuf PINAR'a teşekkür ederim

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen sevgili babam Abdulaziz BEKTAŞ ve annem Cahide BEKTAŞ 'a sonsuz teşekkür sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR v
İÇİNDEKİLER vi
ŞEKİLLER LİSTESİ ix
TABLOLAR LİSTESİ xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ xv
ÖZET xx
ABSTRACT xxi
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3
3. MATERYAL VE METOT 6
3.1 Uzay Kafes Sistemleri 6
3.1.1 Düzlemsel uzay kafes sistemler 7
3.1.2 Tek eğrilikli (Tonozsal) uzay kafes sistemleri 8
3.1.3 Çift eğrilikli (Kubbesel) uzay kafes sistemleri 8
3.2 Kubbesel Uzay Kafes Sistemlerinin Sınıflandırılması 9
3.2.1 Radyal nervürlü kubbeler 9
3.2.2 Schwedler kubbeler 11
3.2.3 Lamella kubbeler 14
3.2.4 Jeodezik kubbeler 16
3.2.5 Üç doğrultuda ızgara kubbeler 17
3.3 Kubbesel Uzay Kafes Bileşenleri 18
3.3.1 Çubuklar 18
3.3.2 Düğüm noktaları 19
3.3.3 Mesnetler 19
3.3.4 Temeller 20
3.3.5 Örtü gereçleri 20

3.3.6 Yardımcı elemanlar 20
3.4 Kubbesel Örtü Sistemlerin Yapısal Davranışı 21
3.4.1 Yığma kubbeler 21
3.4.2 Kabuk kubbeler 21
3.4.3 Kemer taşıyıcılı kubbeler 22
3.4.4 Kaburgalı kubbeler 22
3.4.5 Çubuk ağı kubbeler 23
3.4.6 Kablo sistemli kubbeler 23
3.4.7 Pnömatik kubbeler 23
3.5 Türkiye'de Kubbesel Uzay Kafes Örnekleri 23
3.6 Çelik Kubbe Sistemlerinin Stabilitesi 25
3.6.1 Eleman burkulması 27
3.6.2 Yerel burkulma 28
3.6.3 Global burkulma 29
3.7 Kubbesel Uzay Kafes Tasarım ve Analizi 30
3.7.1 Türk standartlarına göre tasarım 30
3.8 Çift Katmanlı Kubbe Modeli Analizi 32
3.8.1 Model-1 sistem bilgileri 32
3.8.2 Model-1 malzeme ve kesit bilgileri 34
3.8.3 Model-1 hesap metodunda kullanılan yükler 35
3.8.4 Model-1 analiz sonuçları 52
3.8.5 Model-1 için yer değiştirme kontrolü 59
3.8.6 Model-1 tasarım sonuçları 63
3.8.7 Model-1 sisteminin Türk çelik yapı yönetmeliğine göre kontrol edilmesi 66
3.9 Tek Katmanlı Kubbe Modeli Analizi 72
3.9.1 Model-2 sistem bilgileri 72
3.9.2 Model-2 malzeme ve kesit bilgileri 74

3.9.3 Model-2 hesap metodunda kullanılan yükler 75
3.9.4 Model 2 analiz sonuçları 79
3.9.5 Model-2 için yer değiştirme kontrolü 85
3.9.6 Model-2 tasarım sonuçları 90
3.9.7 Model-2 sisteminin Türk çelik yapı yönetmeliğine göre kontrol edilmesi 92
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 101
4.1 Model-1 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 101
4.1.1 Model-1 kritik basınç elemanı boyutlandırma kontrolü 102
4.1.2 Model-1 kritik çekme elemanı boyutlandırma kontrolü 103
4.2 Model-2 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 103
5. SONUÇLAR 107
KAYNAKLAR 109
ÖZGEÇMİŞ 111

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1 Simetrik olmayan kar yükü sonucu tersine burkulan kubbe (Papadopoulos ve LoRicco, 2006) 4
Şekil 3. 1 Düzlemsel üç tabakalı uzay kafes sistemi (Pirhadi ve Maalek, 2018) 7
Şekil 3. 2 Tek eğrilikli çift tabakalı uzay kafes sistemi (Ashtul ve Patil, 2020) 8
Şekil 3. 3 Radyal nervürlü kubbelerin plan ve görünüşü (Subramanian, 1999) 9
Şekil 3. 4 Centennial hall, Wroclaw, Polonya 10
Şekil 3. 5 Bell's sport centre, Perth, İskoçya 10
Şekil 3. 6 Oasis leisure centre, Wiltshire, İngiltere 11
Şekil 3. 7 Çift köşegenli schwedler kubbenin plan ve görünüşü (Kurrer, 2018) 11
Şekil 3. 8 Schwedler kubbelerin plan ve görünüşleri (Subramanian, 1999) 12
Şekil 3. 9 Bojangles coliseum, Charlotte, ABD 12
Şekil 3. 10 Viyana gazometreleri, Viyana, Avusturya 13
Şekil 3. 11 Viyana gazometresi schwedler çatı tasarımı 13
Şekil 3. 12 Lamella kubbelerin plan ve görünüşleri (Subramanian, 1999) 14
Şekil 3. 13 Astrodome, Houston, ABD 15
Şekil 3. 14 Caesars superdome, New Orleans, ABD 15
Şekil 3. 15 Jeodezik kubbenin geometrik biçimlendirilmesi (Subramanian, 1999) .. 16
Şekil 3. 16 EXPO 67 biosphere, Montreal, Kanada 16
Şekil 3. 17 Izgara kubbelerin plan ve görünüşleri (Subramanian, 1999) 17
Şekil 3. 18 Brno sergi binası, Brno, Çek Cumhuriyeti 17
Şekil 3. 19 Uzay kafes bileşenleri (Soykan, 2007) 18
Şekil 3. 20 Çubuk ve konik elemanları (Soykan, 2007) 18
Şekil 3. 21 Küresel düğüm elemanları ve boyutları (Soykan, 2007) 19
Şekil 3. 22 Mesnet küresi detayları (Soykan, 2007) 20
Şekil 3. 23 (a) Ayasofya cami, İstanbul, Türkiye (b) Notre dame katedrali, Paris, Fransa 21
Şekil 3. 24 Panteon, tapınağı, Roma, İtalya 22
Şekil 3. 25 Oita stadyumu, Oita, Japonya 22
Şekil 3. 26 Floransa katedrali, Floransa, İtalya 23
Şekil 3. 27 Panora alışveriş merkezi, Ankara, Türkiye 24

Şekil 3. 28 Su kuşları hayvanat bahçesi, Bursa, Türkiye 24
Şekil 3. 29 Şanlıurfa şehirlerarası otobüs terminali, Şanlıurfa, Türkiye (Baskı, 2023) 24
Şekil 3. 30 Akçansa çimento stok holü, Çanakkale, Türkiye..... 24
Şekil 3. 31 Doğrusal olmayan ve çatallanma burkulması davranış grafiği (Glenn, 2010) 25
Şekil 3. 32 Tersine dönerek burkulma davranışı için yük-deplasman grafiği (Li ve Xu, 2017) 26
Şekil 3. 33 Burkulma davranışında eleman kararsızlığı (Gioncu, 1995) 28
Şekil 3. 34 Yerel burkulmada eleman ve birleşim noktası Burkulması (Gioncu, 1995) 28
Şekil 3. 35 Tekli yükleme ile birleşim noktası burkulması (Gioncu, 1995) 29
Şekil 3. 36 Global burkulma kararsızlığı (Gioncu, 1995)..... 29
Şekil 3. 37 Model-1 perspektif görünüşü..... 33
Şekil 3. 38 Model-1 plan görünüşü 33
Şekil 3. 39 Diyarbakır ili meteorolojik istatistik tablosu (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2022) 39
Şekil 3. 40 Farklı yükseklik/açıklık oranlarına sahip silindirik çatılar için tavsiye edilen kar yükü şekil katsayıları ($\beta \leq 60°$) (TS EN 1991 1-3, 2009) 39
Şekil 3. 41 Silindirik çatılar için kar yükü şekil katsayıları (TS EN 1991 1-3, 2009)39
Şekil 3. 42 Model-1 için durum (i) birikmemiş kar yükü ve durum (ii) birikmiş kar yükü dağılımı 40
Şekil 3. 43 Model-1 için kubbe üzerindeki rüzgâr dağılımları 44
Şekil 3. 44 Model-1 için $C_e(z)$maruz kalma katsayısının grafik gösterimi (TS EN 1991 1-4, 2005) 45
Şekil 3. 45 Model-1 için C_{pe},10 dış basınç katsayıları (TS EN 1991 1-4, 2005)..... 46
Şekil 3. 46 Yatay elastik tasarım spektrumu (TBDY, 2018) 48
Şekil 3. 47 Yatay elastik tasarım spektrumu..... 48
Şekil 3. 48 Düşey elastik tasarım spektrumu (TBDY, 2018)..... 49
Şekil 3. 49 Düşey elastik tasarım spektrumu 49
Şekil 3. 50 Eşdeğer deprem yükü yöntemine göre X yönünde yük parametrelerinin tanımlanması 51

Şekil 3. 51 Eşdeğer deprem yükü yöntemine göre Y yönünde yük parametrelerinin tanımlanması 51
Şekil 3. 52 Sıcaklık değişiminin elemanlara tatbik edilmesi 52
Şekil 3. 53 Sabit yük altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme 54
Şekil 3. 54 Hareketli yük altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme..... 55
Şekil 3. 55 Tam kar yükü altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme..... 55
Şekil 3. 56 Sağ kar yükü altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme..... 56
Şekil 3. 57 Dış rüzgâr yükü altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme..... 57
Şekil 3. 58 Sıcaklık artışı termal yük altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme..... 58
Şekil 3. 59 Sıcaklık düşüşü termal yük altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme..... 58
Şekil 3. 60 Düşey yer değiştirme kontrolünün G+Q yük kombinasyonu altında deplasmanı..... 59
Şekil 3. 61 Yatay yer değiştirme kontrolünün G+0,5Q+W_1 yük kombinasyonu altında deplasmanı..... 60
Şekil 3. 62 Sabit yük (G) altında düşey deplasman durumu 60
Şekil 3. 63 Hareketli yük (Q) altında düşey deplasman durumu 61
Şekil 3. 64 Tam kar yükü (S_{Tam}) altında düşey deplasman durumu 61
Şekil 3. 65 Yarım kar yükü ($S_{Sağ}$) altında düşey deplasman durumu..... 61
Şekil 3. 66 Dış rüzgâr yükü (W_{EX}) altında düşey deplasman durumu 62
Şekil 3. 67 Deprem yükü (E_X) altında düşey deplasman durumu..... 62
Şekil 3. 68 Termal gerilme yükü (T+) altında düşey deplasman durumu..... 62
Şekil 3. 69 YDKT'ye göre tasarımı yapılmış ve etki/kapasite oranına göre renklendirilmiş model-1 görüntüsü 63
Şekil 3. 70 Kritik basınç yükü altındaki kesitin YDKT yöntemine göre tasarım detayları..... 64

Şekil 3. 71 Kritik çekme yükü altındaki kesitin YDKT yöntemine göre tasarım detayları 65
Şekil 3. 72 Eksenel basınç kuvveti altında narinlik ve kritik yük dayanım eğrisi (ÇYTHYEDY, 2018) 69
Şekil 3. 73 Model-2 perspektif görünüşü 73
Şekil 3. 74 Model-2 plan görünüşü 73
Şekil 3. 75 Model-2 için Durum (i) birikmemiş kar yükü ve durum (ii) birikmiş kar yükü dağılımı 76
Şekil 3. 76 Model-2 için kubbe üzerindeki rüzgâr dağılımları 77
Şekil 3. 77 Model-2 için C_{pe},10 dış basınç katsayıları (TS EN 1991 1-4, 2005) 78
Şekil 3. 78 Model-2 için $C_e(z)$ maruz kalma katsayısının grafik gösterimi katsayıları (TS EN 1991 1-4, 2005) 78
Şekil 3. 79 Sabit yük altında kubbe sisteminde oluşan eksenel yük diyagramı 81
Şekil 3. 80 Hareketli yük altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı 81
Şekil 3. 81 Tam kar yükü altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı 82
Şekil 3. 82 Yarım kar (sağ) yükü altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı 82
Şekil 3. 83 Yarım kar (sağ) yükü altında kubbe sisteminde oluşan eksenel yük diyagramı 83
Şekil 3. 84 Dış rüzgâr yükü altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı 84
Şekil 3. 85 Termal yük (T+) altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı 84
Şekil 3. 86 Termal yük (T-) altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı 84
Şekil 3. 87 Düşey yer değiştirme kontrolünün $G+0,5Q+W_1$ yük kombinasyonu altında deplasmanı 86
Şekil 3. 88 Yatay yer değiştirme kontrolünün $G+0,5Q+W_1$ yük kombinasyonu altında deplasmanı 86
Şekil 3. 89 Sabit yük (G) altında düşey deplasman durumu 87
Şekil 3. 90 Hareketli yük (Q) altında düşey deplasman durumu 87
Şekil 3. 91 Tam kar yükü (S_{Tam}) altında düşey deplasman durumu 87
Şekil 3. 92 Yarım kar yükü ($S_{Sağ}$) altında düşey deplasman durumu 88
Şekil 3. 93 Dış rüzgâr yükü (W_{EX}) altında düşey deplasman durumu 88
Şekil 3. 94 İç rüzgâr yükü ($W_{İN}$) altında düşey deplasman durumu 88
Şekil 3. 95 Termal gerilme yükü (T+) altında düşey deplasman durumu 89

Şekil 3. 96 Termal gerilme yükü (T-) altında düşey deplasman durumu..... 89
Şekil 3. 97 Deprem yükü (E_X) altında düşey deplasman durumu..... 89
Şekil 3. 98 YDKT'ye göre tasarımı yapılmış ve etki/kapasite oranına göre renklendirilmiş model-2 görüntüsü..... 90
Şekil 3. 99 Kritik kesitin YDKT yöntemine göre tasarım detayları 91
Şekil 3. 100 Kritik elemanın güçlü eksende (M 3-3) oluşturduğu moment diyagramı 97
Şekil 3. 101 Kritik elemanın zayıf eksende (M 2-2) oluşturduğu moment diyagramı 97

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3. 1 Çubukların DIN EN 1002'de çelik kalitelerine göre dayanım değerleri .. 19
Tablo 3. 2 ÇYTHYEDY'e göre YDKT yük kombinasyonları (ÇYTHYEDY, 2018) 31
Tablo 3. 3 ÇYTHYEDY'e göre sehim kontrollerinde kullanılacak yük kombinasyonları (ÇYTHYEDY, 2018) 32
Tablo 3. 4 Sıcakta haddelenmiş yapısal çeliklerin karakteristik; akma (f_y) ve çekme gerilmesi (f_u) (ÇYTHYEDY, 2018) 34
Tablo 3. 5 Model-1 kesit listesi (BS EN 10210-2) 35
Tablo 3. 6 Karın yığın durumuna göre ortalama birim hacim ağırlığı tablosu (TS EN 1991 1-3, 2009) 37
Tablo 3. 7 Karakteristik zemin kar yükü (S_K) değerleri kN/m^2 (TS EN 1991 1-3, 2009) 38
Tablo 3. 8 Farklı topografik alanlar için tavsiye edilen Ce değerleri (TS EN 1991 1-3, 2009) 38
Tablo 3. 9 Kar yükü şekil katsayıları tablosu (TS EN 1991 1-3, 2009)..... 38
Tablo 3. 10 A, B ve C noktalarında dış basınç katsayısı (C_{pe}) ve dış basınç (W_e) değerleri..... 43
Tablo 3. 11 Model-1 için iç basınç katsayısı (C_{pi}) ve dış basınç (W_e) değerleri..... 43
Tablo 3. 12 Arazi kategorileri ve arazi parametreleri (TS EN 1991 1-4, 2005) 45
Tablo 3. 13 Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018) 47
Tablo 3. 14 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018)..... 48
Tablo 3. 15 Model-1 için modal analizinde hesaba katılan kütle oranları 53
Tablo 3. 16 Model-2 için çember ve diyagonal eleman kesit listesi (BS EN 10210-2, 2006) 74
Tablo 3. 17 Model-2 için meridyen kiriş eleman kesit listesi (BS EN 10365, 2017) 75
Tablo 3. 18 Model-2 için A, B ve C noktalarında dış basınç katsayısı (C_{pe}) ve dış basınç (W_e) değerleri..... 77
Tablo 3. 19 Model-2 için dış basınç katsayısı (C_{pi}) ve dış basınç (W_e) değerleri..... 77
Tablo 3. 20 Model-2 için modal analizinde hesaba katılan kütle oranları 80
Tablo 3. 21 IPE 180 profili ölçü ve mukavemet tablosu (BS EN 10365, 2017)..... 93

Tablo 4. 1 Model-1 sisteminin basınç etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması..... 102
Tablo 4. 2 Model-1 sisteminin çekme etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması..... 103
Tablo 4. 3 Model-2 sisteminin basınç etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması..... 104
Tablo 4. 4 Model-2 sisteminin kesme kuvveti etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması..... 104
Tablo 4. 5 Model-2 sisteminin kuvvetli eksende eğilme momenti etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması..... 105
Tablo 4. 6 Model-2 sisteminin zayıf eksende eğilme momenti etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması 105
Tablo 4. 7 Model-2 sisteminin birleşik yük etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması..... 106

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
A	Profil Enkesit Alanı
A_e	Etkin Enkesit Alanı
A_g	Gerçek Enkesit Alanı
A_w	Profil Gövdesinin Enkesit Alanı
b	Enkesit Başlık Genişliği
C	Burulma Sabiti
C_b	Yanal Burulmalı Burkulma Sınır Durumunda Moment Düzeltme Katsayısı.
C_{dir}	Doğrultu Katsayısı
C_e	Yüzey Etkilenme Faktörü
$C_e(Z)$	Maruz Kalma Katsayısı
C_o	Orografi Katsayısı
C_{pe}	Dış Basınç Katsayısı
$C_r(z)$	Engebelik Katsayısı
C_{season}	Mevsim Katsayısı
C_t	Isı Katsayısı
C_{v1}	Gövde Kesme Kuvveti Dayanım Katsayısı
d	Enkesit Faydalı Gövde Uzunluğu / Boru Profil İç Çapı
D	Boru Profili Dış Çapı
E	Elastisite Modülü
E	Deprem Yükü
E_X	Global X Yönü Deprem Yükü
E_Y	Global Y Yönü Deprem Yükü
E_Z	Global Z Yönü Deprem Yükü
F_1	1.0 sn. Periyot İçin Yerel Zemin Etki Katsayısı
F_{cr}	Kritik Burkulma Gerilmesi
F_s	Kısa Periyot Bölgesi İçin Yerel Zemin Etki Katsayısı

F_u	Kopma Mukavemeti
F_y	Akma Mukavemeti
G	Sabit Yük
G_v	Kayma Modülü
h	Enkesit Profil Yüksekliği
h_i	Enkesit Başlık Ağırlık Merkezleri Arasındaki Mesafe
I	Atalet Momenti
I_x	Lokal X Yönü Atalet Momenti
I_y	Lokal Y Yönü Atalet Momenti
İ	Atalet Yarıçapı
i_x	Lokal X Yönü Atalet Yarıçapı
$i_ğ$	Lokal Y Yönü Atalet Yarıçapı
J	Burulma Sabiti
K	Burkulma Boyu Katsayısı
k_r	Arazi Katsayısı
L	Etkili Uzunluk
L	Eleman Uzunluğu
L_b	Desteklenen Noktalar Arasında Kalan Eleman Uzunluğu
L_c	Burkulma Boyu
L_{cx}	Lokal X Yönü Burkulma Boyu
L_{cy}	Lokal Y Yönü Burkulma Boyu
L_p	Akma Sınır Durumu İçin Yanal Olarak Desteklenmeyen Sınır Uzunluk
L_r	Elastik Olmayan Yanal Burulmalı Burkulma Durumu İçin Sınır Uzunluk
M_{rx}	Lokal X Yönü İçin Gerekli Eğilme Momenti Dayanımı
M_{ry}	Lokal Y Yönü İçin Gerekli Eğilme Momenti Dayanımı
M_{cx}	YDKT İçin Lokal X Yönü Mevcut Eğilme Momenti Dayanımı
M_{cy}	YDKT İçin Lokal Y Yönü Mevcut Eğilme Momenti Dayanımı
M_n	Karakteristik Eğilme Momenti Dayanımı
M_{nx}	Lokal X Ekseninde Karakteristik Eğilme Momenti
M_p	Plastik Eğilme Momenti

M_{px}	Lokal X Ekseninde Plastik Gerilme Momenti
M_{py}	Lokal Y Ekseninde Plastik Gerilme Momenti
M_{py}	Lokal X Ekseninde Karakteristik Eğilme Momenti
P_r	YDKT Yük Kombinasyonu Altında Hesaplanan Gerekli Eksenel Kuvvet Dayanımı
P_c	YDKT İçin Tasarım Eksenel Kuvvet Dayanımı
P_d	Tasarım Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımı
P_n	Karakteristik Eksenel Basınç Kuvveti Dayanımı
P_u	YDKT Yük Kombinasyonları Uyarınca Eksenel Kuvvet Dayanımı
Q	Hareketli Yük
q_b	Rüzgâr Basıncı
$q_p(z)$	Tepe Hız Kaynaklı Rüzgâr Basıncı
R_n	Karakteristik Dayanımı
R_u	YDKT Kombinasyonları Altında Hesaplanan Dayanım
S	Kar Yükü
$S_{ae}(T)$	Yatay Elastik Tasarım Spektral İvmesi
$S_{aeD}(T)$	Düşey Elastik Tasarım Spektral İvmesi
S_{D1}	1.0 sn. Periyot Tasarım İvme Katsayısı
S_{DS}	Kısa Periyot Tasarım İvme Katsayısı
S_k	Karakteristik Zemin Kar Yükü
$S_{sağ}$	Yarım Sağ Kar Yükü
S_{sol}	Yarım Sol Kar Yükü
S_{tam}	Tam Kar Yükü
T	Sıcaklık
t	Profil Et Kalınlığı
T-	Sıcaklık Düşüşü Gerilmesi
T+	Sıcaklık Artışı Gerilmesi
T_A	Yatay Elastik Tasarım İvme Spektrumu Köşe Periyodu
T_{AD}	Düşey Elastik Tasarım İvme Spektrumu Köşe Periyodu
T_B	Yatay Elastik Tasarım İvme Spektrumu Köşe Periyodu
T_{BD}	Düşey Elastik Tasarım İvme 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
t_f	Enkesit Başlık Kalınlığı
t_w	Enkesit Gövde Kalınlığı
V_b	Esas Rüzgâr Hızı
V_{bo}	Temel Rüzgâr Hızı
V_d	Tasarım Kesme Kuvveti Dayanımı
V_m	Ortalama Rüzgâr Hızı
V_n	Karakteristik Kesme Kuvveti Dayanımı
W	Rüzgâr Yükü
W_1	Dış Rüzgâr Yükü Ve İç Pozitif Rüzgâr Yükü Toplamı
W_2	Dış Rüzgâr Yükü Ve İç Negatif Rüzgâr Yükü Toplamı
W_3	İç Rüzgâr Yükü Ve İç Pozitif Rüzgâr Yükü Toplamı
W_4	İç Rüzgâr Yükü Ve İç Negatif Rüzgâr Yükü Toplamı
W_e	Dış Rüzgâr Yükü
W_e	Eğilme Eksenine Göre Elastik Mukavemet Momenti
W_{ex}	Lokal X Eksenine Göre Elastik Mukavemet Momenti
W_{ey}	Lokal Y Eksenine Göre Elastik Mukavemet Momenti
W_i	İçi Rüzgâr Yükü
W_{iN}	İç Negatif Rüzgâr Yükü
W_{iP}	İç Pozitif Rüzgâr Yükü
W_p	Eğilme Eksenine Göre Plastik Mukavemet Momenti
W_{px}	Lokal X Eksenine Göre Plastik Mukavemet Momenti
W_{py}	Lokal Y Eksenine Göre Plastik Mukavemet Momenti
Z	Yapı Yüksekliği
Z_{max}	Arazi Kategorisine Bağlı En Büyük Yapı Yüksekliği
Z_{min}	Arazi Kategorisine Bağlı En Küçük Yapı Yüksekliği
Z_o	Arazi Kategorisine Bağlı Engebelik Uzunluğu
α	Termal Sıcaklık Katsayısı
α	Çatı Eğim Açısı

β	Eğri Çatı Eğiminin Yatay Düzlem İle Oluşturduğu Açı
λ	Narinlik Oranı
λ_f	Enkesitin Başlık Parçası Narinliği
λ_p	Kompakt Elemanlar İçin Narinlik Sınır Değeri
λ_{pf}	Kompakt Başlık Parçası İçin Narinlik Sınır Değeri
λ_{pw}	Kompakt Gövde Parçası İçin Narinlik Sınır Değeri
λ_r	Narin Olmayan Eleman İçin Narinlik Sınır Değeri
λ_x	Lokal X Yönü Narinlik Oranı
λ_y	Lokal Y Yönü Narinlik Oranı
μ_i	Kar Yükü Şekil Katsayısı
ρ	Birim Hacim Ağırlığı
υ	Poisson Oranı
Φ	YDKT Dayanımı Katsayısı
Φ	Rüzgârın Geldiği Yöndeki Eğimi (Orografi Katsayısı İçin)
Φ_c	Basınç Kuvveti Etkisi Altında YDKT Dayanım Katsayısı
Φ_t	Çekme Kuvveti Etkisi Altında YDKT Dayanım Katsayısı
Φ_v	Kesme Kuvveti Etkisi Altında YDKT Dayanım Katsayısı

Kısaltma	**Açıklama**
AISC	The American Institute Of Steel Construction
ÇYTHYEDY	Çelik Yapıların Tasarım, Hesap Ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik
DIN	Deutsches Institut Für Normung
EN	European Norm
GKT	Güvenlik Katsayıları İle Tasarım
IPE	I-Profile European
PVB	Polivinil Buteral
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TS	Türk Standartları
YDKT	Yük Ve Dayanım Katsayıları İle Tasarım

ÖZET

ÇELİK UZAY KAFES KUBBE SİSTEMLERİNİN TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİ VE TÜRK ÇELİK YAPILAR TASARIM YÖNETMELİĞİNE GÖRE ANALİZ VE TASARIMI

Bektaş, Mehmet Ali

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Sedat Hayalioğlu

Mayıs 2023, 135 sayfa

Mimaride ve yapısal mühendislikte geniş açıklıklı çatı sistemlerinden en çok bilinen uzay kafes sistemleridir. Bu sistemler daha geniş açıklıkları daha az taşıyıcı eleman ile sağlayarak hafif konstrüksiyon ve daha ekonomik bir çatı sistemi sağlamaktadır. Uzay kafes sistemleri farklı tasarımlarla karşımıza çıkmaktadır. Bu sistemler farklı tasarım ve farklı taşıyıcı elemanlar ile yapısal davranışları farklı olmaktadır. Uzay kafes sistemlerinin ilk örneklerini oluşturan kubbesel sistemler çift ve tek katmanlı kafes sistemlerindendir; dikey eksen etrafında radyal olarak dönen kafes veya kiriş sistemlerinin birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu sistemler en az yüzey ile maksimum miktarda alanı kaplamaktadır. Ayrıca geniş alanları örterken diğer sistemlere göre daha az taşıyıcı eleman ihtiyacı ile inşaat sektöründe mimari bütünlük ve ekonomiklik sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında farklı yükseklik/açıklık oranına sahip tek katmanlı ve çift katmanlı kubbesel model oluşturulmuştur. Oluşturulan kubbe modellerinin deprem yükü hesabında Türkiye bina deprem yönetmeliği-2018; kar ve rüzgâr yük hesaplarında ise Eurocode-1 yönetmeliği kullanılarak hesaplanmıştır. Tüm analiz ve tasarımlar SAP2000 programı kullanılarak yapılmıştır. SAP2000 programında analizler, Türk çelik yapılar tasarım yönetmeliğinin "Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım" yönteminin yük katsayılarına göre; tüm tasarımlar ise American Institute of Steel Construction (AISC) 360-10 yönetmeliğine göre yapılmıştır. SAP2000 programının analiz ve tasarımı sonucunda elde edilen bazı kritik çubuk kesitlerinin etki/kapasite oranları Türk Çelik Yapılar Tasarım Yönetmeliğinin tasarım kurallarına göre de hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Sayısal çözümlerden bu oranların aynı ya da yakın olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, çelik kubbe gibi büyük sistemlerinin analiz ve tasarımında SAP2000 programı gibi modern araçlar verimli bir şekilde kullanılmıştır. Bu çalışma, çelik kubbelerin analizi ve tasarımı hakkında bilgi edinmek isteyenler için yararlı bir kaynak olabilir.

Anahtar Kelimeler: Uzay Kafes, Çelik Kubbe, Yapısal Analiz, Yapısal Tasarım

ABSTRACT

ANALYSİS AND DESİGN OF STEEL SPACE-TRUSS DOMES ACCORDİNG TO TURKEY'S BUİLDİNG EARTHQUAKE CODE AND TURKİSH STEEL STRUCTURES DESİGN CODE

Bektaş, Mehmet Ali

MSc Thesis in Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Sedat Hayalioğlu

May 2023, 135 pages

In architecture and structural engineering, one of the most well-known wide-span roof systems are the space truss system. These systems provide a lightweight and more economical roof structure by providing wider spans with fewer elements. Space truss systems also come in different designs with different structural behaviors due to their different designs and supporting elements. The dome systems, which are the first examples of space truss systems, are double and single curvature cage systems created by combining radial cage or beam systems rotating around the vertical axis. These systems cover maximum amounts of area with minimum surface. Additionally, while covering large areas, they provide architectural integrity and economy in the construction sector with less need for elements than other systems.

In this thesis, single-layer and double-layer dome models with different height/span ratios were created. The dome models were calculated using the Eurocode-1 codes for all load assignments except for the earthquake load, which was calculated using the Turkish Building Earthquake Code 2018. All designs and analyses were performed using the SAP2000 program, and load factors of Turkish Steel Design Code according to the "Load and Resistance Factor Design (LRFD)" method were used. All designs were also performed using the American Institute of Steel Construction (AISC) 360-16 specifications. For some critical bars, the stress/capacity ratios obtained from SAP2000 solutions were compared to the ratios of the Turkish code. These ratios calculated from the numerical solutions are either the same or very close to each other than the ratios calculated by other methods.

As a result, for the analysis and desing of large structures like steel domes, SAP2000 program was effectively used. This study can be a useful resource for those who want to learn about the analysis and design of steel domes

Keywords: Space Truss, Steel Dome, Structural Analysis, Structural Design

1. GİRİŞ

Mimari tasarımlarda mümkün olduğunca geniş açıklıklı ve daha az yapısal elemanlarından oluşan tasarımlar istenir. Bu sebeple mimarlar ve mühendisler daha geniş açıklık ve daha az elemanlı yapı sistemlerinin tasarımı üzerine sürekli çalışmaktadırlar. Uzay kafes sistemleri de geniş açıklıklı ve hafif olmalarından dolayı mühendislikte tasarım seçeneklerinden biridir. Uzay kafes sistemlerinin kullanım alanları; alışveriş merkezleri, tiyatrolar, stadyumlar, spor salonları, toplantı salonları ve sanayi yapıları gibi yapılar geniş açıklıklı sistemlere örnek olarak gösterilebilir.

Kubbe sistemleri çelik elemanlardan önce farklı yöntemlerle tarih boyunca mimar ve mühendisler tarafından sıklıkla tercih edilmiştir. Günümüzde de yapılmak üzere, ilk kubbe sistemlerinde kullanılan malzemeler taş, tuğla, ahşap elemanlarından yapılmıştır bu tip kubbeler yapım ve malzeme gereği daha dar açıklıklı olarak yapılmıştır. Duvarların üst sırasından yukarıya doğru çıkıldıkça üst üste bindirilerek taşların birbirine doğru daralmasıyla yarı küre formunda oluşturulan sistemler oluşturulmuş MS 120'de İmparator Hadrian tarafından Roma'da yapılan Pantheon Tapınağı önemli kubbe yapılarından biridir. Bu tapınağın kubbesi daire plan üzerine oturtulmuştur. Daha sonra nitelikli harçlar, farklı malzemelerle farklı yapım teknikleri ile birlikte daha geniş açıklıklı kubbeler tasarlamıştır.

Kubbe sistemlerinin gelişimi malzeme gelişimi ile paralel gitmiştir. Betonarme kubbelerin ardından çelik endüstrisinin gelişmesi ile çelik kubbe sistemleri gelişmiştir. Betonarme sistemler zamanında her ne kadar daha geniş açıklıklı olsalar da hem yapım süresi hem de yapı ağırlığını arttırdığı için çelik endüstrisinin gelişmesi ile betonarme kubbelerin yerine çelik kubbeler; hafif, az maliyetli, geniş açıklıklı imalat kolaylıkları dolayısıyla mühendisler için daha cazip olmuştur. Uzay kafes sistemlerinin biçim ve oluşum sistemleri bakımından birçok çeşitleri vardır. Bunlardan biri de kubbesel uzay kafes sistemleridir. Kubbesel uzay kafes sistemleri dönel yüzey üzerinde bulunan eliptik yay veya çift eğrilikte çubuk sistemlerinden oluşmaktadır.

Tez çalışmasının kapsamında olan çelik kubbe sistemleri standart ve yönetmelikler açısından incelenmiştir. İncelenen iki model üzerinden tek ve çift katmanlı, çift eğrilikli sistemlerin hesap ve analiz kısımları değerlendirilmiştir

Çelik kubbelerin analizi, yapı elemanlarının davranışlarının anlaşılması ile başlar. Bu yapı elemanları, düzlem gerilme durumunda kalırken, eğilme ve burulma gerilimlerine de maruz kalırlar. Ayrıca, kubbenin geometrisi, yük koşulları, malzeme özellikleri ve çevresel faktörler de kubbelerin davranışını etkilerler. Bu nedenle, çelik kubbelerin analizi için doğru yöntemlerin seçilmesi çok önemlidir.

Bu tez çalışmasında, çelik kubbelerin tasarımı için AISC 360-10 yönetmeliği kullanılmış ve sonuçlar Çelik Yapıların Tasarım, Hesap Ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliği(ÇYTHYEDY) ile karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde çelik kubbe sistemleri ile ilgili önceki çalışmalar ve literatürdeki bulgular hakkında bilgi verilmiştir. Bu bilgi, bu tez çalışmasının önemini vurgulamakta ve çelik kubbelerin analizi konusunda yapılan diğer çalışmalara bir temel oluşturmaktadır.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde, çelik kubbelerin tanımı, özellikleri ve uygulama alanları ele alınmıştır. Bu bölümde, çelik kubbelerin geometrisi, malzeme özellikleri ve yük koşulları hakkında ve çelik kubbelerin yük etkilerine nasıl tepki verdikleri de incelenmiştir. İlgili yük yönetmeliklerde belirtilen kurallara göre hesaplanan tüm yükler hesaplanmıştır. Bu bölümde, SAP2000 ile AISC 360-10 yönetmeliğine göre iki çelik kubbenin analiz ve tasarım sonuçları verilmiştir. Ayrıca bu bölümde ÇYTHYEDY yönetmeliğinin tasarım esasları incelenerek bu yönetmeliğe göre de tasarım yapılmıştır.

Tez çalışmasının "Bulgular ve Tartışma" bölümünde; AISC 360-10 yönetmeliğiyle SAP2000 programı kullanılarak tasarımı yapılan kesitlerin, ÇYTHYEDY yönetmeliğinin tasarım esaslarına göre de kontrol edilmiştir.

Sonuç olarak bu tez çalışması; çelik uzay kafes kubbe sistemlerinin yüklerinin nasıl hesaplanacağı ve sistemlere nasıl yükleneceği, analiz ve tasarımlarının nasıl yapılacağı konusunda bilgi içermektedir. Ayrıca bu çalışmada iki ayrı tasarım yönetmeliğinin karşılaştırılması da yapılmıştır.

Bu çalışma, çelik kubbelerin analizi konusunda yapılan gelecekteki araştırmalara da katkı sağlayarak bir temel oluşturacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

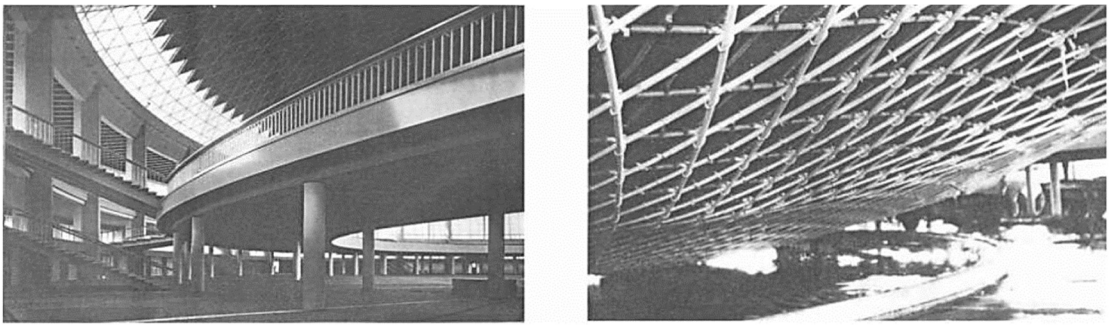
Çelik kubbelerin analizi, mühendislik alanında uzun bir geçmişe sahiptir ve birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Özellikle son yüzyılda, kubbesel sistemlerin yapımında çelik malzemenin kullanımı ile birlikte, bu alanda yapılan çalışmalar da artmıştır. Bu nedenle, bu bölümde çelik kubbelerin analizi konusunda önceki çalışmalar ve literatürdeki bulgular hakkında bilgi verilmiştir. Bu bilgi, bu tez çalışmasının önemini vurgulamakta ve çelik kubbelerin analizi konusunda yapılan diğer çalışmalara bir temel oluşturmaktadır ve gelecekte yapılacak çalışmalar için yol gösterici niteliktedir.

Kubbesel sistemler ile ilgili başlıca çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

Timoshenko ve Woinowsky-Kriger (1959), " Plak ve Kabukların Teorisi " kitabında kubbe sistemleri üzerindeki gerilmelerin dağılımı ve yük altında deplasman tespiti için hesap yöntemleri ortaya konulmuştur.

Timoshenko (1961) tarafından, "Elastik Burkulma Teorisi" kitabında kabuk elemanlarda oluşan burkulma sorununa farkı çözümler göstermiştir ayrıca kabuk elemanların maksimum yük noktasından önce de burkulma olma olasılığı olduğunu ortaya koymuştur.

Papadopoulos ve LoRicco (2006), Ocak ayında 93,5 metre çapında ve 19,107 metre yüksekliğinde çelik kubbesi bulunan Bükreş ulusal ekonomi köşkü kubbesinin burkularak ters dönme sebeplerini araştırmış. Düzensiz dağılmış kar yükünün bölgesel burkulma yaşadığı ve burkulma yaşanan bölümün kubbenin diğer yüzeylerini de burkulmaya zorladığı ve Şekil 2.1'de göründüğü üzere ters dönmenin yaşandığını ve taban çemberinin ilk pozisyonunu değiştirmediği ve kubbenin formunun değişmediği sonucunu çıkarmıştır. Ayrıca yazar tarafından, uzay kubbelerin iklim koşullarında yerel ve global yüklerden kaynaklı asimetrik yüklere karşı malzemeyi ve birleşim elemanlarının kesme, burkulma ve eksenel davranışlarının tümünün mukavemet gösterecek şekilde tasarlanması gerektiği tavsiye edilmiştir.



Şekil 2. 1 Simetrik olmayan kar yükü sonucu tersine burkulan kubbe (Papadopoulos ve LoRicco, 2006)

Soykan (2007); kubbe sistemlerinin çember, elips ve parabol eğrilik form tiplerini kubbenin stabilitesi, deplasmanları ve birim alan ağırlığını tablolar halinde göstermiş, maliyet odaklı bir karşılaştırma yapmıştır. Çalışma kısmında yaptığı farklı açıklık ve yüksekliklere sahip kubbeler sistemlerin sonuçlarını birbirleriyle karşılaştırılarak yorumlamıştır.

Çiftçi (2009), uzay kubbe sistemlerindeki geometrik deformasyon ve doğrusalsızlıktan doğan stabilite etkileri belirlemiştir.

Karabulut (2018), Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliği ve Eurocode 3'e göre, geniş açıklıklı uzay kafes çatı sisteminin boyutlandırılması yapılmış. Tasarım esasları ve boyutlandırma kuralları açısından, "Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik" ve "Eurocode 3 çelik yapı yönetmelikleri" incelenmiş. Kesit özellikleri, eksenel çekme, basınç ve ekonomik açıdan karşılaştırılmış. Ayrıca, çelik malzeme metrajı çıkarılarak ekonomiklikleri karşılaştırılmıştır.

Kara (2019), farklı yükseklik/açıklık oranlarına sahip tek katmanlı kubbelerin Amerika, Avrupa ve Türk yönetmeliklerine göre karakteristik yükleme hesap sonuçlarını karşılaştırmış. Diametik ve jeodezik tipi kubbelerin performans sonuçlarını karşılaştırılarak kesit tesirleri ve maliyet analizlerini değerlendirmiştir.

Özcan (2019), nervürlü ve schwedler tipi kubbelerin asimetrik yüklerden doğan stabilitesini incelemiş ve bu iki kubbe arasında schwedler tipi kubbenin daha rijit davrandığını belirlemiştir.

Yılmaz (2021), tek katmanlı kubbe sistemlerinin stabilitesini yakından inceleyerek, en önemli stabilite kaybının yük altındaki düğüm noktasının ötelenmesi sonucu oluşan burkulma durumu olduğunu belirlemiştir. Bu durumun performans değerlendirmesini, kiriş berkitmeleri kullanarak yapmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, kesit artışından ziyade berkitme elemanlarının kullanılması durumunda, burkulma kararsızlığını önlemenin yanı sıra yapı ağırlığında %20 civarında ciddi düşüş tespit etmiştir.

Adnanoğlu (2022), Ribbed ve Schwedler kubbe sistemlerini referans alarak ekonomik ve dayanıklı kubbe sistemleri tasarlamak için parametrik bir çalışma yapmıştır. Oluşturulan 72 farklı model arasında yapılan analiz, tasarım ve maliyet karşılaştırması sonucunda, kubbe kafes sistemleri kirişlerinde petek boşluğu bırakılmasını, tasarım ve ekonomik olmaları açısından değişken kabul edilmiştir.

Wang ve Jiang (2022), farklı tasarım stillerine sahip küresel yapıların rüzgâr yükleri sistemli olarak incelemiştir. Sonuçlar, rüzgârın en yüksek pozitif ortalama basınç katsayısının (C_p) yükseklik/çap oranı ile arttığını, yapılarda güçlü bir emme etkisi olduğunu ve sürükleme ve kaldırma katsayılarının yükseklik/çap oranı ile arttığını göstermiştir. Tüm küresel yapı türleri için en büyük emiş etkisini hızlı bir şekilde belirlemek için tepe alanı üzerindeki C_p'nin polinomlu bir yaklaşım fonksiyonunu türetip tasarım önerileri sunulmuştur.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Uzay Kafes Sistemleri

Mühendis ve Mimarlar daha hafif taşıyıcı sistem ile daha geniş açıklıklı örtü sistemleri tasarımı üzerine sürekli çalışmaktadırlar. Çelik endüstrisinin de gelişmesi ile uzay kafes sistemleri diğer örtü sistemlerine göre avantajlarından dolayı dünyada ve ülkemizde giderek popülerlik kazanmaktadır. Bu talepten dolayı uzay kafes sistemlerinin tasarımı, stabilitesi, yapısal davranışı ve analizi için mühendisler sürekli literatüre katkı sağlamaktadırlar.

Uzay kafes sistemleri birden fazla katman tasarımına göre eğilmeye maruz kalmayan sadece eksenel kuvvet altında kalan ve noktasal düğüm noktalarından oluşan üç boyutlu sistemlerdir. Bu sistemler yükü en ideal şekilde dağıtacak şekilde tasarlanan geniş açıklıklı tasarımlarda kullanılabilecek sistemlerdir. Tek katmanlı kubbelerde eksenel gerilme dışında genellikle moment ve burulma etkisi de oluşmaktadır.
Uzay kafes sitemlerinin diğer sistemlere göre üstün ve sakıncalı yanları şu şekilde sıralanabilir,
Üstün yanları;

- Diğer sistemlere göre daha hafif ve rijittirler.
- İmalat ve montaj süresi kısadır.
- Yapının geometrisine göre farklı şekillerde tasarımı yapılabilir.
- Geniş açıklıklı yapılarda ölü yük diğer sistemlere göre daha düşüktür ve bu da deprem etkisini azaltmaktadır.
- Düşük ölü yük ile kafesin mesnetlendiği kolon veya temellere az yük geleceğinden bu elemanlar düşük kesitli tasarlanabilirler.

Sakıncalı yanları;

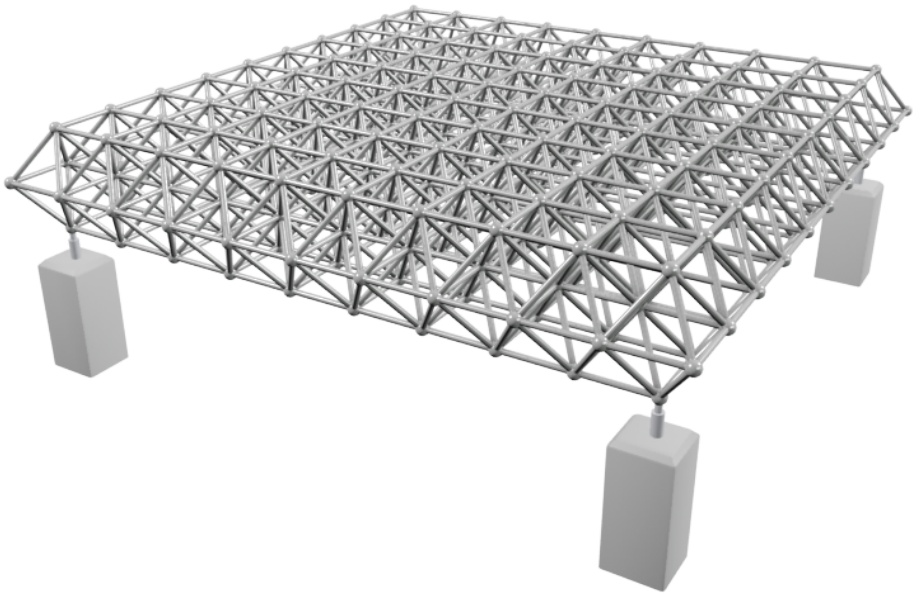
- İmalat sürecinde bırakılan küçük kusurlara karşı daha hassastır
- Kısa açıklıklar için daha maliyetli olabilmektedir.
- Yangın dayanımı için ekstradan önlemler alınmalıdır ve bu önlemler yapıya ekstradan maliyet yükü bindirmektedir.
- Genellikle çelik malzemesi kullanılmaktadır, ancak çelik korozyona karşı dayanıksızdır. Bunu önlemek için boya veya galvanizleme gibi işlemler maliyeti artırmaktadır

Uzay kafes sistemlerini tasarım şekline göre 3 gurupta incelenebilir. Bu guruplardaki sistemlerin katman sayıları değişebilir ve değişen katman sayılarına göre yapısal davranışları değişebilir dolayısıyla yapısal gerilmeleri de değişebilmektedir.

- Düzlemsel Uzay kafes sistemler
- Tek eğrilikli uzay kafes sistemleri (tonozsal)
- Çift eğrilikli uzay kafes sistemleri (kubbesel)

3.1.1 Düzlemsel uzay kafes sistemler

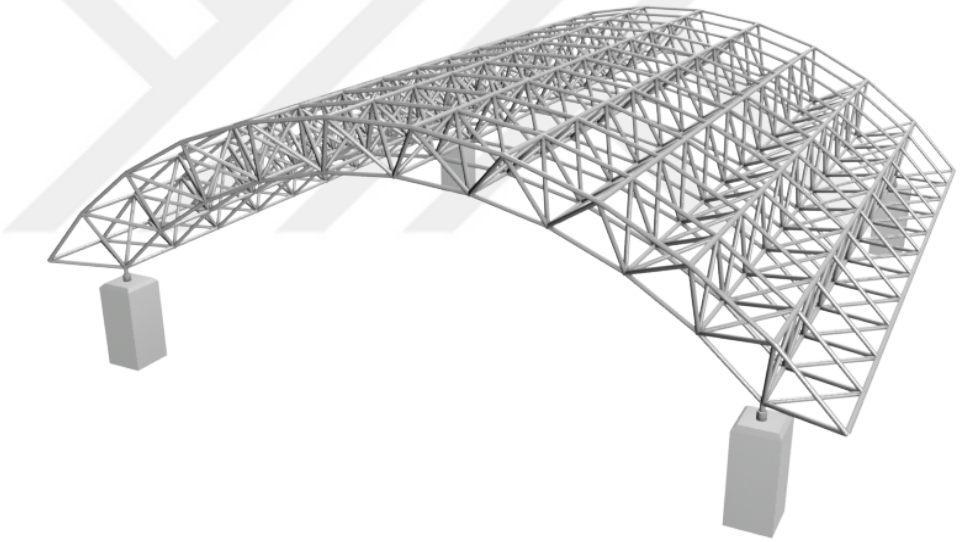
Uzay kafes sistemlerinin uygulamada en sık rastlanan sistemi düzlemsel uzay kafeslerdir. Düzlemsel uzay kafesler eğriliği olmayan çubuk elemanlardan belirli bir açıklıkla yüzeysel bir şekil oluşturan taşıyıcı sistemlerdir. Bu kafes sistemlerinin tek tabakalı olarak tasarlanması durumunda tek tabaka ile istenen bir stabilite yakalanamayacağından tek tabakalı sistemlerin düğüm noktaları mafsallı değildir böylece moment alır, bu yüzden tek tabakalı sistemlerin tasarımında çubuğa etkiyen momentin dikkate alınması gerekir. Birleşim noktalarının mafsallı olması durumunda teorik olarak çubuk elemanlarda moment yükü etkili olmayacaktır ama mafsallı düğüm noktası için uzay kafesin en az çift katmanlı olarak tasarlanması gerekmektedir.



Şekil 3. 1 Düzlemsel üç tabakalı uzay kafes sistemi (Pirhadi ve Maalek, 2018)

3.1.2 Tek eğrilikli (Tonozsal) uzay kafes sistemleri

Tek eğrilikli çelik kafesler, yapısal sistemlerin birçok farklı alanında kullanılır, özellikle büyük açıklıklı yapılarda çatı, kubbe veya çatı kaplaması olarak tercih edilirler. Tek eğrilikli çelik kafesler, yapının özelliklerine bağlı olarak farklı eğrilik yarıçaplarına sahip olabilir. Daha küçük açıklıklar için daha az eğrilik yarıçaplarına sahip kafesler kullanılabilirken, daha büyük açıklıklar için daha yüksek eğrilik yarıçaplarına sahip kafesler tercih edilir. Kafesin genel rijitliği, eğrilen bölümlerin kendi kendine ayakta durabilme kapasitesine bağlıdır. Bu nedenle, daha büyük açıklıklar için daha yüksek eğrilik yarıçaplarına sahip kafesler kullanılır. Tek eğrilikli çelik kafeslerin yapısal davranışı, yüksek gerilmelerin yoğunlaştığı bölümleri nedeniyle karmaşıktır. Eğrilen bölümlerde, eğilme momenti ve kesme kuvvetleri gibi yüksek gerilmelerin konsantre olduğu belirli bölgeler vardır. Bu nedenle, kafesin eğrilen bölümleri veya tamamı genellikle çelik diyagonal elemanlar ile güçlendirilir.



Şekil 3. 2 Tek eğrilikli çift tabakalı uzay kafes sistemi (Ashtul ve Patil, 2020)

3.1.3 Çift eğrilikli (Kubbesel) uzay kafes sistemleri

Kubbesel uzay kafes sistemleri geniş açıklıklı alanları en az taşıyıcı eleman ihtiyacı ile karşılayan örtü sistemlerinden biri olan çift eğrilikli sistemlerdir. İlk yapısal formlardan biri olan kubbe sistemleri geniş açıklıklı alanlarda en az taşıyıcı sisteme gereksinim duyarak geniş açıklıklı alanların örtülmesinde ekonomik olarak uygulanabilecek sistemlerden biridir. Kubbesel örtü sistemleri taş, tuğla, beton, ahşap gibi malzemelerden çok gelişen çelik endüstrisi ile birlikte çelik malzeme kullanılarak daha geniş açıklıklara ulaşılabilmektedir.

3.2 Kubbesel Uzay Kafes Sistemlerinin Sınıflandırılması

Kubbesel uzay kafes sistemleri çift eğrilikli yüzeye sahip tek tabakalı ya da çok tabakalı olarak tasarlanabilen taşıyıcı eleman ve düğüm noktalarından oluşan ve aldığı yükü tüm çubuklara dağıtan taşıyıcı sistemlerdir.

Kubbesel uzay kafesleri ana tasarım tiplerine göre ayrılabilir.

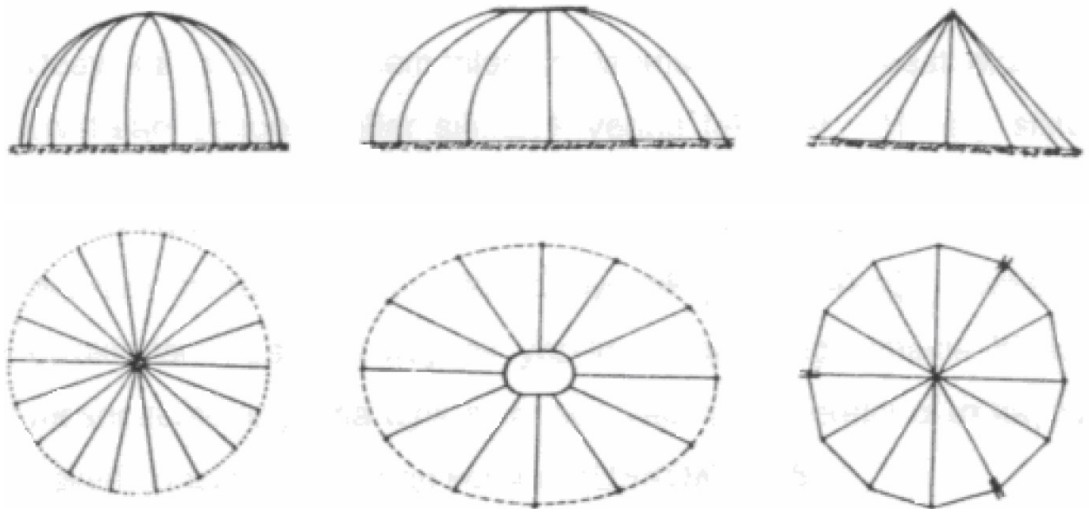
Başlıca kubbesel kafes sistemleri;

1. Radyal nervürlü kubbe sistemleri
2. Schwedler kubbe sistemleri
3. Lamella kubbe sistemleri
4. Jeodezik kubbe sistemleri
5. Üç doğrultulu ızgara kubbe sistemleri

3.2.1 Radyal nervürlü kubbeler

Nervürlü kubbe, kubbe merkezinin dikey eksen etrafında radyal olarak dönen kemerlerden oluşan kubbe olarak tanımlanabilir. Kemer sayısı arttıkça üst noktada kesişen uçlarda karmaşıklık veya kemerler arası boy farklılığından düzensiz gerilmeler olacağından kemerlerin üst noktasında genellikle bir basınç halkası kullanılarak tasarlanır. Kemerlerin birleştiği üst uç nokta basınç bölümü alt tarafa mesnetlenmiş uç bölüm ise çekme bölümüdür.

Küçük açıklıklı alanları örtmek için montaj kolaylığı açısından en çok tercih edilen kubbe sistemlerinden biridir ama geniş açıklıklar için daha büyük kesit gerekliliğinden dolayı yüksek maliyet ve daha zor montaj gerektirecektir.



Şekil 3. 3 Radyal nervürlü kubbelerin plan ve görünüşü (Subramanian, 1999)

1912 yılında Max Berg tarafından Polonya da tasarlanan Centennial Hall, günümüzde en geniş açıklıklı betonarme nervürlü kubbe özelliğini taşımaktadır. Geniş dairesel simetrik bir alana sahip kubbe, 32 radyal nervürlü olarak 65 metre çapındaki kubbe 4 kemer ile taşınmaktadır.



Şekil 3. 4 Centennial hall, Wroclaw, Polonya

1968 yılında David Cockburn tarafından tasarlanan İskoçya'daki Bell's Sport Centre açıldığı zaman birleşik krallığın en büyük lamine ahşap kubbesiydi. Kubbe tasarımı her biri 35 m uzunluğundaki 36 yay kirişten oluşan 15 m yüksekliğinde ve 67 m çapındadır.



Şekil 3. 5 Bell's sport centre, Perth, İskoçya

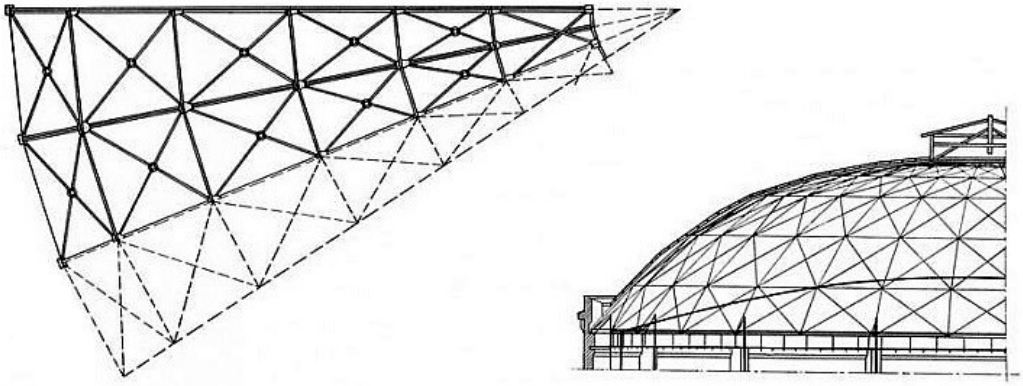
Oasis Leisure Centre kubbesi, 1976 yılında İngiltere'de inşa edilmiş bir yapıdır. Kubbenin çapı 45 metre olup, elipsoidal yarı şekline sahiptir. Ana strüktürü 48 adet çelik nervür kirişten oluşmaktadır. Kubbenin dış yüzeyi camla kaplıdır ve iç mekân oldukça geniş ve ferah bir yapıdadır. Kubbenin çekme bölümü olan ve en büyük gerilmeleri karşılayan alt bölüm, 4 sıra çapraz diyagonal kirişler ile desteklenmiştir. Oasis Leisure Centre kubbesi, modern mimarlıkta önemli bir yere sahiptir ve yapılmış en büyük cam kaplı kubbe yapılarından biridir. Kubbenin yapımında kullanılan teknolojiler, mimarlar ve mühendisler tarafından daha sonraki kubbe yapıların tasarlanmasında da kullanılmıştır.



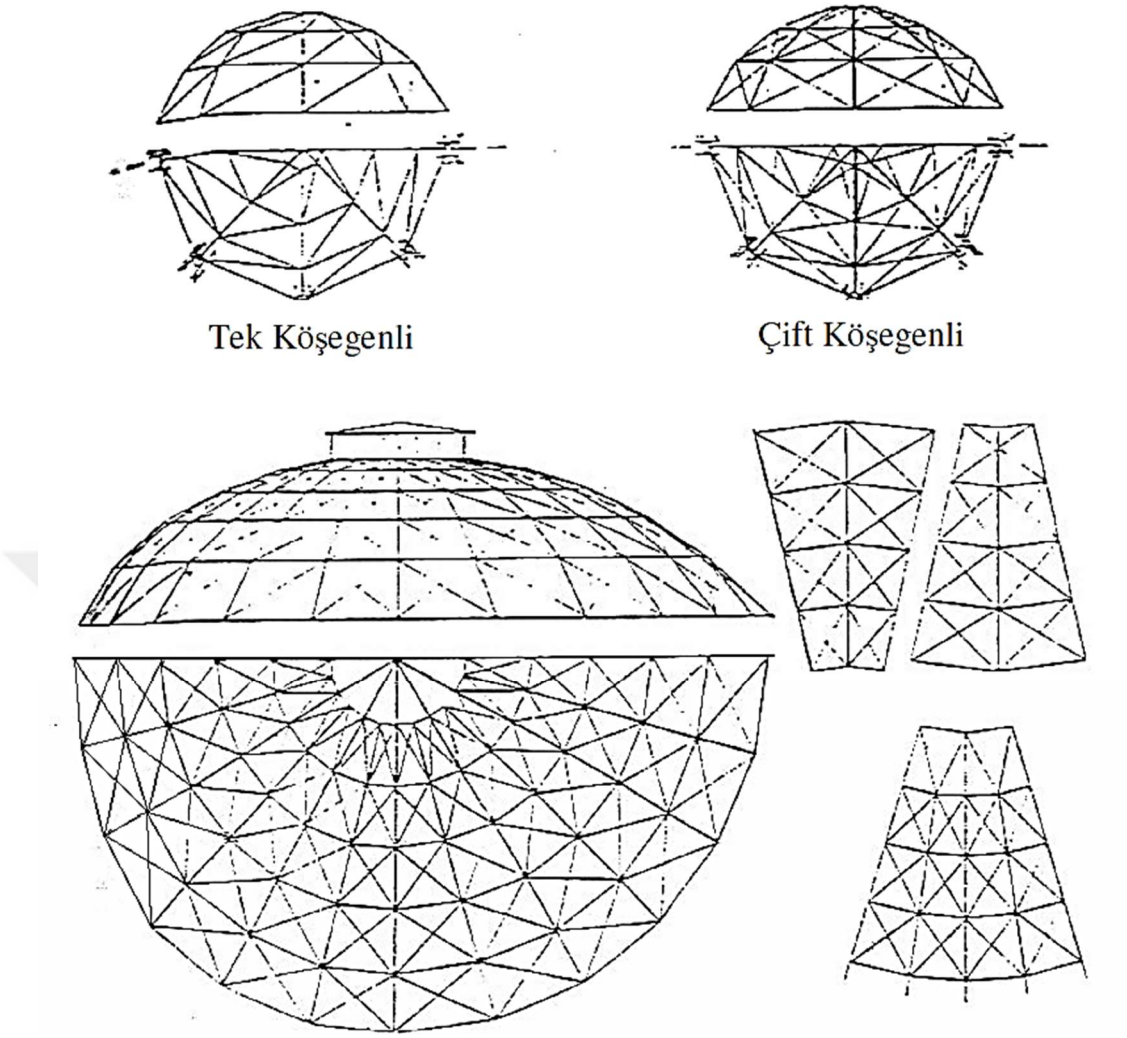
Şekil 3. 6 Oasis leisure centre, Wiltshire, İngiltere

3.2.2 Schwedler kubbeler

Schwedler kubbe, 19. yüzyılda Alman inşaat mühendisi Johann Wilhelm Schwedler tarafından geliştirilmiş bir kubbe türüdür. Bu kubbenin simetrik olmayan yükleri güvenle alabilmesi için diyagonal nervürler kullanılarak tasarlanmıştır. Bu sayede Schwedler kubbe, büyük açıklıkların olduğu yapılar için ideal bir çözüm sunar. Schwedler kubbenin yapısı, radyal nervürlerin yanı sıra yatay halkalar ve yay kirişlerinin birleşim bölgesinde yer alan yamuk alanlar da diyagonal elemanlarla bölünmüştür. Bu sayede yük transferi desteklenmiş ve döngüsel simetride olan nervür kirişleri birleştiren eş merkezli halkalar daha güvenli hale gelmiştir. Schwedler kubbenin tasarımında, yük dağılımını en iyi şekilde sağlamak için diyagonal nervürler kullanılmaktadır. Bu diyagonal nervürler, simetrik olmayan yükleri güvenle alabilen bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır. Radyal nervürlerin yanı sıra yatay halkalar ve yay kirişleri de diyagonal elemanlarla bölünerek yük transferi desteklenmiştir. Bu sayede, döngüsel simetride olan nervür kirişleri birleştiren eş merkezli halkalar daha güvenli hale gelmiştir.

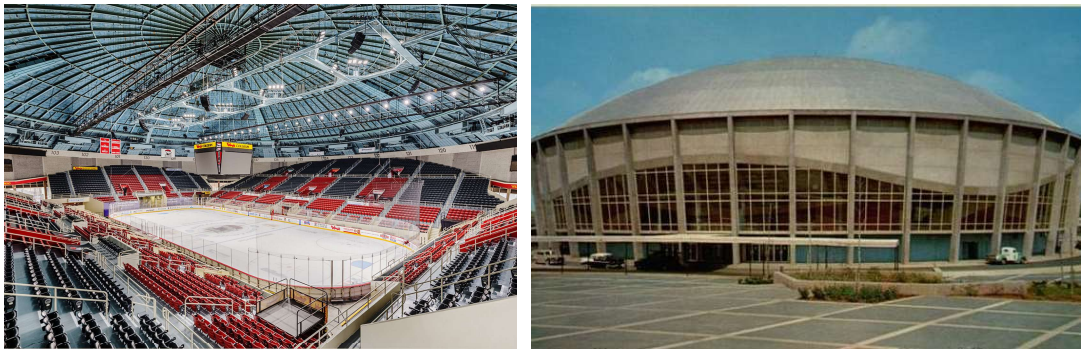


Şekil 3. 7 Çift köşegenli schwedler kubbenin plan ve görünüşü (Kurrer, 2018)



Şekil 3. 8 Schwedler kubbelerin plan ve görünüşleri (Subramanian, 1999)

1955 yılında ABD'nin kuzey Carolina bölgesinde inşa edilen Bojangles Coliseum 48 tane radyal nervür kirişin ve 9 yatay halkanın olduğu ve diyagonal elemanlar ile bu birleşimlerin desteklendiği, açıklığı 100 m çapında ve 18 m yüksekliğindedir



Şekil 3. 9 Bojangles coliseum, Charlotte, ABD

1899 yılında Avusturya'nın başkenti Viyana da yapımı tamamlanan ve ilk amacı gaz tutucu olarak tasarlanan viyana gazometreleri 4 büyük silindir binadan oluşmaktadır. Bu yapı 1984 yılına kadar gazometre olarak kullanıldı ancak 1995 yılında yeni kullanım çağrısı ile bu 4 silindirik bina kendi kendine yetecek bir yaşama alanı olarak yeniden tasarlandı



Şekil 3. 10 Viyana gazometreleri, Viyana, Avusturya

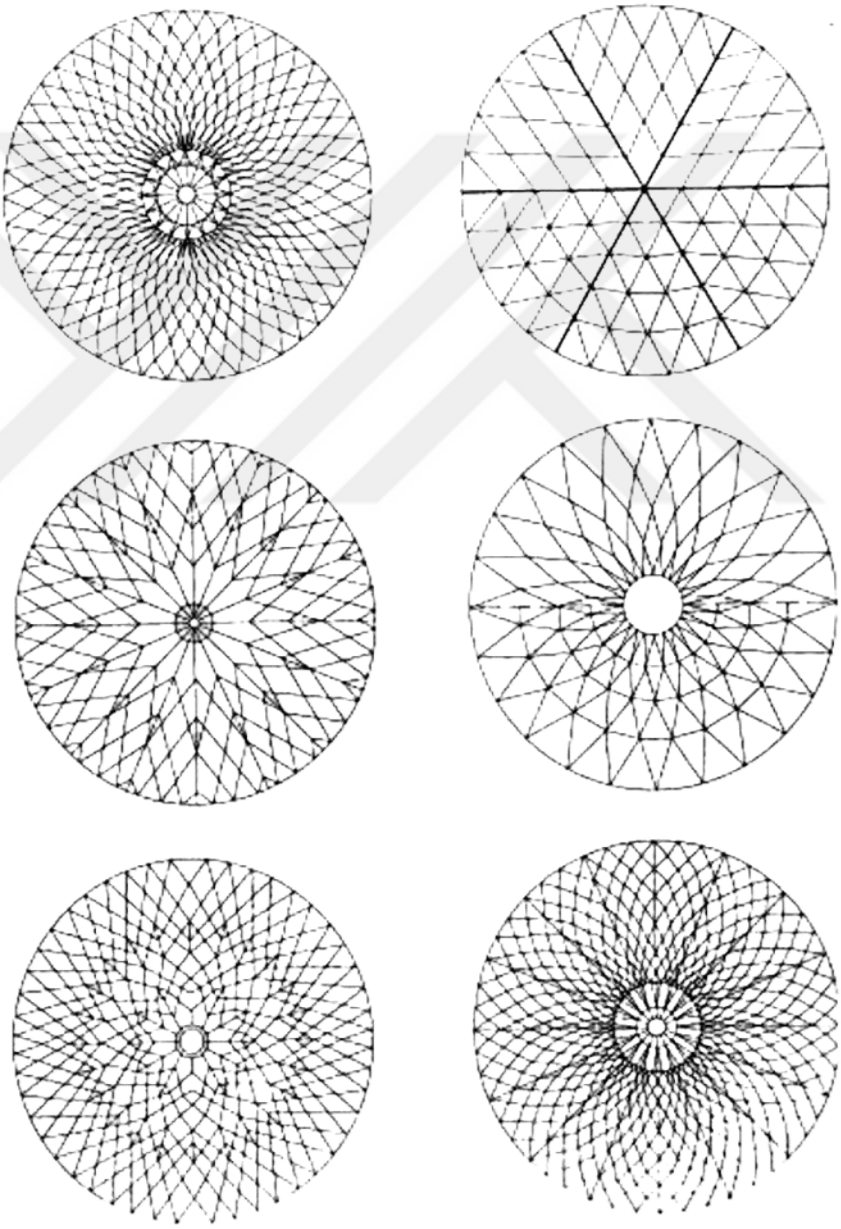
Günümüzde yaşam alanı olarak kullanılan gazometrelerin çatı tasarımında Schwedler tipi çift çaprazlı kubbe kullanılmıştır.



Şekil 3. 11 Viyana gazometresi schwedler çatı tasarımı

3.2.3 Lamella kubbeler

Lamella Kubbe, Alman Mimar F. Zollinger tarafından 1906 yılında geliştirilmiştir. Lamella biçimi diye adlandırılan eşkenar dörtgenlerin oluşturduğu kubbe sistemidir. Kubbenin çubuk yaylarının paralel biçimleri kesişerek oluşturduğu ve kubbe yüzeyinin tamamında bulunan lamella levha biçimleri kubbenin stabilitesini artırmaya katkı sağlar. Kubbenin en altında çekme çemberi ve en üstünde basınç çemberi ile kubbe içindeki gerilmeler dağıtılarak dengelenmiş olur. Bu kubbe tipi, yüksek rüzgâr yüklerine karşı oldukça stabil olması ile de bilinmektedir.



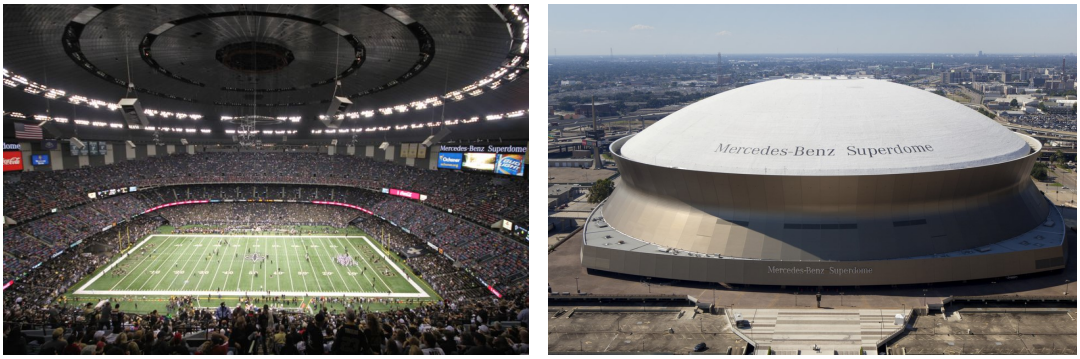
Şekil 3. 12 Lamella kubbelerin plan ve görünüşleri (Subramanian, 1999)

Lamella tipi kubbesel kafesin en iyi örneği olan ve aynı zamanda dünyanın ilk çok amaçlı kapalı spor salonu olan;1965 de inşası tamamlanan ve Teksas Houston da bulunan Astrodome örnek verilebilir. Astrodome; 220 metre açıklığı ve 63 metre yüksekliğindedir. Kubbenin ana strüktürü 12 bölüme ayrılmış ve her bölüm kirişler ile lamella levhası oluşturmuştur. Kubbenin en altında bulunan çekme halkası 72 adet kolon ile mesnetlenmiştir.



Şekil 3. 13 Astrodome, Houston, ABD

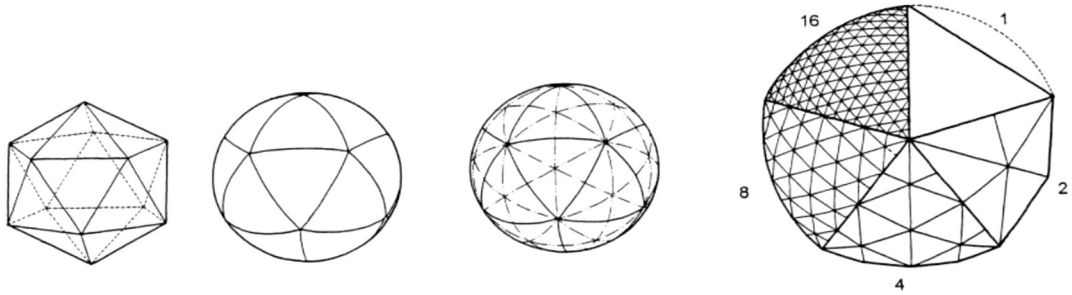
New Orleans'da bulunan Caesars Superdome; 1975 yılında açılan ve 207,3 metre açıklığı ve 83 metre yüksekliği ile Lamella tipi olarak dünyanın en geniş açıklıklı kubbesidir. Stadyum, 24 ana kaburga üzerine oturan kubbe yapısıyla inşa edilmiştir ve yan kirişlerle birlikte toplamda 48 kirişe sahiptir. Bu ana radyal kirişler, 4 ara paralel halka tarafından birleştirilirmiştir



Şekil 3. 14 Caesars superdome, New Orleans, ABD

3.2.4 Jeodezik kubbeler

Jeodezik kubbeler, kiriş ve düzlemlerin oluşturduğu geometrik şekiller ile kemer sisteminin yerini alan ve yükü kendi içinde dağıttığı küresel kubbe sistemlerindendir. Kubbe alt halkası farklı bir taşıyıcı eleman üzerine yerleştirilebildiği gibi doğrudan zemin üzerine de yerleştirilebilir. Jeodezik kubbeler küçük açıklıklardan çok geniş açıklıklara kadar montajı yapılabildiği için kullanım alanı oldukça geniştir.



Şekil 3. 15 Jeodezik kubbenin geometrik biçimlendirilmesi (Subramanian, 1999)

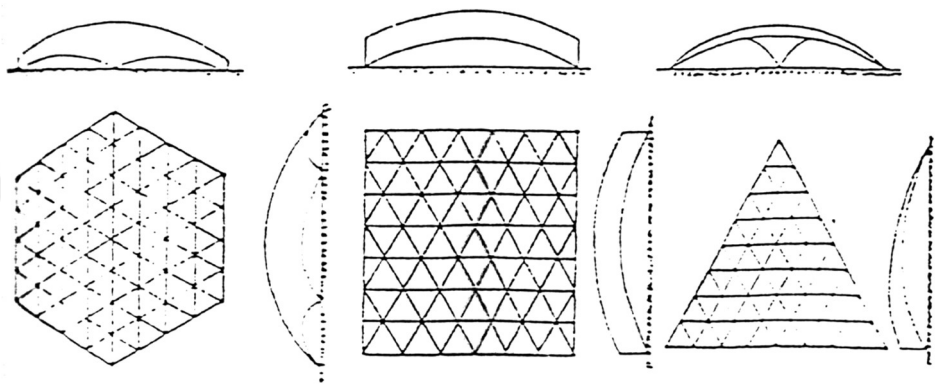
EXPO 67 Dünya Fuarı için Montreal'de inşa edilen yapı, mimar Buckminster Fuller tarafından tasarlanan ve modernleştirilen jeodezik kubbe tasarımına sahiptir. Fuller'ın patentli tasarımı, üç boyutlu bir küre yüzeyini yaklaşık 20.000 adet altıgen panelden oluşan bir kubbe ile kaplamayı amaçlamaktadır. Kubbenin çapı 76 metre, yüksekliği ise 62 metredir. Kubbe, günümüzde çevre ve ekoloji ile ilgili sergileri barındırmaktadır. Ayrıca içinde restoranlar ve diğer eğlence tesisleri bulunmaktadır. Kubbenin altıgen panelleri, birbirlerine sıkıca bağlanarak yapının sağlamlığını arttırmakta ve böylece yapının çevresel faktörlere daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır.



Şekil 3. 16 EXPO 67 biosphere, Montreal, Kanada

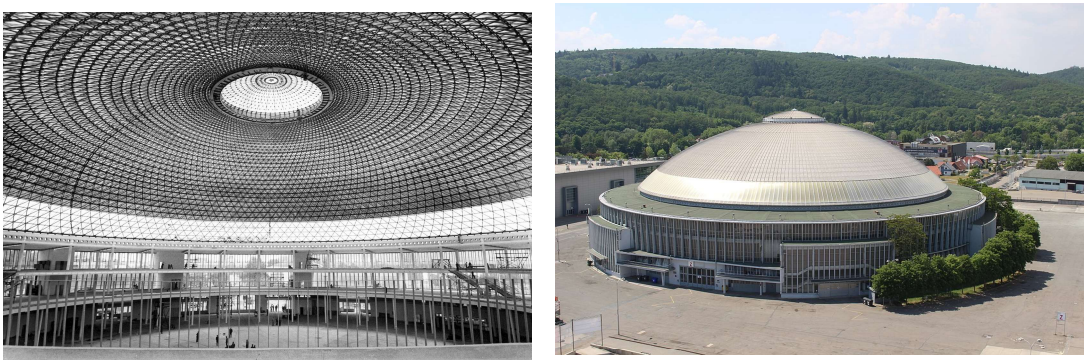
3.2.5 Üç doğrultuda ızgara kubbeler

Prof. Lederer tarafından tasarlanan üç doğrultuda ızgara kubbeler, kubbe elemanlarının eşit geometrilerinden dolayı simetrik olmayan yükler altında bile yükleri üniform bir şekilde dağıtır. Bu, kubbenin güvenli ve dayanıklı bir yapıya sahip olmasını sağlar. Bu kubbe sistemi, küresel formun yanı sıra üçgen, kare, altıgen gibi çeşitli geometrik formlarda da güvenle tasarlanabilir. Kubbelerin çubuk elemanları, özel olarak hesaplanarak, yüklerin maksimum taşıma kapasitesine ulaşmasını ve aynı zamanda en az malzeme kullanımı ile mukavemetli bir yapı elde etmek için optimize edilir. Üç doğrultuda ızgara kubbeler, ağırlık ve alan dağılımı açısından oldukça verimlidir. Kubbeler, ana kirişlerle birbirine bağlanan ikincil çubuk elemanlardan oluşur. Bu çubuk elemanlarının uzunluğu, yapısal ihtiyaçlara ve kubbenin geometrisine göre özel olarak hesaplanır. Kubbelerin, özellikle büyük açıklıklı yapılarda kullanımı oldukça yaygındır.



Şekil 3. 17 Izgara kubbelerin plan ve görünüşleri (Subramanian, 1999)

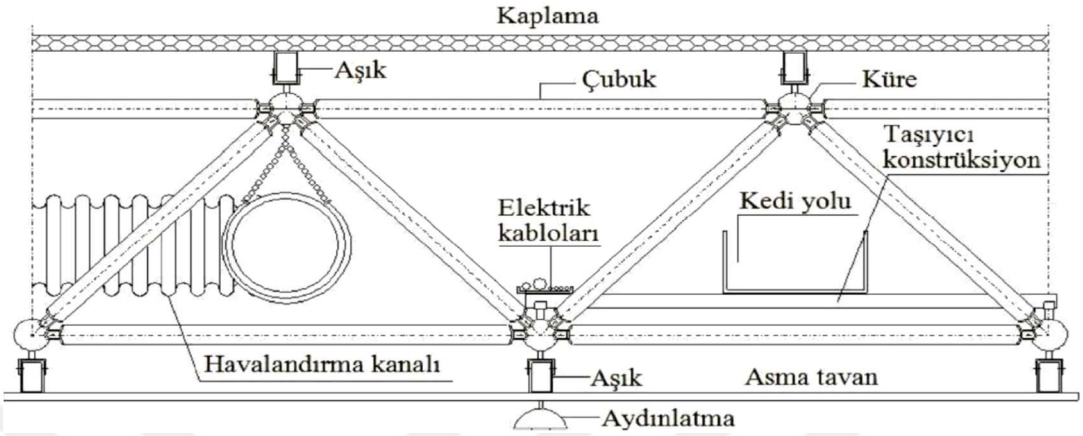
Brno sergi binası 1959 yılında Çekya'nın Brno şehrinde Prof. Ferdinand Lederer tarafından bükülmüş çelik boru profillerin birleştirilmesi ile üç doğrultulu kubbesel ızgara elemanları oluşturulmuştur. Kubbenin açıklığı 93,5 metre ve yüksekliği 19,1 metredir.



Şekil 3. 18 Brno sergi binası, Brno, Çek Cumhuriyeti

3.3 Kubbesel Uzay Kafes Bileşenleri

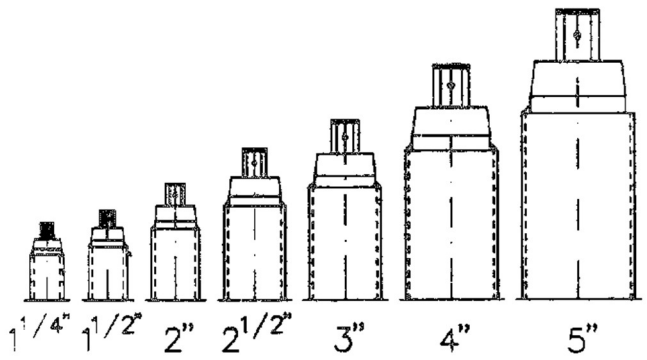
Uzay kafes birçok birleşimden meydana gelir. Bu birleşimler sistemi bir arada tutup, bir bütün olarak çalışmasını sağlar.



Şekil 3. 19 Uzay kafes bileşenleri (Soykan, 2007)

3.3.1 Çubuklar

Uzay kafes sistemleri, yükleri eksenel ve moment olarak taşıyan ve iki düğüm noktasını birbirine bağlayarak tamamlayan elemanlar kullanır. Bu elemanlar, farklı malzemelerden yapılabilmektedir ve her malzemenin özelliklerine göre farklı davranışları bulunmaktadır. Örneğin, çelik malzeme, alüminyuma göre daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir, ancak korozyona karşı daha zayıftır ve kafesin ölü yükünü arttırabilir. Uzay kafes çubukları, genellikle dairesel kesitli olmakla birlikte T, I, L, U gibi farklı kesitlerde de kullanılabilir. Çubuk elemanların birleştirilmesi için cıvatalı düğüm noktası elemanları tercih edilir. Bu elemanlar, çubukların birbirine bağlanmasını sağlar ve kuvvetleri düğüm noktalarına aktarır. Ayrıca, bu düğüm noktaları sayesinde kafes sistemi, simetrik olmayan yükler altında dahi yükleri üniform biçimde dağıtabilir.



Şekil 3. 20 Çubuk ve konik elemanları (Soykan, 2007)

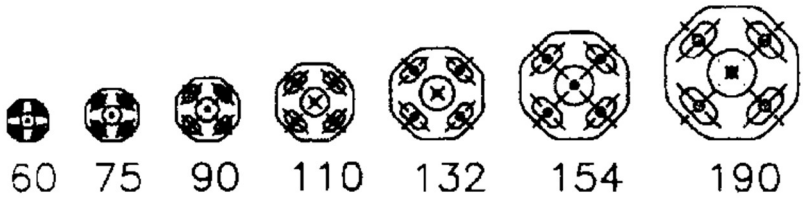
Kafes yapıları için kullanılacak; çubuk, konik imalatı ve kalite değerleri DIN EN 10025 ‘e uygun olmalıdır.

Tablo 3. 1 Çubukların DIN EN 1002’de çelik kalitelerine göre dayanım değerleri

Standart Karşılığı Kaliteler		**R_e (min.) N/mm2 (kg/mm2)**	**R_m (min.) N/mm^2(kg/mm2)**		**A (%) min.**		
					d (mm)		
		d (mm)	**d (mm)**		**A_{80}**		**A_5**
DIN EN 10025-94	DIN 17100-80	≤ 16	< 3	≥ 3 ≤ 50	> 2 ≤ 2,5	> 2,5 < 3	≥ 3 ≤ 40
S235JRG2	St 37	235 (24)	360-510 (36,7-52)	340-470 (34,7-47,9)	18	19	24
S355J2G3	St 52	355(36,2)	510-680 (52-69,4)	490-630 (50-64,3)	15	16	20

3.3.2 Düğüm noktaları

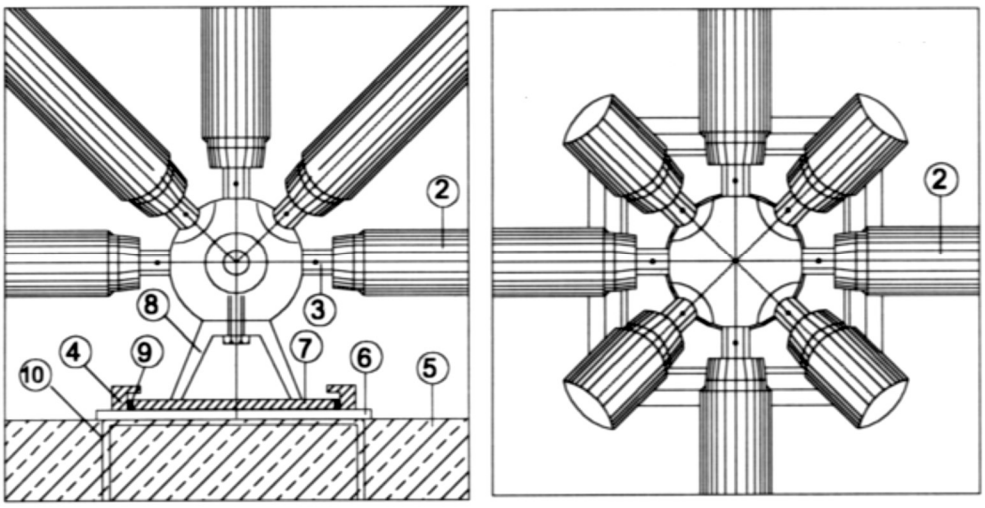
Uzay kafes sistemlerinde çubuk elemanlarını birleştiren parçalardır. Çubukları stabil olarak birleştirip sistemin tek parça gibi davranmasını sağlayan elemanlardır, Dolayısıyla sistem tek bir parça gibi çalışabilmektedir. Düğüm noktaları en az iki çubuğu birleştirebilir ve çubuk tipine, boyutuna ve aldığı yük miktarına göre farklı şekil ve ölçülerde imal edilebilir. İmal edilen düğüm noktasına açılan diş sayısı bağlanacak çubuk kadar olmalıdır, fazla diş açılmamalıdır.



Şekil 3. 21 Küresel düğüm elemanları ve boyutları (Soykan, 2007)

3.3.3 Mesnetler

Uzay kafes sistemlerinde mesnetler, ana taşıyıcı elemanlarla bağlantı kurarak sistemin yüklerini taşıyan önemli elemanlardır. Bu elemanlar sayesinde kafes sistemi yüzeyine gelen yükler güvenle aktarılır. Mesnetler, doğrudan zemine veya diğer taşıyıcı elemanlara bağlanarak farklı yapısal konfigürasyonlar sağlayabilir. Ayrıca, mesnetlerin sabit, doğrusal hareketli veya radyal hareketli olarak kullanılması mümkündür. Bu çeşitlilik, mesnetlerin farklı yapısal ihtiyaçlara uygun şekilde tasarlanabilmesine olanak tanır.



1- Uzay Kafes Sistem düğüm Küresi, **2-** Uzay Sistem Çubuk elemanı, **3-** Somun, **4-** Mesnet tutucu levha, **5-** Betonarme kolon, **6-** Ankraj plakası, **7-** Taşıyıcı levha, **8-** Konik, **9-** Teflon, **10-** Ankraj çubuğu.

Şekil 3. 22 Mesnet küresi detayları (Soykan, 2007)

3.3.4 Temeller

Sistemin zemine oturan bölümüdür ve sistemdeki tüm yükü mesnet aracılığı ile zemine aktarmaktadır. Temel boyutu; kafes sisteminin tipine ve aldığı yüke göre farklı şekil ve boyutlarda tasarlanabilmektedir. Sistem doğrudan zemin üzerine oturacaksa mesnetler zemin üzerine ankraj edilerek bağlanır.

3.3.5 Örtü gereçleri

Uzay sistemlerinin montajı tamamlandıktan sonra en son kurulan ve sistemi üstten kapatan elemanlardır. Bu elemanlar farklı şekil ve özelliklerde olabilir. Örtü sistemlerden istenen ortak özellik; yapının zati yükünü arttırmamak için hafif olması ve örtü elemanları doğrudan hava koşulları ile temasta olduğu için hava koşullarına karşı dirençli olmalıdır. Ayrıca ısı ve ses yalıtımı sağlayabilmelidir.

Rüzgâr ve kar gibi yükler doğrudan kaplamaya etki edeceği için örtü sistemleri yük aktarma görevi görürler ve taşıyıcı sistemi destekler.

3.3.6 Yardımcı elemanlar

Uzay sistemi, tasarım ve kullanım ihtiyaçlarına göre çeşitli ek elemanların kullanılmasını gerektirebilir. Bu ek elemanlar, birleşim yerleri veya malzeme özelliklerine bağlı olarak farklı şekillerde tasarlanabilir. Örneğin, havalandırma sistemleri, yangın koruma sistemleri, ses sistemleri aydınlatma ve elektrik kanalları gibi yardımcı elemanlara ihtiyaç duyarlar. Kubbe tasarımı sistemin ihtiyacı için estetik görünüm ve görsel çekicilik açısından da özelleştirilebilirler.

3.4 Kubbesel Örtü Sistemlerin Yapısal Davranışı

Kubbesel sistemlerin yapısal davranışını inceleyen birçok kaynakta; yapısal malzeme ve kubbe geometrisi hakkında bilgi vermeden kubbenin davranışı ile ilgili tanımlama yapılmaktadır ancak kubbesel sistemlerin davranışı hem malzemeye hem de kubbenin geometrisine bağlı olarak değişmektedir. (Savaşır, 2016)

20.yy kadar inşa edilen kubbesel sistemlerde kullanılan malzemeler taş, tuğla ve ahşap gibi malzemelerdi ancak sanayi devrimi neticesiyle çelik endüstrisinin hızlıca gelişmesiyle birlikte daha geniş açıklıklı yapı sistemleri üzerine tasarımlar yapılmış ve kubbesel sistemler ile büyük açıklıklı örtü sistemleri sağlanmıştır. Malzeme sınıfına göre kubbe tasarımında da farklılıklar oldu. Farklı tasarım ve malzemeler kubbe sistemin yapısal davranışında temel rol oynadığı için yapısal davranışlar sistem tasarımı ve yapısal malzemeye göre değerlendirilmelidir. Her sistemin yapısal davranışı malzeme özelliği ve tasarımına göre farklılık göstermektedir. Malzeme ve sistemine göre kubbeler başlıca 7 gurupta incelenebilir.

3.4.1 Yığma kubbeler

Bu kubbelerde kullanılan taş ve tuğla gibi kâgir malzemelerin mukavemet davranışı büyük oranda basınca karşı dirençlidir bu sebeple bu tip kubbelerin etek kısımlarında oluşacak çekme kuvvetleri statik açıdan problem yaratmaktadır ancak bu tip kubbeler için yanal dikme payanda, yarım kubbeler veya uçan payandalar ile bu problem çözülebilmektedir.



Şekil 3. 23 (a) Ayasofya cami, İstanbul, Türkiye (b) Notre dame katedrali, Paris, Fransa

3.4.2 Kabuk kubbeler

Ülkemizde inşa edilen cami mimarilerinde bulunan kubbelerin büyük çoğunluğu bu tip kubbelere örnek verilebilir. İlk kubbe örneklerinden olan Roma'da bulunan Panteon tapınağı da kâgir malzemeler ve Roma harcı ile yapılmış ve farklı statik düzenlemeler uygulanmıştır. Panteon bu tip kubbelerin en iyi örneklerindendir.

Günümüzde kabuk kubbeler betonarmeden yapılmaktadır. Yük dağılımı yığma kubbelerde olduğu gibi üst bölgede basınç ve alt bölgede çekme oluşmaktadır, alt bölgede oluşan çekme kuvvetleri çelik donatılar ile desteklenmektedir.



Şekil 3. 24 Panteon, tapınağı, Roma, İtalya

3.4.3 Kemer taşıyıcılı kubbeler

Bu tip kubbelerde diğer kaburgalı kubbeler gibi merkezde birleşen basınç çemberi bulunmaz. Kubbe kemerleri birbirine paralel olarak tasarımı yapılır. Dünyanın en büyük açıklığa sahip kubbesi olan Oita stadyumu kemer taşıyıcılı kubbe sınıfındadır. Kubbe içinde kullanılan tüm kemerlerin yapısal davranışı köprü kemerleri ile aynıdır. En tepeden, kemer boyunca aldıkları yükleri sıralı bir şekilde mesnetten temele iletirler.



Şekil 3. 25 Oita stadyumu, Oita, Japonya

3.4.4 Kaburgalı kubbeler

Bu sistem için kaburga ve kaburga dilimlerinden oluşan iki ayrı elemandan oluşmaktadır. Kaburga dilimlerinden yüklenen yük, kaburgalar aracılığı ile çemberin eteğinden yükü aktarır. Bu yapı sistemi, ilk ve en büyük örneklerinden biri olan Floransa Katedrali'nin kâgir malzemelerle yapılmış kaburgalı kubbesi gibi birçok tarihi yapıda kullanılmıştır. Kaburgalı kubbeler, yüksek mukavemet gerektiren alanlarda kullanılabilir ve yapısal dayanıklılık için mükemmel bir seçenek olabilir. Ayrıca bu yapı sistemi, mimari açıdan çeşitli tasarım olanakları sunar.



Şekil 3. 26 Floransa katedrali, Floransa, İtalya

3.4.5 Çubuk ağı kubbeler

Kubbe yüzeyini; çubuk ağları ve düğüm noktaları ile farklı geometrik formlara ayırarak oluşturulan kubbe tipidir. Nervürlü, schwedler, lamella, jeodezik, üç doğrultulu sistemler bu kubbelere örnek olarak gösterilebilir. Bu tip kubbelerde de tepe noktada basınç etek bölümlerinde ise çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Kubbe içinde oluşan gerilmeler çubuk ağları üzerinden zemine eşit bir şekilde dağıtılır.

3.4.6 Kablo sistemli kubbeler

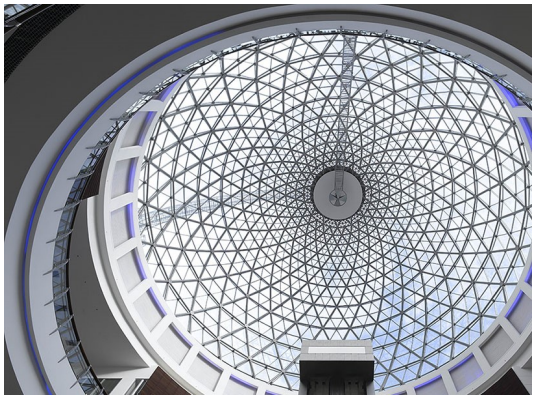
Sadece çekme gerilmesine direnç gösteren çelik kablolar ile destek sağlanmış sistemlerdir. Kablolar çift tabakalı veya tek tabakalı olan kubbe sistemlerine bağlanarak kubbe üzerinden aldığı yükü düşey taşıyıcı sistemlerine aktarmaktadır. Böylece kubbe sistemleri çelik kablolar ile desteklenmiştir.

3.4.7 Pnömatik kubbeler

Membran örtü sisteminin iç tarafına basınçlı hava sağlayarak membran yüzeyinde gerilme yaratarak sistemi ayakta tutan sistemlerdir. Bu sistemdeki membran sadece çekme gerilmesine direnç göstermektedir. Bu sistemlerde membran hava basıncının sınır değerinin korunması için hava basınçlı kubbelerin üst yüzeyi kablolar yardımı ile desteklenir.

3.5 Türkiye'de Kubbesel Uzay Kafes Örnekleri

Kubbesel çelik kafesler uygulama ve kullanımında sağladığı avantajlar dolayısıyla ülkemizde birçok farklı amaçlar ile farklı alanlarda kullanılmaktadır. Aşağıda ülkemizde uygulaması yapılmış kubbesel çelik kafes örnekleri verilmiştir. Bu örneklerde kubbe açıklıkları ve yükseklikleri farklılık göstermektedir.




Şekil 3. 27 Panora alışveriş merkezi, Ankara, Türkiye




Şekil 3. 28 Su kuşları hayvanat bahçesi, Bursa, Türkiye



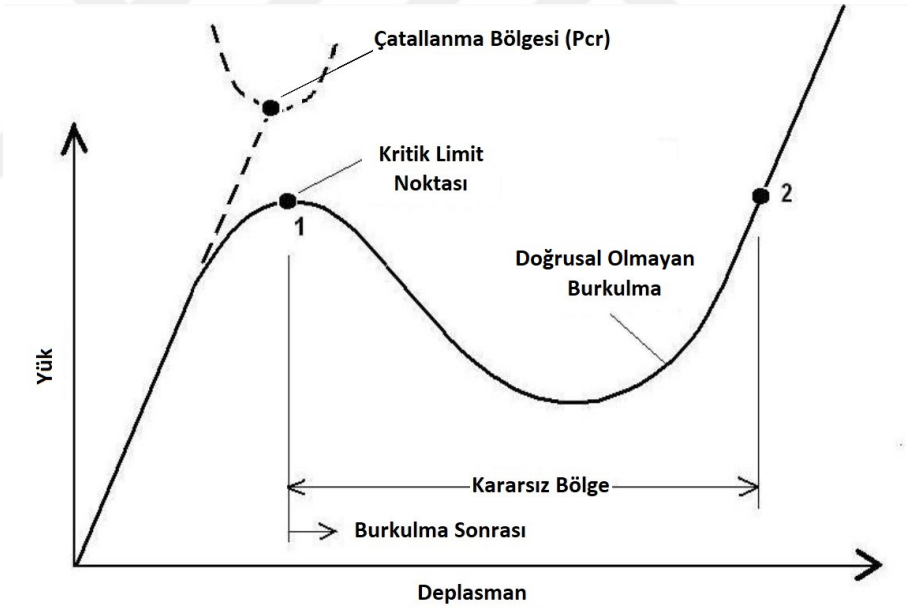

Şekil 3. 29 Şanlıurfa şehirlerarası otobüs terminali, Şanlıurfa, Türkiye (Baskı, 2023)




Şekil 3. 30 Akçansa çimento stok holü, Çanakkale, Türkiye

3.6 Çelik Kubbe Sistemlerinin Stabilitesi

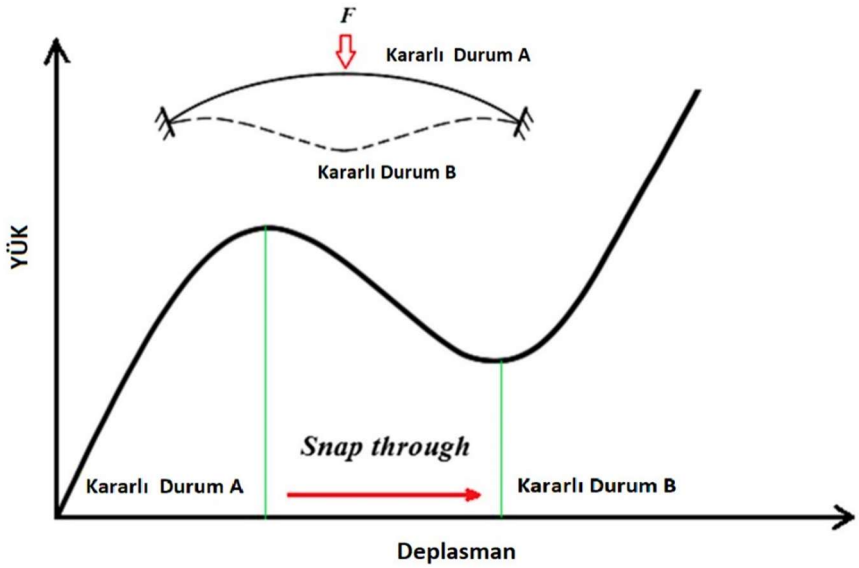
Kafesli yapılarda göçme güvenliği için önemli olan burkulma davranışı, tasarım aşamasında kritik burkulma yükü olarak dikkate alınmalıdır. Burkulma genellikle aşırı yükleme sonucu çubuk veya bağlantı elemanlarının doğrusal olmamasından dolayı oluşan kararsızlık durumudur. Bu davranış sistemine düzlem içi bir basınç kuvveti neden olmaktadır. Bu davranış malzemenin mukavemetinden ziyade yetersiz stabilite nedeniyle oluşur. Bu yüzden sistem her ne kadar yük altında statik açıdan sağlam olsa da burkulma analizi muhakkak yapılmalı ve kritik yük etkisi varsa eleman ya da kafes stabilitesi arttırılmalıdır. Burkulmanın önüne geçmek için sıklıkla kafes yüksekliği ya da malzeme atalet momentini arttıracak tasarımlar yapılmaktadır. Özellikle kafes sistemlerinde bir elemanda oluşan burkulma davranışı bölgesel hatta öngörülemeyen sistemsel göçmelere neden olabilmektedir. Bu davranış neticesinde eleman burkulmasının sistemsel mukavemet üzerinde büyük bir etkisi olduğu söylenebilir.



Şekil 3. 31 Doğrusal olmayan ve çatallanma burkulması davranış grafiği (Glenn, 2010)

Şekil 3.31'de görüldüğü üzere 1 noktasına kadar elastik davranış gösteren burkulma davranışı 1 noktasındaki kritik limit noktasına ulaştığında ani şekil değiştirme davranışı gösterecektir. Çatallaşma bölgesinde elemanın zayıf bölgesine doğru şekil değiştirecektir. Tam bu noktada kararsız kalan yapı elemanı deplasman yönüne doğru doğrusal olmayan burkulma eğrisini takip edecektir. Bu şekil değişimi çok hızlı ve ani gerçekleşebilmektedir. Kubbe ve tonoz gibi yüzey eğriliği olan yapı sistemlerinde

örtü sistemi tersine burkulup dönerek (snap-through) yapısını tamamen kaybedebilmektedir. Kubbe ve tonoz yapılarının yükseklik/açıklık oranlarının burkulmadan en az etkilenmesi için olabildiğince yüksek seçilmesi istenmektedir.



Şekil 3. 32 Tersine dönerek burkulma davranışı için yük-deplasman grafiği (Li ve Xu, 2017)

Kubbe sisteminin yapısal olarak burkulma davranışı incelendiğinde Şekil 3.32'de gösterildiği gibi bir davranış gösterecektir. Kararlı A noktasından Kararlı B nokta arası kritik bölümde, sistem kararsızdır. Bu bölgeye kadar enerji depolayan ve kritik yük sonrası gerinim enerjisi serbest kalan sistemde, grafikte görüldüğü gibi burkularak dönme olayı gerçekleşir ve bu şekil değişimi çok hızlı ve aniden oluşur.

Kafes sistemlerinde oluşan burkulma davranışında düğüm noktalarının serbestlik dereceleri de büyük oranda etkilidir. Düğüm noktalarında yeterli rijitlik sağlanamadığı ve elemanların eksenel gerilme dışındaki moment ve kesme kuvvetlerine uygun tasarlanmadığı durumlarda eleman burkulma davranışı gösterecek duruma gelebilmektedir.

Sistem üzerinde burkulma kararsızlıkları tasarım aşamasında mutlaka kontrol edilmelidir. Bu burkulma türleri; global burkulma, yerel burkulma ve eleman burkulmasıdır. Burkulma analizini incelediğimizde lineer (doğrusal) ve nonlineer (doğrusal olmayan) olarak ikiye ayrılmaktadır.

Lineer burkulma analizinde Şekil 3.31'degörüldüğü üzere doğrusal elastik yapıda burkulmanın teorik dayanımını yani çatallaşma noktasını tespit eder. Euler burkulma analizi ile örtüşen bir çözüm üretmektedir.

Doğrusal olmayan burkulma analizinde elemanın en kararsız hale geldiği nokta bulunur, bu yöntem ile kademeli yük artışı sağlayarak gerçeğe en yakın kritik yük tahkik etme yöntemidir. Bu yöntem ile burkulma sonrası stabilite kaybı ve sistem stabilitesi öğrenilebilir.

3.6.1 Eleman burkulması

Uzay kafes sistemlerinde sistemin etkilenmediği, sadece taşıyıcı elemanın etkilendiği burkulma davranışı eleman burkulması olarak adlandırılır. Bir eleman üzerinde oluşan burkulma davranışı geniş bir alana kararsızlığını yayabilir. Yapı geometrisini etkileyeceği için yapının bölgesel ya da bütünden burkulma kararsızlığı çok hassas hale gelebilmektedir. Bu hassas kararsızlık tek bir elemandan kaynaklanarak domino etkisi ifadesi ile tanımlanabilir. Burkulma boyu azaltılması ya da atalet moment arttırması ile kritik yüke maruz kalan eleman üzerindeki burkulma kararsızlığı önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Tabi tek bir elemandan yapıya etkiyen kararsızlığın; tasarım ve kesit dışında başka bir sebebi eksantrik yük iletimine neden olan birleşim eleman kusurlarıdır. Dolayısıyla teorik olarak ne kadar iyi olursa olsun uygulamanın özenli bir şekilde yapılması gerekmektedir.

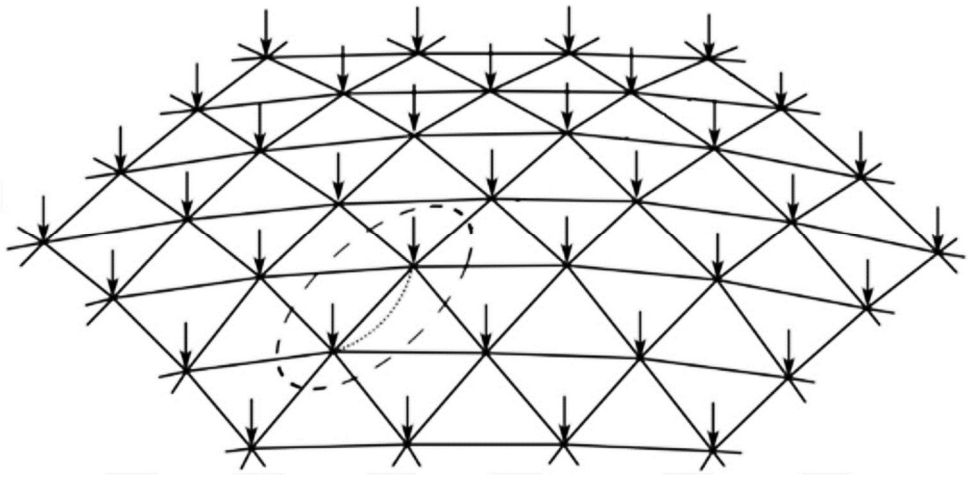
Eleman burkulmasına neden olan kritik yük tayini için Euler Burkulma teorisi dikkate alınıp eleman tasarımı yapılarak burkulma davranışı oluşumu engellenebilir. Euler burkulma teorisi denklem 3.1 eşitliğine göre çözümlenerek tayin edilmektedir.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \, E \, I}{(KL)^2} \qquad (3.1)$$

Burada;

"*E*" elastisite modülü, "L" etkili uzunluk, "*K*" burkulma boyu katsayısı, "*I*" atalet momentidir

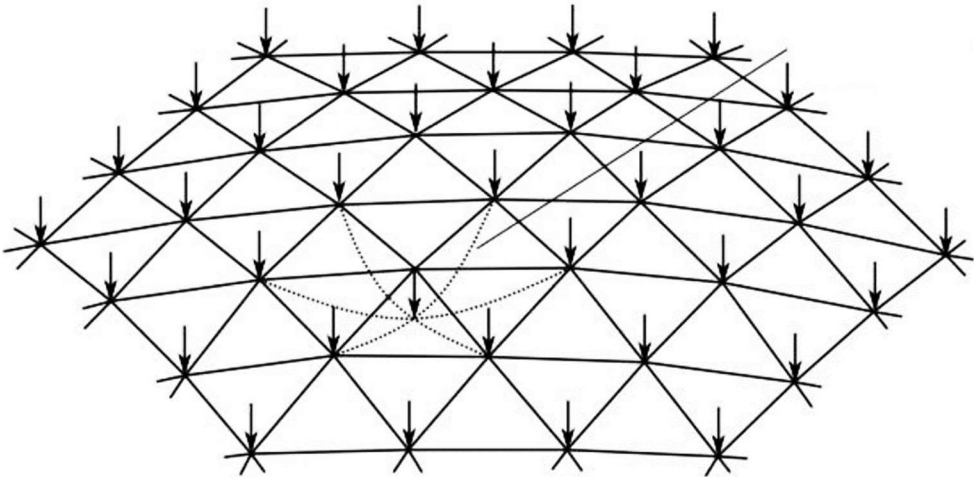
Tez kapsamında çözümlemesi yapılan kubbe model elemanlarının yük altındaki burkulma davranışı, yönetmelik şartları uygulanarak SAP2000 programı ile kontrol edilmiştir.



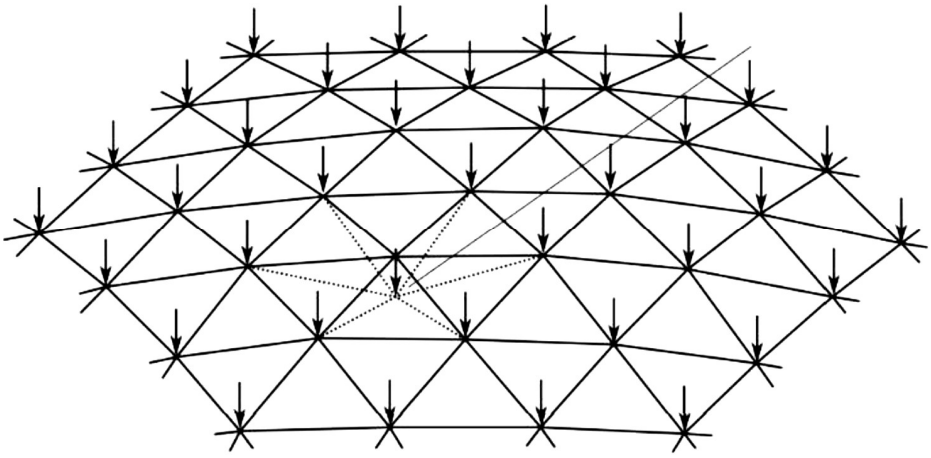
Şekil 3. 33 Burkulma davranışında eleman kararsızlığı (Gioncu, 1995)

3.6.2 Yerel burkulma

Yerel burkulma davranışı, özellikle tek katmanlı kubbe sistemlerinde daha sık görülen bir davranıştır. Bu tip burkulma genellikle düğüm noktalarından kaynaklanır ve sınırlı bir alanı etkiler. Kubbe sistemlerinde yer alan içten asılı aydınlatma ve havalandırma gibi elemanlar da bu davranışın oluşmasına neden olabilir. Bu elemanların kubbe düğümlerinde yarattığı yoğun tekil yük, burkulma davranışını tetikleyebilir. Yerel burkulma davranışı ayrıca, tersine dönerek burkulma (snap-through) olarak da sistemi tetikleyebilir. Bu durum, bölgesel olarak ya da sistemin tamamının tersine dönerek burkulması ile gerçekleşebilir. Tersine dönerek burkulma, sistemin stabilitesini etkileyebilir ve farklı gerilmelerin oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle, yapısal tasarım ve analiz sürecinde yerel burkulma davranışının öngörülmesi ve önlenmesi önemlidir.



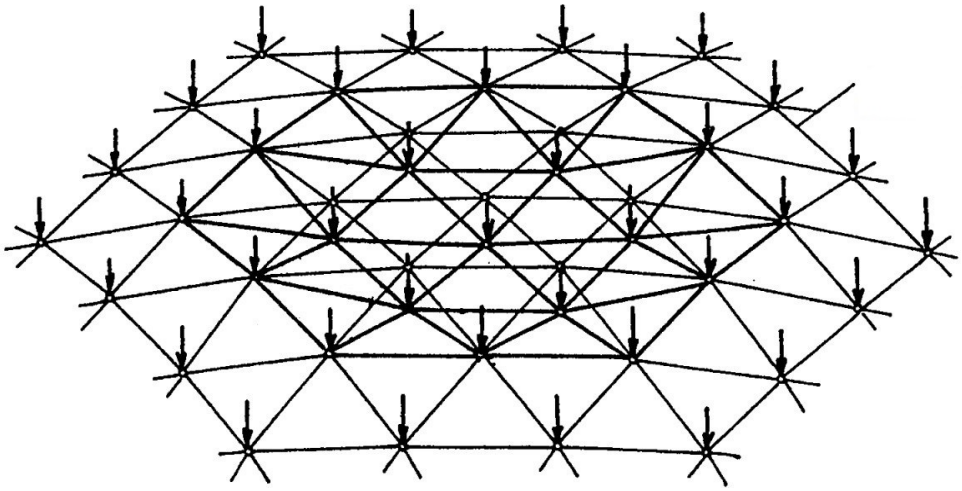
Şekil 3. 34 Yerel burkulmada eleman ve birleşim noktası Burkulması (Gioncu, 1995)



Şekil 3. 35 Tekli yükleme ile birleşim noktası burkulması (Gioncu, 1995)

3.6.3 Global burkulma

Global burkulma davranışı, bir yapının toptan göçmesine yol açabilecek ciddi bir kararsızlık durumudur. Özellikle çift eğrilikli sistemlerde, tek eğrilikli sistemlere göre daha yüksek bir global kararsızlık durumu görülür. Bu tip sistemlerin yük taşıma kapasiteleri daha yüksek olsa da, yapısal simetri bozulduğunda global burkulma davranışı artar. Bununla birlikte, birikmiş kar yükleri ve rüzgâr dış basınçları gibi simetrik yük dağılımları, bu davranışın ortaya çıkmasındaki en önemli etkenlerdendir. Yük dağılımı gibi dış etkenlerin yanı sıra, yapısal hatalar ve eksiklikler de global burkulma davranışını etkileyebilir. Örneğin, hatalı kaynaklar veya eğimli çelik elemanlar, yapısal simetrik bozukluklara neden olarak global burkulma davranışını artırabilir. Bu nedenle, yapısal tasarım ve analiz sürecinde, simetri ve diğer yapısal gerekliliklerin dikkatle ele alınması ve uygulanması büyük önem taşır.



Şekil 3. 36 Global burkulma kararsızlığı (Gioncu, 1995)

3.7 Kubbesel Uzay Kafes Tasarım ve Analizi

Tez kapsamında; model-1 olarak adlandırılan çift katmanlı ve model-2 olarak adlandırılan tek katmanlı iki farklı sistem modellenmiştir. Bu modellerin; yükseklik/açıklık oranları, kesitleri farklı olarak seçilmiştir. Uzay kafes sistemlerinin ticari veya akademik çalışmaları için yapılan analizlerde farklı bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Bu yazılımlarda hesap esasları ilgili yönetmeliklere göre düzenlenebilmektedir. Kullanılan yazılımların birçoğunda yapısal çözüm için sonlu eleman yöntemi kullanılmaktadır. Her kuruluş kendi yapısal analizleri için farklı bilgisayar yazılımı kullanmaktadır. Uzay kafes sistemlerinin çözümü için en çok tercih edilen bilgisayar yazılımlardan biri de SAP2000 programıdır. Tez kapsamında incelenen sistem modellerinin analizi ve tasarlanmasında SAP2000 programı tercih edilmiştir. SAP2000 programında yapısal analizler üç boyutlu olarak doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz ile birlikte yapısal elemanlara tasarım kolaylığı da sağlamaktadır. Bu yazılım ile birçok ülkenin standartları dahilinde çözümleri yapılarak boyutlandırılabilmektedir.

3.7.1 Türk standartlarına göre tasarım

Çelik yapıların tasarım ve hesap ilkeleri, Yük Ve Dayanım Katsayıları İle Tasarım (YDKT) ya da Güvenlik Katsayıları İle Tasarım (GKT) ilkelerinden biri ile tasarım gerçekleştirilir. YDKT ilkesinde, çelik yapıların taşıma gücüne yani yük ve dayanım çarpanlarına göre tasarım ilkesi izlenirken GKT ilkesinde çelik yapı tasarımında güvenlik gerilmelerine göre tasarım izlenmektedir. Tez kapsamında yapılacak çelik kubbe tasarımı için YDKT yöntemi tercih edilmiştir.

Yük kombinasyonlarında kullanılan karakteristik yükler şunlardır

G: Sabit Yük

Q: Hareketli Yük

S: Kar Yükü

W: Rüzgâr Yükü

E: Deprem Etkisi

YDKT ilkesine göre; denklem 3.2'de gösterildiği gibi tasarım katsayısı ile çarpılmış tasarım dayanımı, öngörülen yük veya yük bileşimleri doğrultusunda hesaplanan dayanım değerine eşit veya büyük olması ilkesine bağlıdır.

$$R_U \leq \Phi R_n \qquad (3.2)$$

Burada;

"R_U" YDKT kombinasyonları altında hesaplanan dayanım, "R_n" karakteristik dayanımı, "Φ" tasarım dayanımı katsayısıdır.

R_U dayanımı, Tablo 3.2'de verilen yük bileşimleri ile belirlenmektedir (Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, 2018).

Tablo 3. 2 ÇYTHYEDY'e göre YDKT yük kombinasyonları (ÇYTHYEDY, 2018)

YDKT Kombinasyonları	**Sistem Kombinasyonları**
1.4G	1.4G
1.2G+1.6Q+0.5S	1.2G +1.6Q + 0.5 S_{Tam} 1.2G +1.6Q + 0.5 $S_{Sağ}$ 1.2G +1.6Q + 0.5 S_{Sol}
1.2G+1.6S+0.8W	1.2G + 1.6 S_{Tam} + 0.8W_1 1.2G + 1.6 S_{Tam} + 0.8W_2 1.2G + 1.6 S_{Tam} + 0.8W_3 1.2G + 1.6 S_{Tam} + 0.8W_4 1.2G + 1.6 $S_{Sağ}$ + 0.8W_1 1.2G + 1.6 $S_{Sağ}$ + 0.8W_2 1.2G + 1.6 $S_{Sağ}$ + 0.8W_3 1.2G + 1.6 $S_{Sağ}$ + 0.8W_4 1.2G + 1.6 S_{Sol} + 0.8W_1 1.2G + 1.6 S_{Sol} + 0.8W_2 1.2G + 1.6 S_{Sol} + 0.8W_3 1.2G + 1.6 S_{Sol} + 0.8W_4
1.2G+Q+0.5S+1.6W	1.2G + Q + 0.5 S_{Tam} + 1.6W_1 1.2G + Q + 0.5 S_{Tam} + 1.6W_2 1.2G + Q + 0.5 S_{Tam} + 1.6W_3 1.2G + Q + 0.5 S_{Tam} + 1.6W_4 1.2G + Q + 0.5 $S_{Sağ}$ + 1.6W_1 1.2G + Q + 0.5 $S_{Sağ}$ + 1.6W_2 1.2G + Q + 0.5 $S_{Sağ}$ + 1.6W_3 1.2G + Q + 0.5 $S_{Sağ}$ + 1.6W_4 1.2G + Q + 0.5 S_{Sol} + 1.6W_1 1.2G + Q + 0.5 S_{Sol} + 1.6W_2 1.2G + Q + 0.5 S_{Sol} + 1.6W_3 1.2G + Q + 0.5 S_{Sol} + 1.6W_4
1.2G+Q+0.2S+ E	1.2G + Q + 0.2 S_{Tam} + E_X 1.2G + Q + 0.2 $S_{Sağ}$ + E_X 1.2G + Q + 0.2 S_{Sol} + E_X 1.2G + Q + 0.2 S_{Tam} + E_Y 1.2G + Q + 0.2 $S_{Sağ}$ + E_Y 1.2G + Q + 0.2 S_{Sol} + E_Y
0.9G+1.6W	0.9 G + 1.6W_1 0.9 G + 1.6W_2 0.9 G + 1.6W_3 0.9 G + 1.6W_4
0.9G+E	0.9G + E_X 0.9G + E_Y

Taşıyıcı elemanların deplasman kontrolü için Tablo 3.3'te belirtilen yük kombinasyonları altında çatı sistemlerinin düşey yer değiştirmeleri, sehimin açıklığa oranı 1/300 sınır değerini geçmeyecek şekilde tasarlanmalıdır. Yatay yer değiştirme durumuna göre de kaplamaların olumsuz etkilenmemesi için kaplama malzemesi sehim durumuna bağlı olarak değerlendirilmelidir.

Tablo 3. 3 ÇYTHYEDY'e göre sehim kontrollerinde kullanılacak yük kombinasyonları (ÇYTHYEDY, 2018)

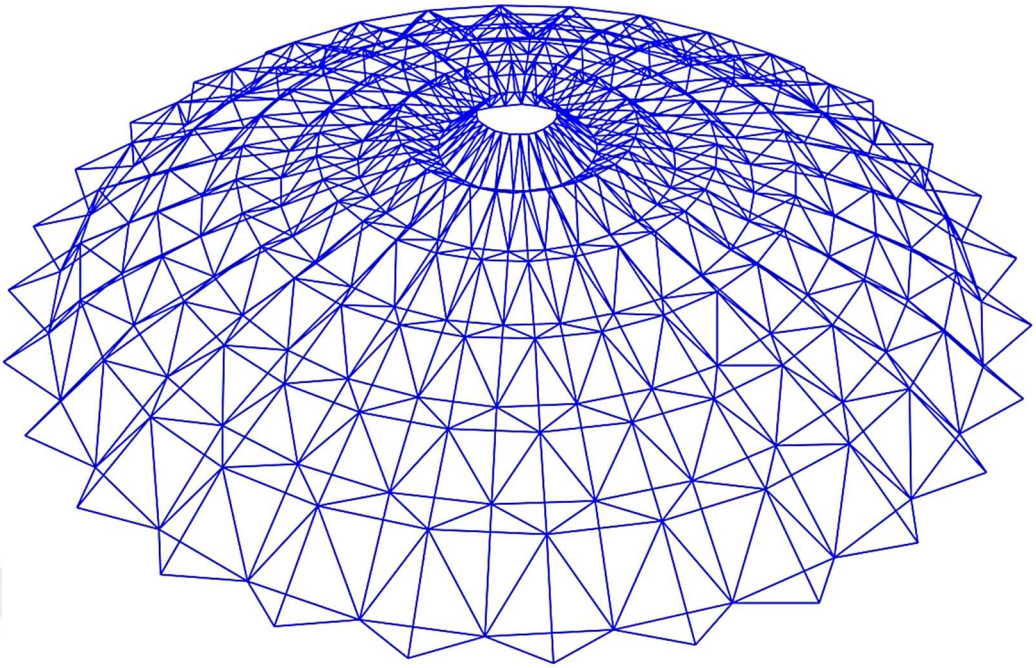
Kullanılabilirlik sınır durumu Kontrolünde kullanılacak yük bileşimleri	(1) G + Q (2) G + 0,5S_{Tam} (3) G + 0,5$S_{Sağ}$ (4) G + 0,5Q + W_1 (5) G + 0,5Q + W_2

3.8 Çift Katmanlı Kubbe Modeli Analizi

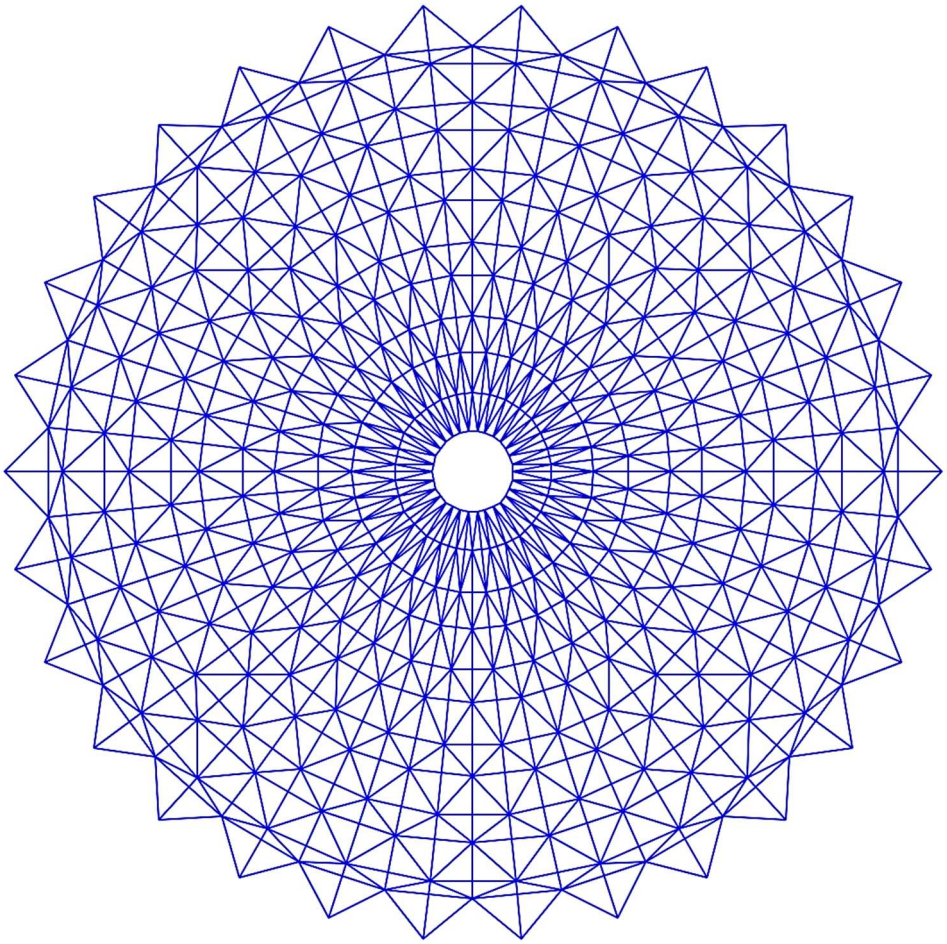
Çift katmanlı çelik kubbeler, iki ayrı kubbe katmanının birleştirilmesiyle oluşan yapılar olarak tanımlanabilir. Çift katmanlı çelik kubbelerin analizi, öncelikle kubbenin boyutları, geometrisi, malzeme özellikleri ve yükleme koşulları gibi girdi parametrelerinin tanımlanmasıyla başlar. İki katman arasındaki mesafe, malzeme kalınlığı ve çelik malzemenin özellikleri gibi faktörler, yapısal davranışı etkileyen önemli parametrelerdir. Çift katmanlı kubbelerin gerilme ve deformasyon analizi, her iki katmanın yük altında nasıl davrandığını, her iki katmanda oluşan gerilmeleri ve şekil değişimlerini hesaplar. Her iki katmanın etkileşimi de dikkate alınarak, gerilme ve deformasyon analizi yapılır. Çift katmanlı çelik kubbelerin yapısal davranışı, tek katmanlı kubbelerden daha karmaşıktır, ancak aynı zamanda daha yüksek dayanıklılığa ve rijitliğe sahiptirler. İki katmanın birleştirilmesi, yapısal yükün daha iyi dağılmasını sağlar ve yapıya daha fazla stabilite kazandırır.

3.8.1 Model-1 sistem bilgileri

Kubbe modeli; 1410 boru kesitli eleman, 390 moment aktarmayan (mafsallı) düğüm noktasından oluşan, çift katmanlı, açıklığı 26 metre, kubbe yüksekliği 4 metre, basınç halkasının çapı 2 metre çekme halkasının çapı 24 metreden oluşmaktadır. Kubbe 30 özdeş meridyen kafes sisteminden ve 7 paralel halkadan oluşmaktadır Kubbe modelinin perspektif ve plan görünümü Şekil 3.37 - 3.38 de gösterilmiştir. Model sistemlerinin uygulanacağı konum olarak Diyarbakır ilinde Dicle Üniversitesi arazisi seçilmiştir.



Şekil 3. 37 Model-1 perspektif görünüşü



Şekil 3. 38 Model-1 plan görünüşü

3.8.2 Model-1 malzeme ve kesit bilgileri

Model-1 kubbe elemanlarını oluşturan tüm çubuklar için S355 sınıfı çelik kullanılmıştır. Bu çelik sınıfının akma gerilmesi 355 MPa'dır (Tablo 3.4) . Sistemde kullanılan elemanlar boru profil elemanlarıdır. Bu elemanlar çekme ve basınç gibi eksenel yük etkileri altında kalmaktadır. Boru profillerin birleşim bölgeleri mafsallı (moment aktarmayan) olarak düzenlenmiştir. Model için oluşturulan kesit listesi Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3. 4 Sıcakta haddelenmiş yapısal çeliklerin karakteristik; akma (f_y) ve çekme gerilmesi (f_u) (ÇYTHYEDY, 2018)

Standart ve Çelik Sınıfı	Karakteristik Kalınlık, t (mm)			
	t ≤40mm		40mm< t ≤80mm	
	f_y [N/mm^2]	f_u [N/mm^2]	f_y [N/mm^2]	f_u [N/mm^2]
EN 10025-2				
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	470
S450	440	550	410	550

EN 1993-1-1 madde 3.2.6 göre çeliğin mukavemet özellikleri için aşağıdaki değerler alınmıştır;

- Elastisite modülü E=210 GPa
- Kayma modülü $G_V = E/2(1+\upsilon) \approx 81$ GPa
- Poisson oranı $\upsilon=0.3$
- Sıcaklık Katsayısı $\alpha=12x10^{-6}\ °K^{-1}$($T \leq 100$ °C için)
- Birim Ağırlığı $\rho=7850$ kg/m^3

Kubbe yüzeyinin kaplaması için lamine cam tercih edilmiştir. Gelişen malzemeler içinden biri olan cam, %80-98 arasındaki ışık geçirgenliğinden dolayı en fazla geçirgenliğe sahip malzeme özelliğini korumaktadır. Kubbe sistemleri geniş alanları örteceği için ve bu alanların aydınlatılmasında tasarruf yapmak için gün ışığından cam yardımı ile faydalanılacaktır. Yoğun güneş ışığı sonucu yüksek ısınmayı engellemek için güneş ışınımı kontrol camları tercih edilecektir. Bu camların yüzeyi yansıtıcı özellikli malzemeler ile kaplanarak güneşten ışınım ile gelen ısılar büyük oranda engellenmiş olacaktır.

Tablo 3. 5 Model-1 kesit listesi (BS EN 10210-2)

No	Profil	Çap (mm)	Et Kalınlığı (mm)	Ax10^2 (mm^2)
1	TUBO-D33.70x2.6	33,7	2,6	2,540
2	TUBO-D48.30x2.6	48,3	2,6	3,730
3	TUBO-D60.30x3.2	60,3	3,2	5,740
4	TUBO-D76.10x3.2	76,1	3,2	7,329
5	TUBO-D82.50x3.2	82,5	3,2	7,972
6	TUBO-D88.90x3.2	88,9	3,2	8,616
7	TUBO-D101.6x3.6	101,6	3,6	11,080
8	TUBO-D108.0x3.6	108,0	3,6	11,810
9	TUBO-D114.3x3.6	114,3	3,6	12,520
10	TUBO-D127.0x4.0	127,0	4,0	15,450
11	TUBO-D133.0x4.0	133,0	4,0	16,210
12	TUBO-D139.7x4.0	139,7	4,0	17,050
13	TUBO-D152.4x4.0	152,4	4,0	18,650
14	TUBO-D159.0x4.0	159,0	4,0	19,480
15	TUBO-D168.3x4.0	168,3	4,0	20,65
16	TUBO-D193.7x4.5	193,7	4,5	26,75

3.8.3 Model-1 hesap metodunda kullanılan yükler

Bu bölümde model-1 için; sabit, hareketli, kar, rüzgâr, deprem ve sıcaklık yükleri sayısal olarak hesaplanıp programa ataması yapıldı.

3.8.3.1 Sabit ve hareketli yük

Kubbesel kafesin profilleri, kaplama elemanları ve tesisat elemanları (havalandırma, aydınlatma vb. servis yükleri) yapıya etki eden sabit karakteristik yüklerdir. Bu yükler kubbeye yer çekim ivmesi yönünde etki etmektedir. Sisteme etki edecek kaplama cam yükünün hesabı için denklem 3.3 bağıntısı kullanılarak cam kalınlığına göre kütlesel yük hesaplanmıştır. Isı ile güçlendirilmiş, PVB (Polivinil Buteral) film kaplı lamine camın birim hacim ağırlığı ρ_{cam}=25 kN/m^3 olarak alınacaktır. Lamine Cam üç tabakadan oluşmaktadır. PVB film kalınlığı 1,52 ve çift katman 6+6 lamine cam kalınlığı ile birlikte 13,52~ 14 mm olarak alınır ve denklemdeki bağıntıya göre G_{Cam} = 0,35 kN/m^2 olarak hesaplanır. Ayrıca olası bir ilave yükü karşılaması için ek servis yükü G_{Servis}= 0,15 kN/m^2 olarak tanımlanmıştır. Kaplama ve servis yükleri ile birlikte sistem hesabında kullanılacak toplam sabit yük G_{Toplam}=0,5 kN/m^2 olarak belirlenmiştir.

$$G_{cam} = \rho_{cam} \times t \qquad (3.3)$$

Burada;
"ρ_{cam}" cam birim hacim ağırlığı, "t" cam birim kalınlığıdır.

Kubbesel çatılarda; kirlenen kaplamanın temizlenmesi, tesisat arızası sonrası onarım veya periyodik bakım kaynaklı kubbe üstünde yapılan çalışmalar sırasında olabilecek hareketli yük kaynakları bulunmaktadır. TS 498'e göre çatı için hareketli yük değeri 1,5 kN/m^2 olarak belirtilebilir Ancak tasarım aşamasında yapının rüzgâr ve kar gibi diğer yüklerle birlikte aynı anda etki etme durumu çok düşük bir olasılık olduğu için kar ve rüzgâr yükleri ile birlikte hareketli yük ele alınmamıştır.

3.8.3.2 Kar yükü

Yapı hesaplamalarında kullanılacak karakteristik yüklerin hesabı için TS 498 kullanılmaktadır. Birçok mühendis tarafından basitliği nedeniyle tercih edilen bu standart, kubbe gibi farklı geometrik yapıdaki sistemler için birçok noktada yetersiz kalmaktadır. Kar yükü de bunlardan biridir. Hesaplarda kullanılan ana yüklerden biri olan kar yükü hesabında; coğrafi konum ve rakım değerleri dikkate alınarak kar yükü hesaplanır. Çatının eğimine, mimarisine hatta sıcaklık ve rüzgâr gibi hava değişimi nedeniyle kar birikimlerinde oluşan asimetrik dağılımlar üniform yükleme oluşturmayacağı için asimetrik yüklerden kaynaklı gerilme dağılımları bu faktörlere bağlı olarak değişir. Asimetrik yükler, kubbesel sistemlerin mekanik tepkilerini olumsuz etkileyebilir. Bu yüzden kar yüklemelerinde kar dağılımlarını simetrik ve asimetrik olarak uygulamamız gerekecektir. Kubbesel çatılarda asimetrik kar yükü, burkulma için daha fazla risk oluşturmaktadır. Bu yüzden kritik yüklere göre, kar yükünün üniform olmayan dağılımı davranış üzerinde büyük etkisi olacaktır.

Modele etkiyen kar yükünün hesabı için TS EN 1991-1-3 standardına göre hesaplamalar yapılmıştır.

- Kar yükü hesaplanması için yapının kar bölge sınıfı ve rakımına ihtiyaç vardır. Yapının yapılacağı konumun kar bölge sınıfı II ve rakımı 680 m olduğu göz önüne alınarak Tablo 3.7'ye göre karakteristik zemin kar yükü *(S_K)* 0,75 kN/m^2 olarak alınabilir.
- Bu değer, Şekil 3.39' da belirtilen Diyarbakır ili meteorolojik istatistik tablosuna bakarak kontrol edilebilir. Diyarbakır merkez ilçeleri için en yüksek kar seviyesi 65 cm olarak ölçülmüştür. Tablo 3.6'dan alınan yığın birim hacim ağırlığına göre yerleşmiş kar için 2 kN/m^3 alınarak S_K = 1,3 kN/m^2 olarak hesaplanır.
- Örtü sistemlerinin tasarımında çatı kar yükü hesabı denklem 3.4'e göre yapılır.

$$S=\mu_i C_e C_t S_K \quad (3.4)$$

Burada;

"*S*" Çatı kar yükü değeri (kN/m2), "S_K" karakteristik zemin kar yükü, "μ_i" Kar yükü şekil katsayısı, "C_e" Yüzey Etkilenme Faktörü, "C_t" Isı katsayısı değeridir.

- Tablo 3.8' den C_e, C_t değerleri topografik bölge özelliğine göre belirlenir, topografik bölgeye göre C_e=1 ve cam kaplama kullanıldığı için C_t=1 olarak belirlenir.
- Tablo 3.9' dan ise kar yükü şekil katsayısı çatı şekline göre belirlenir. Model bilgilerine göre çatı şekline uygun olan silindirik çatılar için kar yükü hesaplanır. Çatı eğimi 0^o-30^o arası olduğu için μ_1=0,8 olarak kabul edilebilir. Bilinenler denklem 3.4'e göre çözümlenirse kaplama kar yükü S=1,04 kN/m^2 olarak hesaplanır.
- Kubbesel örtülü sistemler için kar yükü şekil katsayısı "μ_3" dikkate alınarak hesaplanmalıdır. Örtü sisteminin geometrisine en uygun olan silindirik çatı sistemleri dikkate alınarak Şekil 3.40 ve Şekil 3.41'e göre kar yükü şekil katsayıları belirlenir. Silindirik çatılarda kar perdeleri bulunmadığı durumlarda kullanılacak kar yükü şekil katsayısı, çatı eğimi olan β'ya bağlı olarak denklem 3.5 dikkate alınarak belirlenmelidir.
- μ_3 için yönetmeliğin tavsiye ettiği üst sınır değer Şekil 3.40'a göre 2,0'dır.

$$\begin{array}{lll} \beta>60^0 & \text{için} & \mu_3=0 \\ \beta\leq 60^0 & \text{için} & \mu_3=0{,}2+10\ h/b \end{array} \quad (3.5)$$

- Hesaplanan; birikmiş ve birikmemiş kar yüklerinin dağılımı Şekil 3.42'de gösterilmiştir. Ayrıca birikmiş kar yükleri, şekil katsayıları ile çarpılarak alternatif yükleme durumu elde edilmiştir.

Tablo 3. 6 Karın yığın durumuna göre ortalama birim hacim ağırlığı tablosu (TS EN 1991 1-3, 2009)

Kar tipi	**Birim hacim ağırlığı (kN/m^3)**
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

Tablo 3. 7 Karakteristik zemin kar yükü (S_K) değerleri kN/m^2 (TS EN 1991 1-3, 2009)

		1	2	3	4
1	**Yapı yerinin denizden yüksekliği**	**BÖLGELER**			
	m	I	II	III	IV
	≤ 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					

Tablo 3. 8 Farklı topografik alanlar için tavsiye edilen Ce değerleri (TS EN 1991 1-3, 2009)

Topografik Bölge	**C_e**
Rüzgâra Açık [1]	0,8
Normal [2]	1,0
Korunmuş [3]	1,2
1 Rüzgâra açık topografik alanlar: her coğrafi yönden etkiye maruz kalan, arazi tarafından korunma imkânını olmadığı veya az olduğu daha yüksek yapıların veya ağaçların bulunmadığı engelsiz düz alanlar 2 Normal topografik alanlar: rüzgârın yapı üzerine etkisiyle kar kütlesinin, arazi, diğer yapılar ve ağaçlar sebebiyle önemli bir değişime uğramadığı alanlar 3 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_t, yüksek sıcaklık iletiminden (>1 W/m^{2}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_t : 1,0 alınmalıdır.		

Tablo 3. 9 Kar yükü şekil katsayıları tablosu (TS EN 1991 1-3, 2009)

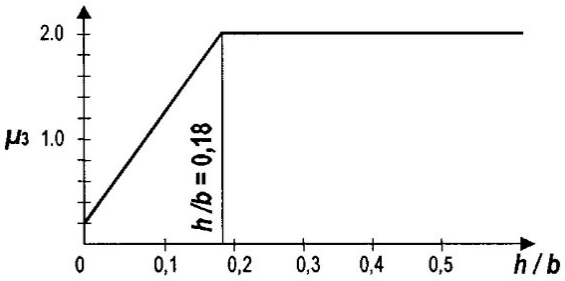
Çatı eğim açısı, α	**0° < α < 30°**	**30° < α < 60°**	**α ≥ 60°**
μ1	0,8	0,8 (60 – α) / 30	0
μ2	0,8 + 0,8 α / 30	1,6	-

DIYARBAKIR	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
	Ölçüm Periyodu (1929 - 2021)												
Ortalama Sıcaklık (°C)	1.8	3.7	8.3	13.8	19.3	26.1	31.0	30.5	25.1	17.5	9.7	4.0	15.9
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	6.7	9.2	14.5	20.4	26.7	33.6	38.4	38.2	33.3	25.4	16.3	9.2	22.7
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	-2.2	-1.0	2.5	7.0	11.3	16.6	21.7	21.1	16.0	10.1	4.2	-0.2	8.9
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	3.9	4.9	5.6	7.2	9.6	12.2	12.4	11.7	10.0	7.5	5.5	3.9	7.9
Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	6.67	3.33	3.33	3.00	4.00	1.67				1.00	3.33	6.33	NaN
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	70.6	67.6	66.8	69.1	44.3	8.7	1.3	1.0	5.4	32.8	55.1	72.2	494.9
	Ölçüm Periyodu (1929 - 2021)												
En Yüksek Sıcaklık (°C)	16.9	21.8	28.3	35.3	39.8	42.0	46.2	45.9	42.0	35.7	28.4	22.5	46.2
En Düşük Sıcaklık (°C)	-24.2	-21.0	-14.0	-6.1	0.8	1.8	9.9	11.4	0.0	-1.8	-12.9	-23.4	-24.2

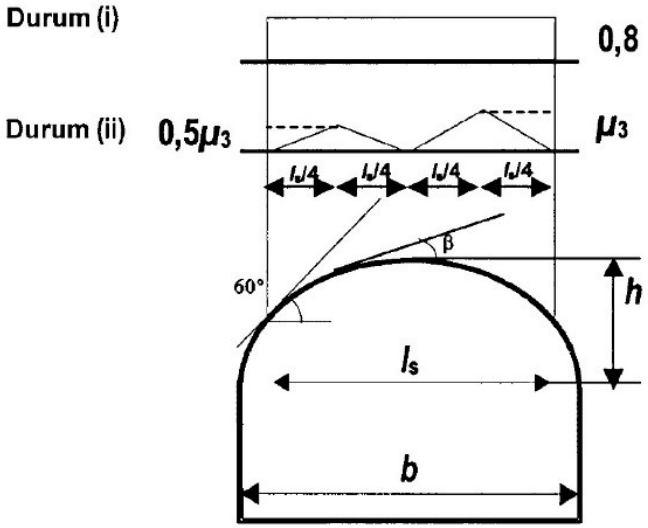
En yüksek ve en düşük sıcaklıkların gerçekleşme tarihini görmek için fare imlecini değerlerin üstüne getiriniz.

Günlük Toplam En Yüksek Yağış Miktarı		Günlük En Hızlı Rüzgar		En Yüksek Kar	
20.03.1976	**71.6 mm**	01.06.1987	**35.0 m/sn**	16.01.1973	**65 cm**

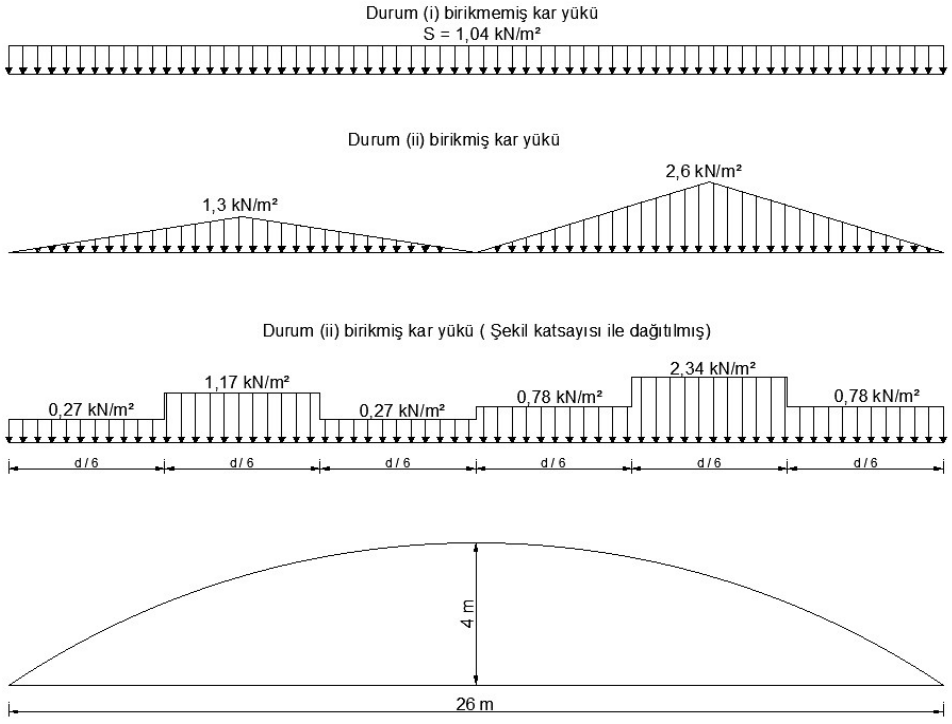
Şekil 3. 39 Diyarbakır ili meteorolojik istatistik tablosu (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2022)



Şekil 3. 40 Farklı yükseklik/açıklık oranlarına sahip silindirik çatılar için tavsiye edilen kar yükü şekil katsayıları (β ≤ 60°) (TS EN 1991 1-3, 2009)



Şekil 3. 41 Silindirik çatılar için kar yükü şekil katsayıları (TS EN 1991 1-3, 2009)



Şekil 3. 42 Model-1 için durum (i) birikmemiş kar yükü ve durum (ii) birikmiş kar yükü dağılımı

3.8.3.3 Rüzgâr Yükü

Yapısal tasarım hesaplamalarında Rüzgâr yükleri birçok değişkene bağlı olarak hesaplanan karakteristik bir yüktür. Söz konusu çift eğrilikli küresel sistemler olunca bu değişkenler çok daha fazla olmakta ve hesap karmaşıklığı oluşmaktadır. Rüzgâr dağılımı hesaplamalarında ön hesap olarak rüzgâr dağılım formülleri kullanılmalıdır nihai hesaplamalarda ise rüzgâr tüneli testlerine dayalı hesaplamalar yapılması tavsiye edilmektedir. Literatürde bunun için rüzgâr tüneli testlerine dayanan birçok hesap yöntemleri ve tavsiyeler bulunmaktadır. Literatürlerdeki bu çıkarımlardan en önemlisi kubbesel sistemlere etkiyen rüzgâr yüklerinin, kubbe yükseklik/açıklık oranına bağlı olarak değiştiği ve birbirleri arasında az mesafe bulunan yapıların bu dağılımı önemli ölçüde değiştirdiği belirtilmiştir. Kubbesel sistemlerin yapı açıklıkları, tesisat açıklıkları yüzey şekli ve koşulları rüzgârın akış durumunu ve basınç dağılımını etkileyen diğer unsurlardır. (Şafak, 2012)

Rüzgâr tüneli ile gerçek gerilmelerin yakalanması da oldukça güç olmaktadır çünkü prototip ile gerçek yapı arasında birleşim rijitliği, tünelde oluşan rüzgâr profili ve türbülans değerlerinin gerçek ile olan ilişkilerini orantılı tutmak çok zordur. Ayrıca reynold sayısına bağlı olarak akışkan viskozitesinden kaynaklı oluşan sınır tabakası uyumu, kubbe yüzeyinde emme ve basınç katsayılarını etkilemektedir.

Rüzgâr etkilerinin hesaplamasında TS EN 1991-1-4 standardında bulunan değişkenler kullanılır. Ortalama rüzgâr hızı; iklim etkilerine ve yapının yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir. Dairesel kesitli yapıların rüzgâr yükü hesabı dikdörtgen kesitli yapılara göre tek farkı C_p basınç katsayısındaki hesabındaki farklılıktır.

- Ortalama rüzgâr hızı V_m denklem 3.6 eşitliğinden bulunur.

$$V_m(z)=C_r(z)\, C_o\, V_b \qquad (3.6)$$

Burada;

"$C_r(z)$" Yapı yüksekliğine bağlı değişen engebelik katsayısı, "C_o" Orografi katsayısı, "V_b" Esas rüzgâr hızı değerleridir.

Ortalama rüzgâr hızının hesaplanması için bu değerlerin yönetmeliğin ilgili maddelerine göre hesaplanması gerekmektedir.

- Esas rüzgâr hızı değeri, denklem 3.7 eşitliğine göre hesaplanır. Yönetmelikte; doğrultu katsayısı C_{dir} ve mevsim katsayısı C_{season} için 1,0 değerini tavsiye edilmiştir. Şekil 3.39'da Diyarbakır ili meteorolojik istatistik tablosunda verilmiş olan en hızlı rüzgâr değeri V_{bo}= 35 m/sn olarak alınmıştır.

$$V_b = C_{dir}\ C_{season}\ V_{bo} \qquad (3.7)$$

$$V_b =(1,0)*(1,0)*(35) = 35 \text{ m/sn}$$

Burada;

"C_{dir}" doğrultu katsayısı, "C_{season}" mevsim katsayısı, "V_{bo}" temel esas rüzgâr hızı değerleridir.

- Engebelik faktörü $C_r(z)$ hesaplanması için denklem 3.8 eşitlikleri kullanılarak hesaplanır. Yapının uygulama arazisi için Tablo 3.12'den arazi tesir kategorisi II olarak seçilmiştir. Bu kategori; yükseklik değişimi, arazinin engebelik şartları, bitki örtüsü ve çevre binalarının etkilerine göre seçilen kategori guruplarıdır. Seçilen kategori gurubuna göre; engebelik uzunluğu Z_o=0,05 ve en düşük yükseklik Z_{min}=2 olarak seçilmiştir. Z_{max} değeri yönetmeliğin ilgili maddesindeki tavsiyeye göre 200 m olarak belirlenmiştir.

$$\begin{aligned} &(1)\quad C_r(z) = k_r \ln\left(\frac{Z}{Z_o}\right) && Z_{min} \le Z \le Z_{max} \\ &(2)\quad C_r(z) = C_r(Z_{min}) && Z \le Z_{min} \end{aligned} \qquad (3.8)$$

Burada;

"Z_o" engebelik uzunluğu, "Z_{max}" en büyük yükseklik, "Z_{min}" en küçük yükseklik, "k_r" arazi katsayısını göstermektedir.

Z_o değerine bağlı k_r değeri denklem 3.9'a göre hesaplanır

$$k_r = 0{,}19\left(\frac{Z_o}{Z_{o,II}}\right)^{0{,}07} \qquad (3.9)$$

$$k_r = 0{,}19\left(\frac{0{,}05}{0{,}05}\right)^{0{,}07} = 0{,}19$$

Engebelik faktörü $Cr\ (z)$ değeri denklem 3.8 'e göre durum 1 için hesaplanır.

$$C_r(z) = 0{,}19 \ln\left(\frac{4}{0{,}05}\right) = 0{,}832$$

- Orografi katsayısı, rüzgârın yaklaştığı yöndeki eğime bağlı olan ve ortalama rüzgâr hızını etkileyen katsayıdır. Denklem 3.10 eşitliklerine göre belirlenen orografi katsayısı için rüzgârın geldiği yöndeki eğim (Φ) 0,05 altında olduğu için C_o değeri 1 olarak belirlenmiştir.

$\Phi < 0{,}05$	için	$C_o = 1$	
$0{,}05 < \Phi < 0{,}3$	için	$C_o = 1 + 2s\Phi$	(3.10)
$\Phi > 0{,}3$	için	$C_o = 1 + 0{,}6s$	

Bu durumda hesaplanan değerlere göre Ortalama rüzgâr hızı;

$V_m(z) = (0{,}832)*(1{,}0)*(35{,}0) = 29{,}12$ m/s olarak hesaplanmıştır.

- Esas rüzgâr hızına bağlı olarak değişen rüzgâr basıncı q_b' nin hesabı denklem 3.11 ve tepe hızı kaynaklı rüzgâr basıncı $q_p(z)$ hesabı için denklem 3.12 kullanılır. Fırtına esnasında rakıma bağlı olarak değişen hava yoğunluğu ρ, yönetmelikte 1,25 kg/m^3 olarak alınması tavsiye edilmiştir. Yüksekliğin bir fonksiyonu olan ve arazi kategorisine bağlı olarak değişen $C_e(z)$ değeri Şekil 3.44'e göre 1,8 olarak bulunmuştur.

$$q_b = \frac{1}{2}\rho V_b^2 \qquad (3.11)$$

$$q_b = \frac{1}{2}(1{,}25)(35)^2 = 0{,}765 \text{ kN/m}^2$$

Tepe hız kaynaklı rüzgâr basıncı için denklem 3.12 aşağıdaki şekilde çözümlenir.

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \frac{1}{2} \rho V_m^2(z) = q_b C_e(z) \quad (3.12)$$

$$q_p(z) = 0{,}765 \times 1{,}8 = 1{,}377\ \mathrm{kN/m^2}$$

- Rüzgâr yükü yapıya dıştan etkimekte ve tamamen kapalı yapılarda dıştan basınç kuvveti yaratmaktadır ancak kapalı olmayan yapıların içine giren rüzgâr yapının içinde iç rüzgâr basıncı yaratmaktadır. Dış basınç, rüzgârın dış yüzeyde oluşturduğu basınç ve emme kuvvetleri olarak belirtilebilir. Rüzgâr dış basınç kuvveti denklem 3.13 bağıntısına göre hesaplanabilir. Kubbenin; ön, tepe ve arka noktalarında ki basınç farkı kubbe formundan kaynaklı değişmektedir. Basınç katsayısı C_{pe}, Şekil 3.45'te yapının geometrik formuna göre seçilmiştir. Seçilen basınç katsayısı ile birlikte bölgesel rüzgâr dış basıncı denklem 3.10 eşitliğine göre hesaplanmıştır. Bu kapsamda gerekli değerler Tablo 3.10'da belirtilmiştir.

$$w_e = q_p(z)\, C_{pe} \quad (3.13)$$

Tablo 3. 10 A, B ve C noktalarında dış basınç katsayısı (C_{pe}) ve dış basınç (W_e) değerleri

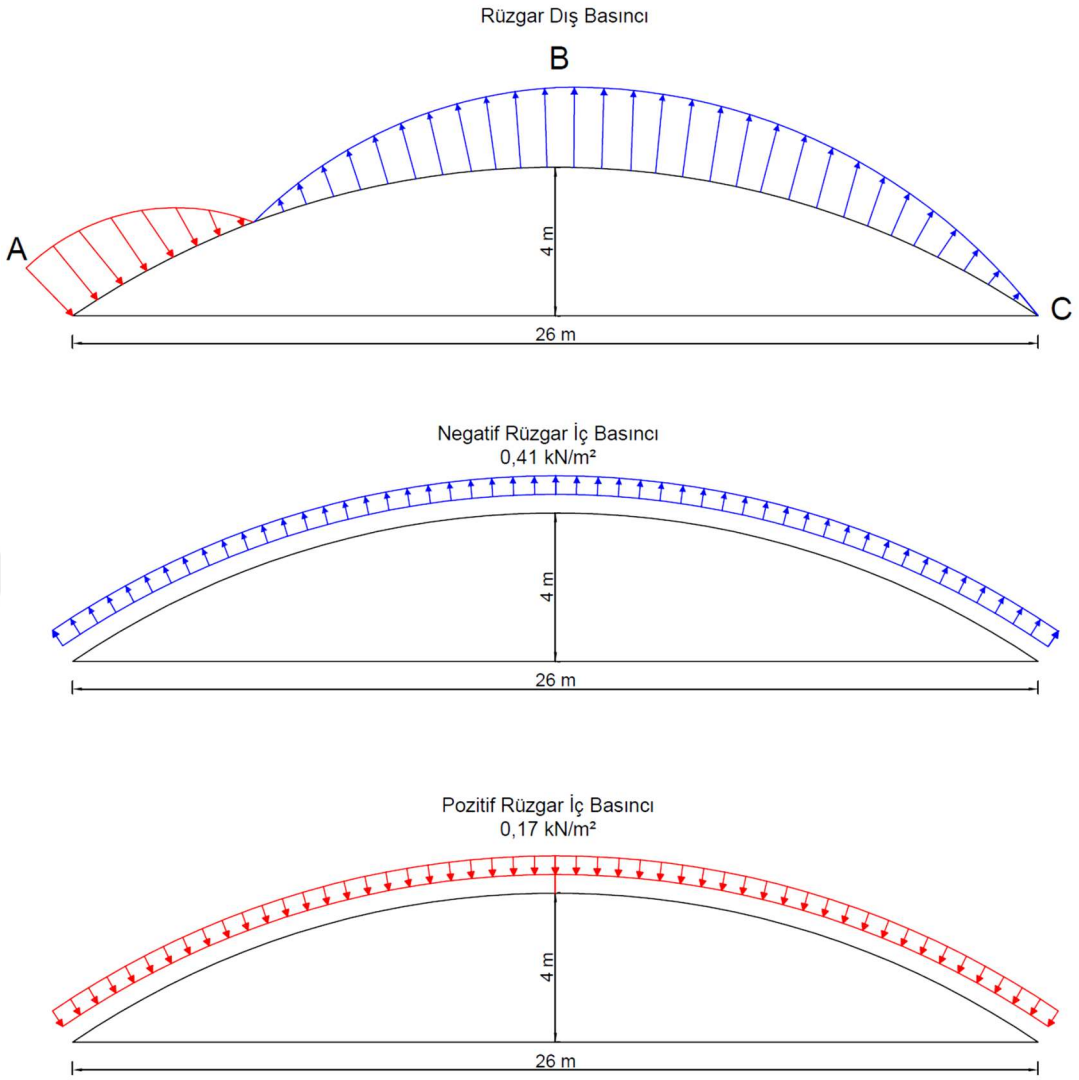
Nokta	A	B	C
C_{pe}	+ 0,27	- 0,47	0,00
W_e (kN/m^2)	0,37	- 0,65	0,00

- İç basınç; rüzgârın etkidiği cephe yüzeyindeki kapı, pencere ve baca gibi açıklıklardan dolayı rüzgâr akımının sızdığı ve örtü sisteminin iç bölümünde meydana getirdiği basınçtır. Bu basınç hesabı için iç basınç katsayısı kullanılmaktadır. Bu katsayı, hakim rüzgâr yönündeki boşlukların boyut ve sıklığına bağlı olarak değişmektedir. Yapı modelindeki boşluk oranı tahmin edilemeyeceği için bu durumda yönetmeliğin tavsiye ettiği basınç katsayısı (C_{pi}) değeri +0,2 iç ve -0,3 dış basınç katsayı değerleri en gayrı müsait durumu oluşturan değer olarak alınmıştır.

Tablo 3. 11 Model-1 için iç basınç katsayısı (C_{pi}) ve dış basınç (W_e) değerleri

Basınç Yönü	Pozitif iç basınç ($W_{İP}$)	Negatif iç basınç ($W_{İN}$)
C_{pi}	+ 0,2	- 0,3
$W_İ$ (kN/m^2)	0,17	- 0,41

Model-1 için hesaplanan rüzgâr yükleri Şekil 3.43'de gösterilmiştir



Şekil 3. 43 Model-1 için kubbe üzerindeki rüzgâr dağılımları

Yönetmeliğe göre iç ve dış basınç değerleri yapıya aynı anda etki edecek şekilde dikkate alınmalıdır. Tablo 3.2'de sistem için oluşturulan dört farklı rüzgâr yükü kombinasyonu bu şekildedir:

$W_1=W_{Ex}+W_{İP}$

$W_2=W_{Ex}+W_{İN}$

$W_3=W_{Ey}+W_{İP}$

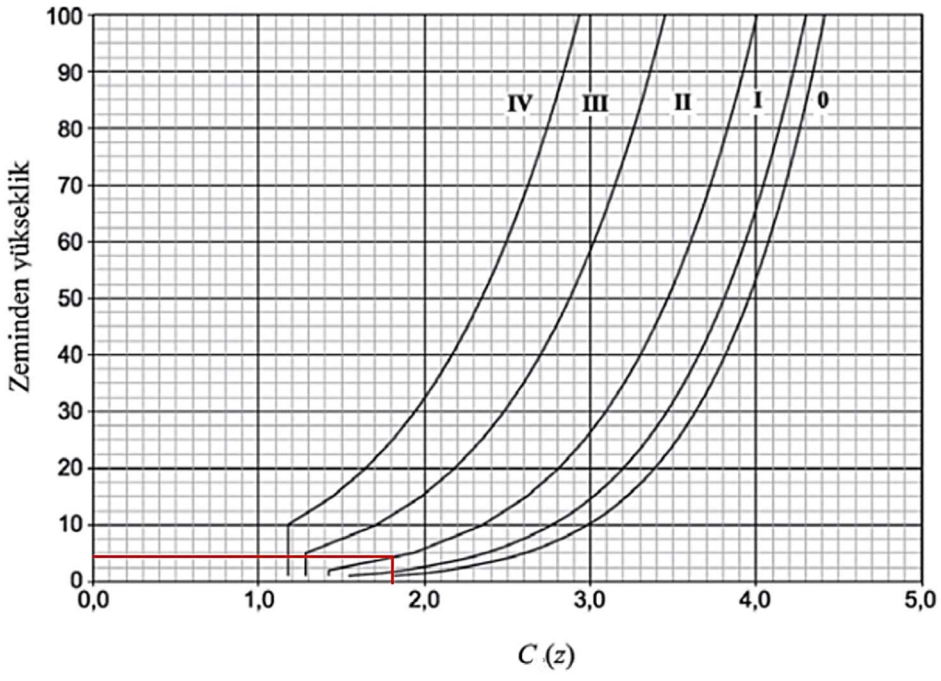
$W_4=W_{Ey}+W_{İN}$

Rüzgâr yükleri etki ettiği yüzeye dik bir şekilde tatbik edilmelidir ancak kubbe yüzeyleri çift eğrilikli formlarından dolayı her noktada yüzey açısı değişmektedir. Bu yüzden kubbe modellerine rüzgâr yüklerinin tanımlanması zorluklar yaratmaktadır. Rüzgâr etkilerini kubbe yüzeyine en doğru şekilde tatbik etmek için taşıyıcı

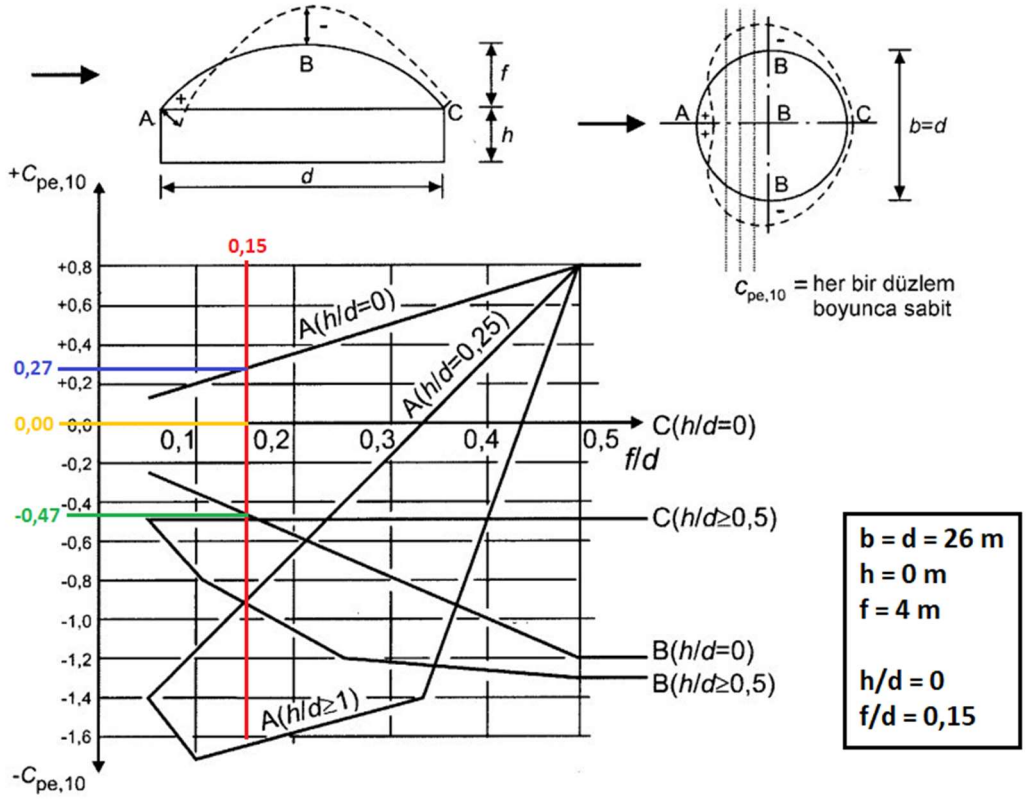
elemanlar arasında kalan trapez alanlara ağırlıksız kabuk elamanlar tanımlanmıştır. Bu kabuk elamanlar üzerine rüzgâr yükleri, yüzey basınç yükü şeklinde enterpolasyon yapılarak tanımlanmıştır, her kabuk dilimine etkiyen yük hesabı da iterasyon ile hesaplanıp yüzeylere tatbik edilmiştir.

Tablo 3. 12 Arazi kategorileri ve arazi parametreleri (TS EN 1991 1-4, 2005)

Arazi kategorisi		**Z_o (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 15m' yi aşan binalarla kaplı alan	1,0	10



Şekil 3. 44 Model-1 için $C_e(z)$maruz kalma katsayısının grafik gösterimi (TS EN 1991 1-4, 2005)



$c_{pe,10}$, dairelerin yayları, kürelerin kesişim noktaları ve rüzgâra dik düzlemler boyunca sabittir; ilk yaklaşım olarak, rüzgâra paralel daire yayları boyunca A,B ve C noktalarındaki değerler arasında doğrusal interpolasyon yapılarak hesaplanabilir. Aynı şekilde 0<h/d<1 ise A noktasındaki $c_{pe,10}$ değerleri ve 0<h/d<0,5 ise B ve C noktalarındaki $c_{pe,10}$ değerleri yukarıdaki şekilden doğrusal interpolasyon yapılarak elde edilebilir.

Şekil 3. 45 Model-1 için C_{pe},10 dış basınç katsayıları (TS EN 1991 1-4, 2005)

3.8.3.4 Deprem yükü

Uzay kafes sistemleri geniş açıklıklarına rağmen daha az ve daha hafif taşıyıcı eleman ile desteklenmektedir dolayısıyla diğer yapı sistemlerine göre daha hafiftir. Yapı yük hesabına dâhil edilen deprem yükü, sistemin toplam ağırlığı ile doğru orantılı olduğu için uzay kafes sistemleri diğer yapı sistemlerine göre daha az deprem yükü etkisi altında kalmaktadır. Yapı için Diyarbakır ili, Sur ilçesinde bulunan Dicle Üniversitesi arazisi tercih edilmiştir. Tercih edilen bölgenin coğrafi koordinatları enlem için 37.916919° ve boylam için 40.275335°'dir.

Deprem yükünün hesabında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY-2018) dikkate alınarak hesaplanmıştır. Standart detayında DD-2 olarak bahsi geçen 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi dikkate alınarak analiz yapılmıştır. Yerel zemin sınıfı; az ayrışmış, orta sağlam kayalar sınıfı olan ZB olarak kabul edilmiştir.

- Proje alanı için spektral ivme katsayıları, AFAD' da yer alan interaktif web haritası üzerinden boyutsuz olarak S_S = 0,305 ve S_1 = 0,129 bulunmuştur. (Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması, 2022)
- Yerel zemin sınıfı ve spektral ivme katsayısına bağlı olarak kısa periyot ile 1 sn periyotuna göre yerel zemin etki katsayı değerleri; F_S ve F_1 değerleri Tablo 3.13 ve Tablo 3.14 ile bulunur, ara değerler ise doğrusal enterpolasyon yardımı ile bulunabilir.
- Tasarım Spektral ivme katsayıları denklem 3.14'e göre S_{DS} = 0,305 × 0,9 = 0,275 ve S_{D1} = 0,129 × 0,8 = 0,103 olarak bulunmuştur.

$$S_{DS} = S_S \times F_S$$
$$S_{D1} = S_1 \times F_1 \qquad (3.14)$$

- Deprem yer hareketi için yatay elastik tasarım spektrumu grafiğinde düşey eksen $S_{ae}(T)$, yatay eksende bulunan T periyotlarına bağlı olarak denklem 3.15'e göre yerçekimi ivmesi türünden hesaplanır.

$$S_{ae}(T) = \left(0{,}4 + 0{,}6\ \frac{T}{T_A}\right) S_{DS} \qquad (0 \le T \le T_A)$$
$$S_{ae}(T) = S_{DS} \qquad (T_A \le T \le T_B)$$
$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}}{T} \qquad (T_B \le T \le T_L) \qquad (3.15)$$
$$S_{ae}(T) = \frac{S_{D1}\, T_L}{T^2} \qquad (T_L \le T)$$

Burada;

"*Sae(T)*" Yatay elastik tasarım spektral ivmeleri, "*T*" yapının Doğal titreşim periyodu, "T_L" yatay elastik sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu, "T_A ve "T_B" Yatay tasarım spektrumunun köşe periyotlarıdır.

Tablo 3. 13 Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018)

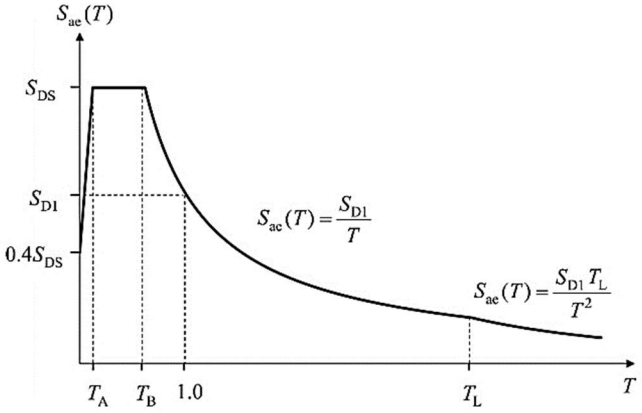
Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_S					
	$S_S \le 0.25$	**$S_S = 0.5$**	**$S_S = 0.75$**	**$S_S = 1$**	**$S_S = 1.25$**	**$S_S \ge 1.5$**
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır					

Tablo 3. 14 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayıları (TBDY, 2018)

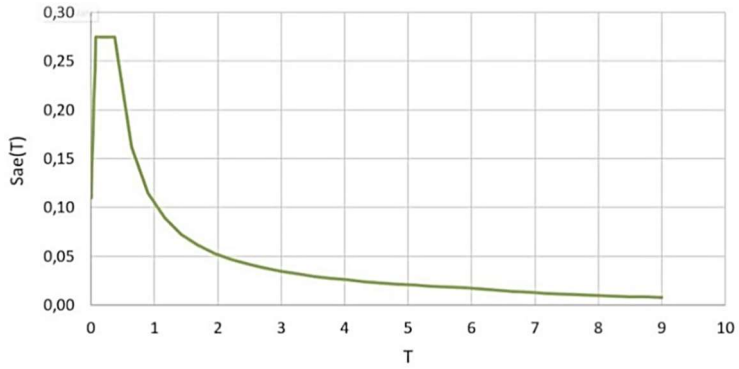
Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 \leq 0.10$	**$S_1 = 0.20$**	**$S_1 = 0.30$**	**$S_1 = 0.40$**	**$S_1 = 0.50$**	**$S_1 \geq 0.60$**
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır					

- Yatay elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu olan ve Şekil 3.46'da gösterilen T_A ve T_B denklem 3.16 ile tanımlanır. Serbest yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu T_L= 8 sn alınacaktır. Model-1 için tasarlanan yatay eksen tasarım spektrumu Şekil 3.47'de ki gibidir.

$$T_A = (0{,}2\ \frac{S_{D1}}{S_{DS}})$$
$$T_B = (\frac{S_{D1}}{S_{DS}}) \qquad (3.16)$$



Şekil 3. 46 Yatay elastik tasarım spektrumu (TBDY, 2018)



Şekil 3. 47 Yatay elastik tasarım spektrumu

- Deprem yer hareketi için Şekil 3.48'de gösterilen düşey elastik tasarım spektrumu grafiğinde düşey eksen $S_{aeD}(T)$, yatay eksende bulunan T periyotlarına bağlı olarak denklem 3.17'ye göre yerçekimi ivmesi türünden hesaplanır.

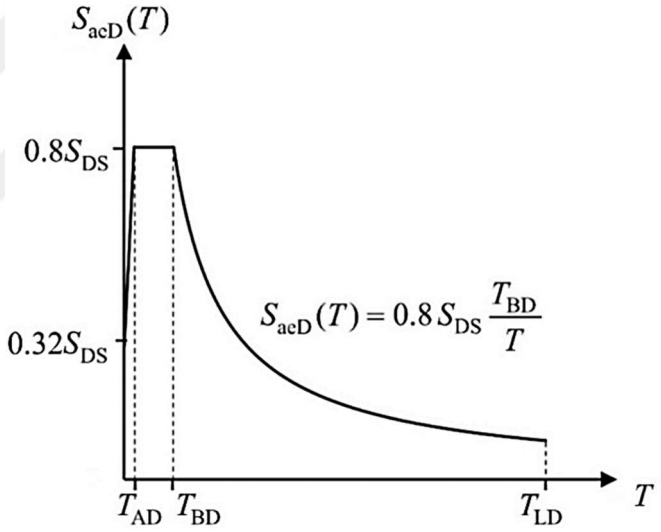
$$S_{aeD}(T) = \left(0{,}32 + 0{,}48\ \frac{T}{T_{AD}}\right) S_{DS} \qquad (0 \le T \le T_{AD})$$

$$S_{aeD}(T) = 0{,}8\, S_{DS} \qquad (T_{AD} \le T \le T_{BD}) \qquad (3.17)$$

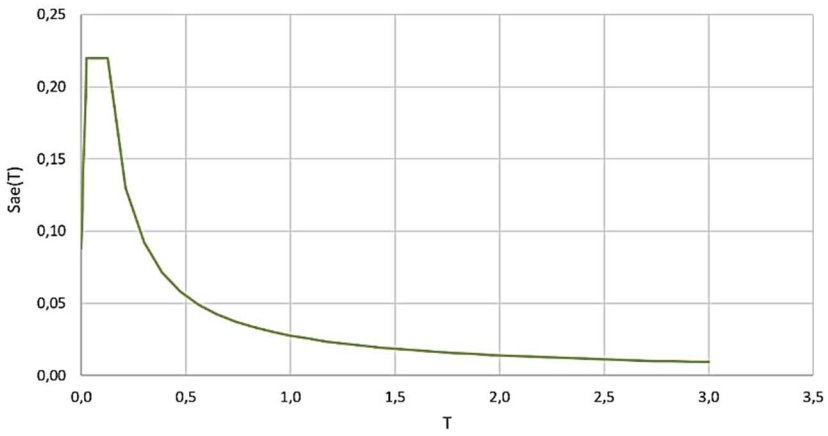
$$S_{aeD}(T) = 0{,}8\, S_{DS} \frac{T_{BD}}{T} \qquad (T_{BD} \le T \le T_{LD})$$

Burada;

"$S_{aeD}(T)$"düşey elastik tasarım spektral ivmeleri, "T_{LD}" düşey elastik sabit yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu, "T_{AD} ve T_{BD}" düşey tasarım spektrumunun köşe periyotlarıdır.



Şekil 3. 48 Düşey elastik tasarım spektrumu (TBDY, 2018)



Şekil 3. 49 Düşey elastik tasarım spektrumu

- Düşey elastik tasarım ivme spektrumu köşe periyodu T_A, T_B ve T_{LD} olan ve Şekil 3.48'de gösterilen periyotlar denklem 3.18 ile tanımlanır. Serbest yer değiştirme bölgesine geçiş periyodu T_L= 8 sn alınacaktır. Model için tasarlanan düşey eksen tasarım spektrumu Şekil 3.49'daki gibi oluşturulmuştur.

$$T_{AD} = (\frac{T_A}{3})$$
$$T_{BD} = (\frac{T_B}{3}) \quad (3.18)$$
$$T_{LD} = (\frac{T_L}{3})$$

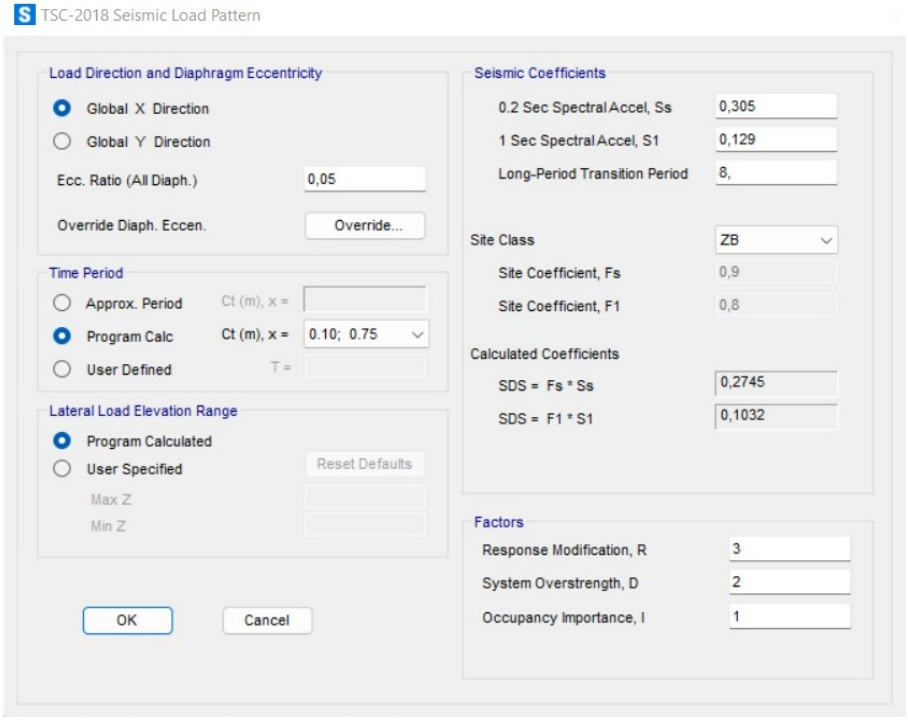
- TBDY-2018 yönetmeliğinden Tablo 3.1'den binanın kullanım amacına göre seçilen, bina kullanım sınıfı 3 gurubu için bina önem katsayısı 1.0 olarak belirlenmiştir (BKS=3, I=1.0).
- TBDY-2018 yönetmeliğinden Tablo 3.2'e göre DD-2 Deprem Yer Hareketi Düzeyinde Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı S_{DS}=0,275 için deprem tasarım sınıfı "4" olarak belirlenmiştir (DTS=4).
- TBDY-2018 yönetmeliğinden Tablo 3.3'e göre deprem tasarım sınıfı ve yapı yüksekliğine bağlı olarak bina yükseklik sınıfı "8" olarak belirlenmiştir (BYS=8).
- Süneklik düzeyi sınırlı çelik bina taşıyıcı sistemlerde dayanıma göre tasarım için TBDY-2018 yönetmeliğinden Tablo 4.1 C32'e göre taşıyıcı sistem davranış katsayısı "3" ve dayanım fazlalığı katsayısı "2" olarak belirlenmiştir (R=3, D=2)
- TBDY-2018 madde 4.4.3.2 gereğince DTS=4 olarak belirlenen bu yapı için binalarda düşey deprem etkisi olan $E_d^{(Z)}$ değeri denklem 3.16 eşitliğindeki gibi alınacak.

$$E_d^{(Z)} \approx (2/3)\, S_{DS} G \quad (3.19)$$

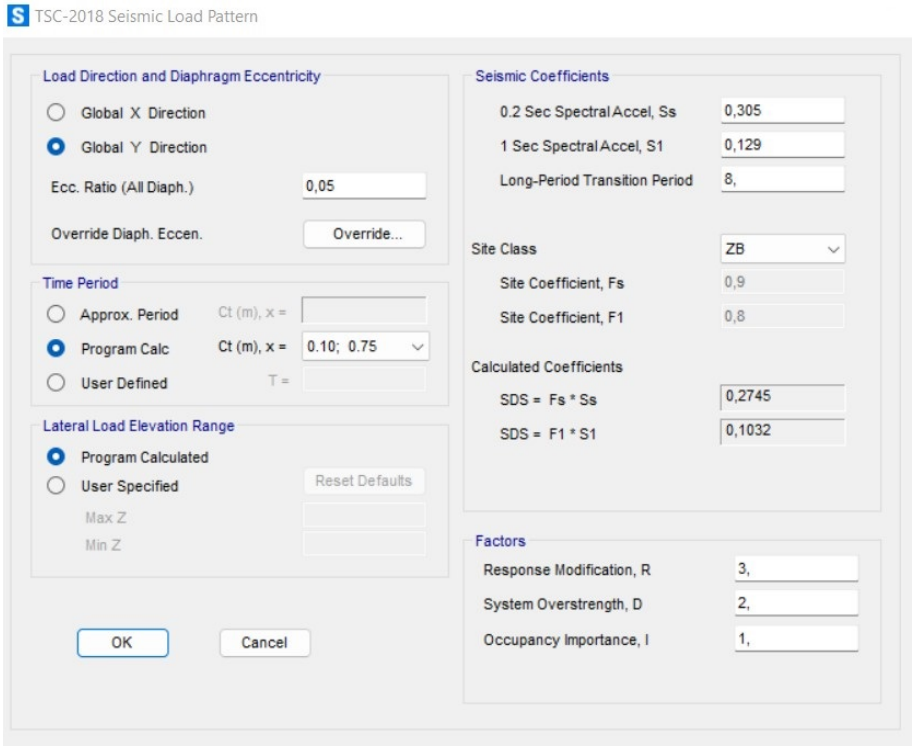
Burada;

"G" sabit yük etkisi, "S_{DS}" kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısını belirtmektedir.

- Tüm hesaplanan veriler, Şekil 3.41 ve Şekil 3.42'de görüldüğü gibi statik eşdeğer deprem yöntemi kullanılarak SAP2000 programına uygulanmıştır. Ayrıca, model için Mod Birleştirme yöntemi incelenerek yapıların davranışları daha detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.



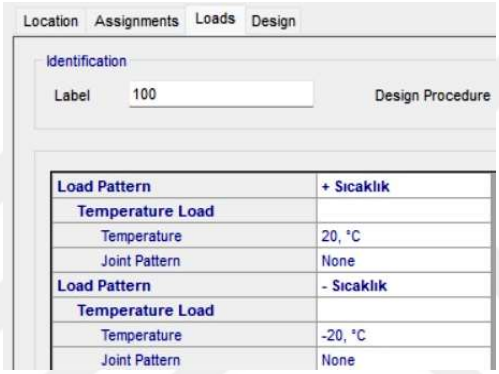
Şekil 3. 50 Eşdeğer deprem yükü yöntemine göre X yönünde yük parametrelerinin tanımlanması



Şekil 3. 51 Eşdeğer deprem yükü yöntemine göre Y yönünde yük parametrelerinin tanımlanması

3.8.3.5 Sıcaklık yükleri

Uzay kafes sistemleri farklı kompozit elemanlar ile yapılsa da günümüzde performans kaynaklı birçok sistemde çelik elemanlar tercih edilmektedir. Yapı taşıyıcı çelik elemanların sıcaklık değişimleri ile farklı genleşme ve büzülme yaratacaktır ve bu gerilmeler çubuk ve düğüm noktalarında farklı ve ek bir yük oluşturacaktır. Bu yüzden sıcaklık gerilmelerinin yarattığı karakteristik yükler sisteme tanımlanmıştır. Şekil 3.52'de Sıcaklık değerleri ± 20 ºC olarak elemanlara tanımlanmıştır. Sıcaklık etkisi, sistem yükünü kritik düzeyde artırmadığı için kombinasyonlara dâhil edilmemiştir ancak sistem davranışı ile ilgili bilgi vermesi için karakteristik olarak incelenmiştir.



Şekil 3. 52 Sıcaklık değişiminin elemanlara tatbik edilmesi

3.8.4 Model-1 analiz sonuçları

Model-1 sisteminin SAP2000 programıyla analizi ve tasarımı yapılmış. Elemanların tasarımında YDKT yük bileşimleri kullanılarak AISC 360-10 yönetmeliği kurallarına uygun olarak tasarımı yapılmıştır.

3.8.4.1 Model-1 için modal analiz sonuçları

Modal hesap yönteminde TBDY-2018 4.8.1.2 maddesine göre kullanılan titreşim mod sayısı Denklem 3.20'de de belirtildiği gibi hem X hem de Y hareket doğrultularında her bir model için hesaplanan taban kesme kuvveti, model etkin kütlelerinin toplamı, bina toplam kütlesinin %95'inden az olmamalıdır.

$$\sum_{n=1}^{YM} m_{txn}^{(x)} \geq 0{,}95\, m_t$$
$$\sum_{n=1}^{YM} m_{tyn}^{(x)} \geq 0{,}95\, m_t \qquad (3.20)$$

Yönetmeliğin bu tavsiyesi dikkate alınarak yeterli titreşim mod sayısı seçilmiştir.

Model-1 sistemlerinde, yönetmelik tavsiyesi doğrultusunda global 3 hareket doğrultusundaki kütle katılım miktarları Tablo 3.15'te de görüldüğü üzere %95'ten az olmayacak şekilde mod sayıları belirlenmiştir.

Tablo 3. 15 Model-1 için modal analizinde hesaba katılan kütle oranları

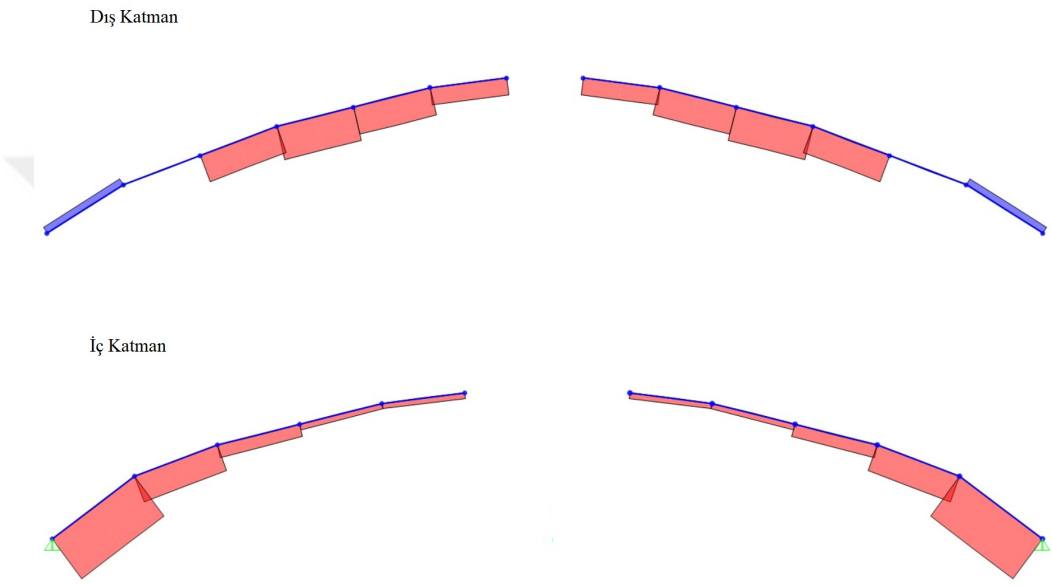
MOD	Periyod, sn	SumUX	SumUY	SumUZ	SumRZ
MOD 1	0,141932	0,16755	0,14004	1,224E-16	1,708E-17
MOD 2	0,141932	0,30759	0,30759	1,339E-16	1,362E-15
MOD 3	0,117663	0,30759	0,30759	1,389E-16	1,443E-15
MOD 4	0,117663	0,30759	0,30759	1,402E-16	1,552E-15
MOD 5	0,116179	0,30759	0,30759	0,35138	7,033E-12
MOD 6	0,080811	0,42428	0,41993	0,35138	7,034E-12
MOD 7	0,080811	0,53662	0,53662	0,35138	7,034E-12
MOD 8	0,076816	0,53662	0,53662	0,35138	7,035E-12
MOD 9	0,076816	0,53662	0,53662	0,35138	7,036E-12
MOD 10	0,071016	0,53662	0,53662	0,56281	6,064E-11
MOD 11	0,059095	0,53662	0,53662	0,56281	6,064E-11
MOD 12	0,059095	0,53662	0,53662	0,56281	6,064E-11
MOD 13	0,058111	0,53662	0,53662	0,56281	6,065E-11
MOD 14	0,058111	0,53662	0,53662	0,56281	6,065E-11
MOD 15	0,051405	0,68637	0,54302	0,56281	6,065E-11
MOD 16	0,051405	0,69278	0,69278	0,56281	6,078E-11
MOD 17	0,050072	0,69278	0,69278	0,56281	0,5623
MOD 18	0,048352	0,69278	0,69278	0,56281	0,5623
MOD 19	0,048352	0,69278	0,69278	0,56281	0,5623
MOD 20	0,046036	0,69278	0,69278	0,56281	0,5623
MOD 21	0,046036	0,69278	0,69278	0,56281	0,5623
.	.	.	.	.	.
MOD 260	0,012544	0,97571	0,96431	0,97864	0,99895

3.8.4.2 Model-1 için moment ve eksenel yük diyagramları

Model-1 çift katmanlı ve çubuk birleşim elemanları mafsallı olduğu için yapısal olarak moment ve burulma etkisi altında kalmadan sadece eksenel gerilmelere maruz kalmaktadır. Dolayısıyla bu elemanların birleşim bölgelerinde moment değeri sıfır olmaktadır. Ayrıca sistem çift katmanlı olduğu için kafes sisteminin iç ve dış katmanların gerilme değerleri birbirinden farklı olup yapısal olarak da farklı davranmaktadır. Bunun için analiz sonucunda elde edilen karakteristik yük kaynaklı eksenel yük gerilmelerinin bazıları örnek olması açısından aşağıda verilmiştir.

Sabit yük (G) altında eksenel yük diyagramı

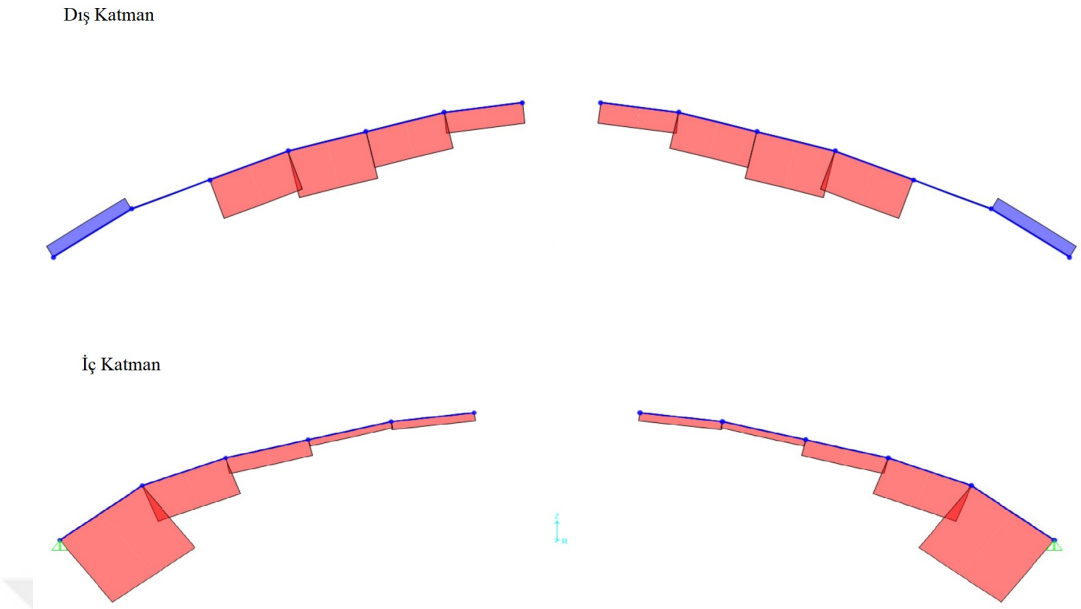
Çubukların öz ağırlığı, kaplama ve ek servis yükleri sonucu oluşan ağırlığın yarattığı eksenel yük diyagramı Şekil 3.53'te gösterildiği gibidir. İç katmanda sadece basınç gerilmesi oluşup en büyük basınç gerilmesi 14,87 kN ve en küçük basınç gerilme 1,67 kN dur. Dış katmanda hem çekme hem de basınç gerilmesi oluşmaktadır. Etek bölgesinde oluşan çekme gerilmesinin değeri 1,84 kN ve basınç bölgelerinde ise en yüksek basınç gerilmesi 8,86 kN 'dur.



Şekil 3. 53 Sabit yük altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme

Hareketli yük (Q) altında eksenel yük diyagramı

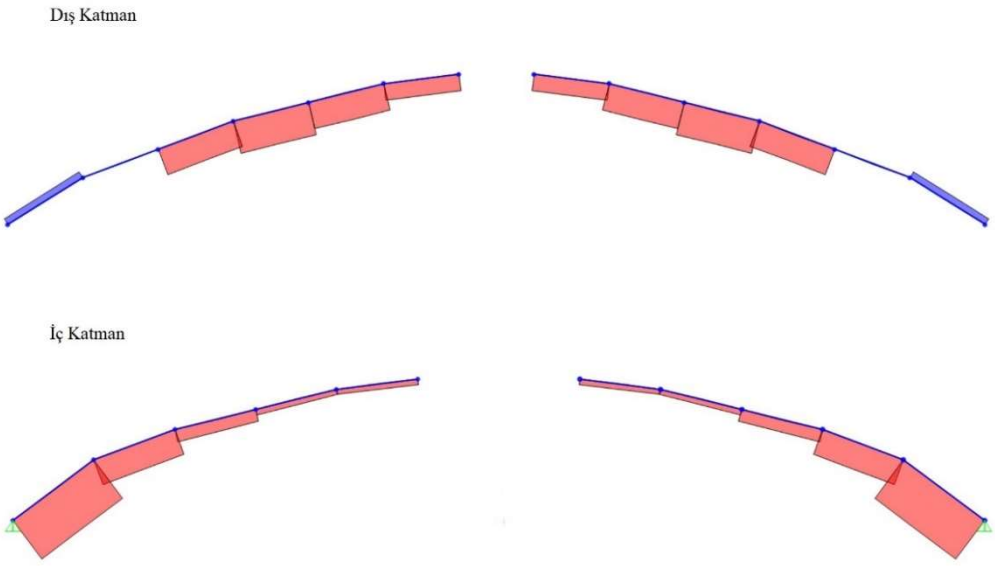
Çatı üzerinde periyodik bakım ya da onarım neticesi ile oluşan hareketli yükler çubuklarda meydana gelen eksenel yük diyagramı Şekil 3.54'te gösterildiği gibidir. . İç katmanda sadece basınç gerilmesi oluşup en büyük basınç gerilmesi 26,51 kN ve en küçük basınç gerilme 2,24 kN dur. Dış katmanda hem çekme hem de basınç gerilmesi oluşmaktadır. Etek bölgesinde oluşan çekme gerilmesinin değeri 4,15 kN ve basınç bölgelerinde ise en yüksek basınç gerilmesi 15,48 kN 'dur. Hareketli yük, kombinasyon içerisinde rüzgâr ve kar yükü ile birlikte aynı anda etki ettirilemez.



Şekil 3. 54 Hareketli yük altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme

Tam kar yükü altında eksenel yük diyagramı

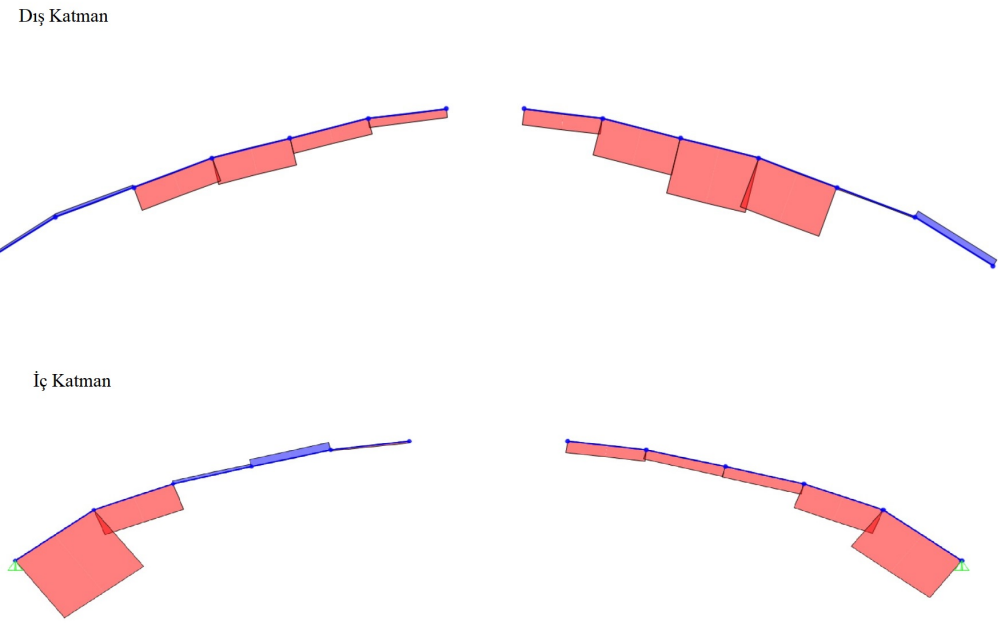
Kubbe üzerinde kar yükünün her alana düzgün yayılı olarak etki ettirilmesi ile oluşan eksenel yük diyagramı Şekil 3.55'te gösterildiği gibidir. . İç katmanda sadece basınç gerilmesi oluşup en büyük basınç gerilmesi 18,38 kN ve en küçük basınç gerilmesi1,55 kN dur. Dış katmanda hem çekme hem de basınç gerilmesi oluşmaktadır; etek bölgesinde oluşan çekme gerilmesinin değeri 2,87 kN ve basınç bölgelerinde ise en yüksek basınç gerilmesi 10,73 kN 'dur.



Şekil 3. 55 Tam kar yükü altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme

Sağ kar yükü altında eksenel yük diyagramı

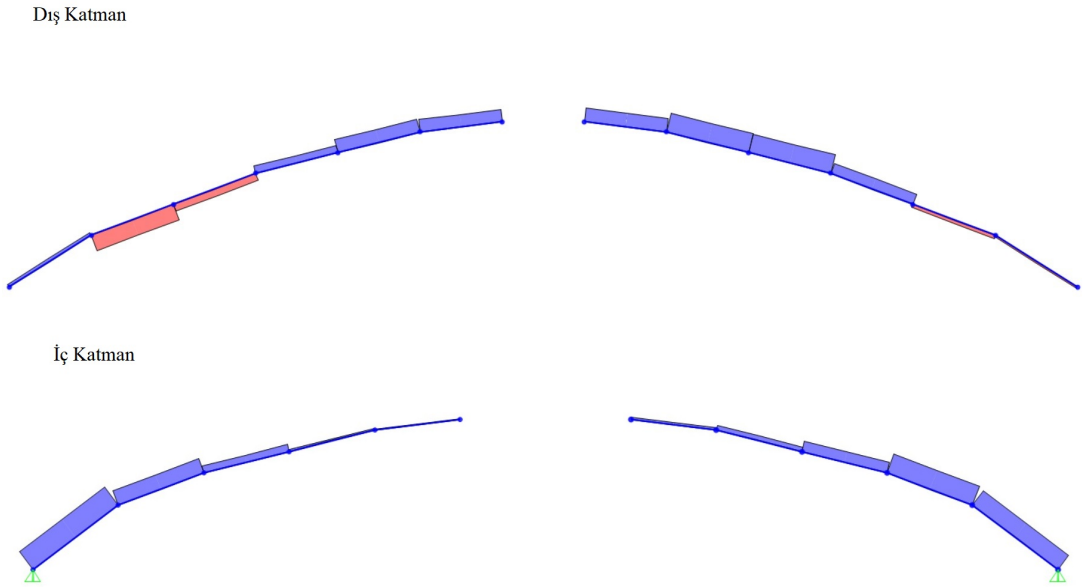
Yarım kar yükü, tam kar gibi tüm alana düzgün yayılı değildir. Ağırlıklı yük bölgesinin kubbenin bir yarısında oluştuğu ve özellikle global burkulma değerlerinde kritik sonuçlar verebileceği için yük hesaplarında özellikle tam kar yükü dışında sağ ve sol yarım kar yükü olarak dikkate alınır. Sağ yarım kar yükünün çubuk elemanlarda oluşturduğu eksenel yük diyagramı Şekil 3.56'da gösterildiği gibidir Kubbenin bu yük etkisi sonucunda dış katmanında sağ kirişlerde sol kirişlere göre daha yüksek basınç gerilmesi ve daha yüksek çekme gerilmesi oluşmaktadır. Yük dağılımındaki eşitsizlik sonucunda da kubbenin iç katmanında sol kirişlerinde sağ kirişlerden farklı olarak çekme gerilmesi oluşmaktadır. Dış katmanda en büyük basınç gerilmesi 17,95 kN ve en büyük çekme gerilmesi sağ kanatta oluşup 2,16 kN değerlerinde sağ kirişte oluşmaktadır. İç katmanda ise en büyük basınç gerilmesi 26,05 kN olarak sol kirişte oluşmaktadır. Ayrıca sol kirişte sağ kirişten farklı olarak 2,73 kN değerinde çekme gerilmesi oluşmaktadır. Bu çekme gerilmesi, dengelenmemiş kar yüklerinin kritik yükü aşması sonucu bölgesel burkulmaya hatta daha da ilerlemesi sonucunda tersine dönerek burkulmaya(snap- thought) neden olabilir.



Şekil 3. 56 Sağ kar yükü altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme

Dış rüzgâr (W_{EX}) yükü altında eksenel yük diyagramı

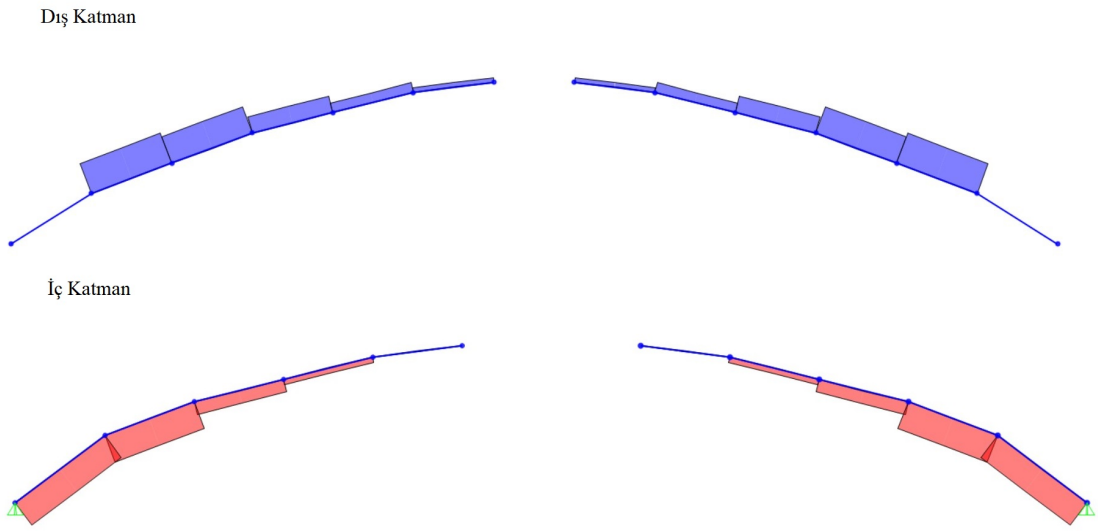
Dış rüzgâr etkisi kubbe sistemlerinde geldiği doğrultuda ilk etkidiği yüzeye basınç, tepe ve arka bölümlerde vakum etkisi oluşturmaktadır. Yarım kar yükünde olduğu gibi bu yükleme durumunda da yükleme düzgün olmadığı için yük dağılımı sistem içerisinde dengesiz kalmakta ve kritik yüklemeye ulaşması durumunda yerel ya da global burkulmaya neden olabilmektedir. Dış rüzgâr yükünün çubuklarda oluşturduğu eksenel yük diyagramı Şekil 3.57'de gösterildiği gibidir. Dış katmanda en büyük basınç gerilmesi sol kirişte olup 4 kN değerindedir. En büyük çekme gerilmesi ise sağ kirişte 4,7 kN değerindedir. İç katmanda ise tüm çubuklar çekme gerilmesi etkisindedir ve en büyük çekme değeri 7,58 kN olarak sol kiriştedir.



Şekil 3. 57 Dış rüzgâr yükü altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme

Sıcaklık değişimi sonucu (T+) çubuklarda oluşan eksenel yük diyagramı

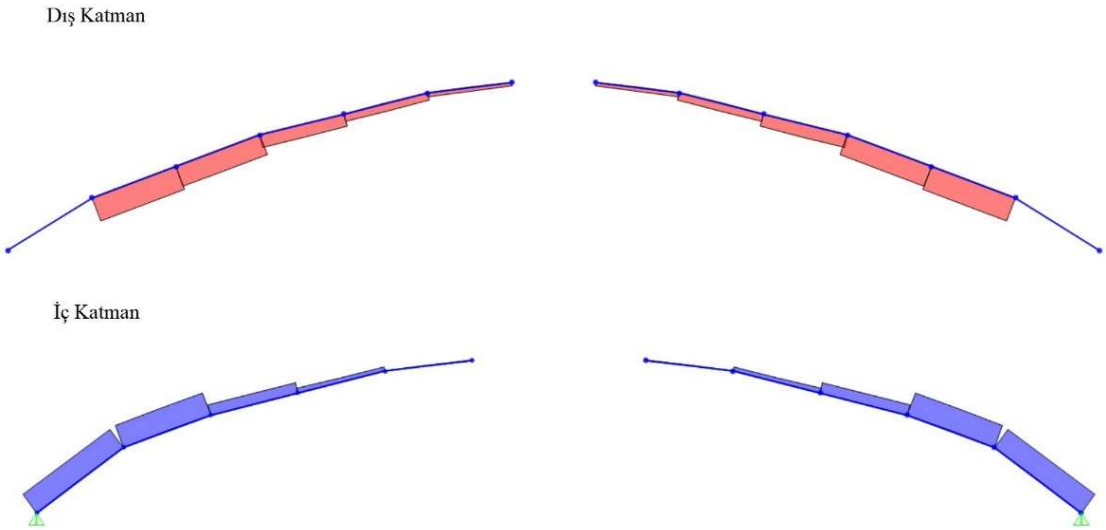
Sıcaklık değişimine bağlı olarak çelik çubuklarda oluşan genleşme veya büzülme sistem üzerinde gerilmelere neden olmaktadır. Şekil 3.58'de görüldüğü üzere sıcaklık artışının iç katmanda basınç gerilmesi ve bu basınç gerilmesinin dış katmanda neden olduğu çekme gerilmesi oluşmaktadır. Sıcaklık düşüşünde ise bu durum tam tersi olmaktadır. Sıcaklık artışının dış katmanda yarattığı en büyük çekme gerilmesi 6,92 kN ve iç katmanda yarattığı en büyük basınç gerilmesi 6,42 kN 'dur.



Şekil 3. 58 Sıcaklık artışı termal yük altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme

Sıcaklık değişimi sonucu (T-) çubuklarda oluşan eksenel yük diyagramı

Şekil 3.59'da göründüğü üzere sıcaklık değişimi sonucu oluşan büzülme etkisinin hem dış hem de iç katmanda farklı gerilmeler oluşturmuştur. Boyutsal değişim sonucu oluşan gerilmeler çelik malzemesini yormakta ve kalıcı deformasyonlar yaratabilmektedir. Model-1'de sıcaklık düşmesi sonucu oluşan termal gerilme sonucu dış katmanda en büyük basınç gerilmesi 8,32 kN ve iç katmanda oluşan en büyük çekme gerilmesi 6,74 kN 'dur.



Şekil 3. 59 Sıcaklık düşüşü termal yük altında iç ve dış katman elemanlarında oluşan eksenel gerilme

3.8.5 Model-1 için yer değiştirme kontrolü

Deplasman, yapı elemanlarına uygulanan yükler veya sıcaklık değişimleri gibi nedenlerle yer değiştirmesi anlamına gelir. Çelik kubbelerde deplasman, genellikle büyük ölçekli yapısal deformasyonlar veya çelik elemanların termal genleşmesi gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Bu nedenle, çelik kubbelerin tasarımında deplasmanların ve yer değiştirmelerin kontrol edilmesi önemlidir. Bu genellikle yapısal hesaplamalar ve çelik elemanların boyutlandırılması yoluyla yapılır.

3.8.5.1 Düşey yer değiştirme durumu

Yer değiştirmenin düşey eksende kontrolü için ÇYTHYEY madde 15.1 not(a) esas alınarak Tablo 3.3'te belirtilen ve yer değiştirme kontrolünde esas alınan 1,2 ve 3 numaralı kombinasyonlar kullanarak maksimum yer değiştirme sınırı ÇYTHYEY madde 15.2'ye göre düşey yer değiştirmenin açıklığa oranı 1/300 sınırını aşmamalıdır. En büyük deplasman G+Q kombinasyonunda oluşmuş olup en büyük deplasman tepe çemberinde düşey olarak 6,69 mm değerinde deplasman yapmıştır.

Şekil 3.60'da düğüm noktaları için düşey deplasman değerleri metre birimi cinsinden renklendirilmiştir.

$$\delta_d = 6{,}69 \text{ mm} < \frac{26\text{x}10^3}{300} = 86 \text{ mm}$$

Kontrolü ile en büyük deplasmanın düşey deplasman sınırını aşmadığı görülmektedir. Dolayısıyla yapının düşey deplasmanı uygundur.



Şekil 3. 60 Düşey yer değiştirme kontrolünün G+Q yük kombinasyonu altında deplasmanı

3.8.5.2 Yatay yer değiştirme durumu

Yer değiştirmenin yatay eksende kontrolü için ÇYTHYEY madde 15.1 not (d) esas alınarak Tablo 3.3'te belirtilen ve yer değiştirme kontrolünde esas alınan 4 ve 5 numaralı kombinasyon olan G+0,5Q+W_1 yükü kullanılarak maksimum yer değiştirme sınırı ÇYTHYEY madde 15.3'e göre sistemin cephe kaplaması ve türü bu deplasman durumu göz önüne alınarak seçilmiştir.

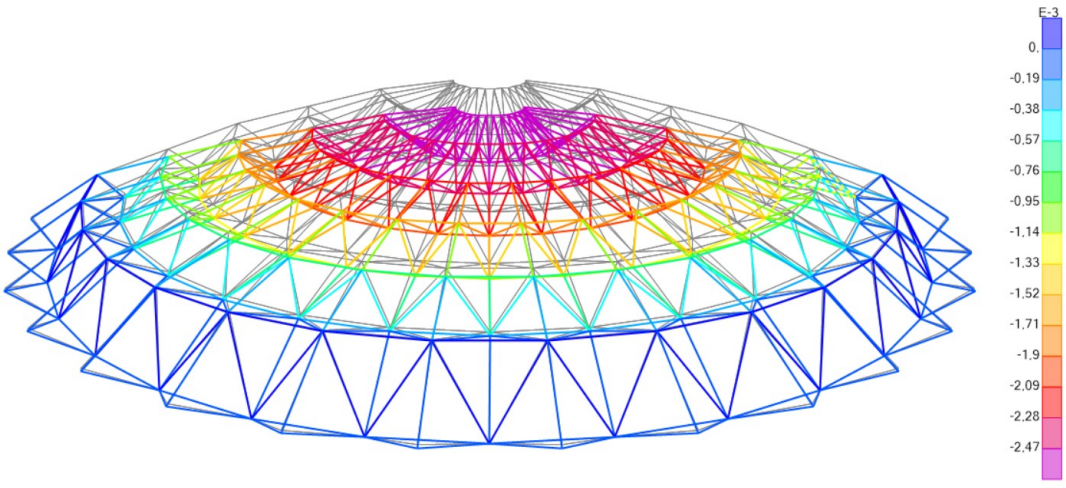
Şekil 3.61'de düğüm noktaları için yatay deplasman maksimum değeri metre birimi cinsinden verilmiştir ve diğer deplasman değerleri için renklendirme yapılmıştır.



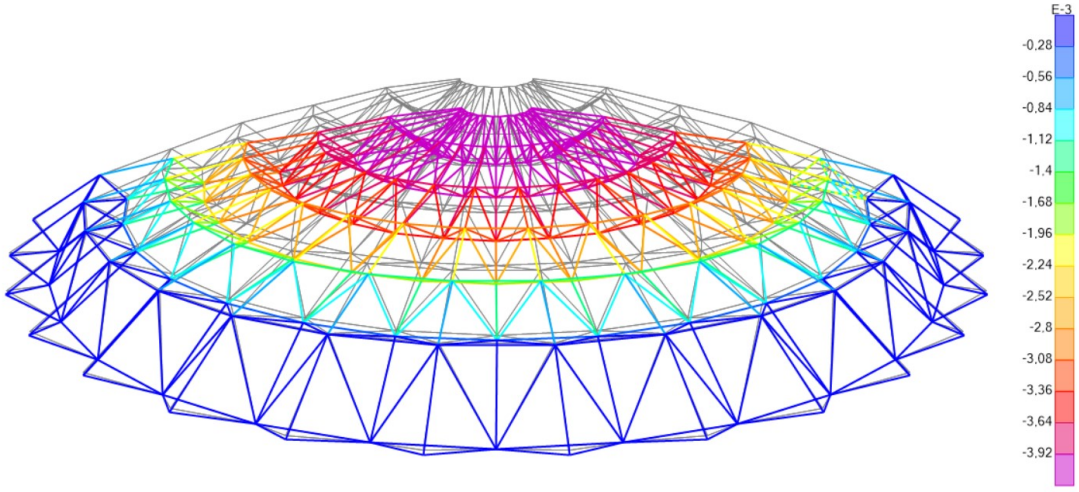
Şekil 3. 61 Yatay yer değiştirme kontrolünün G+0,5Q+W_1 yük kombinasyonu altında deplasmanı

3.8.5.3 Karakteristik yükler altında yer değiştirme durumu

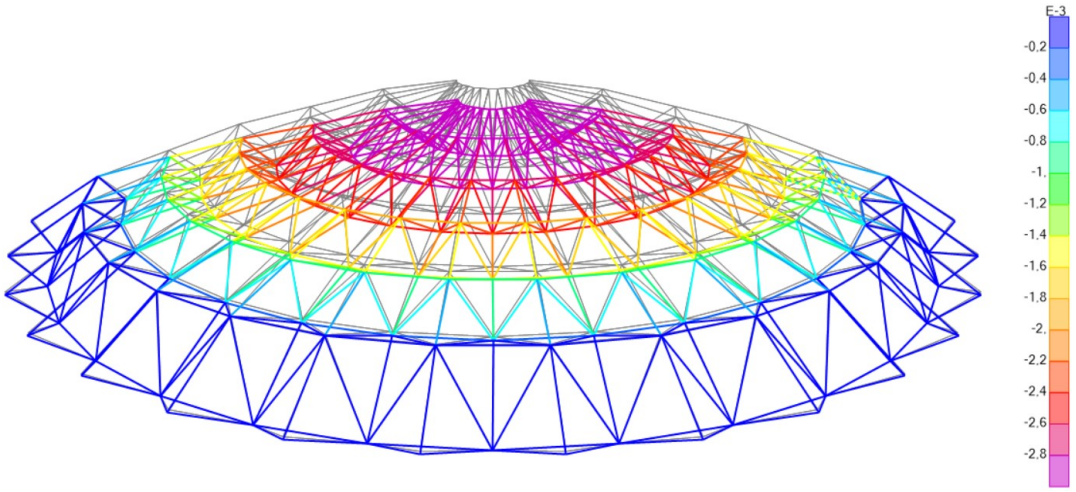
Bazı karakteristik yükler altında kubbe üzerinde oluşan düğüm noktalarının U_Z yönündeki düşey yer değiştirmeleri, deplasman renk skalası ile birlikte metre birimi cinsinden aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



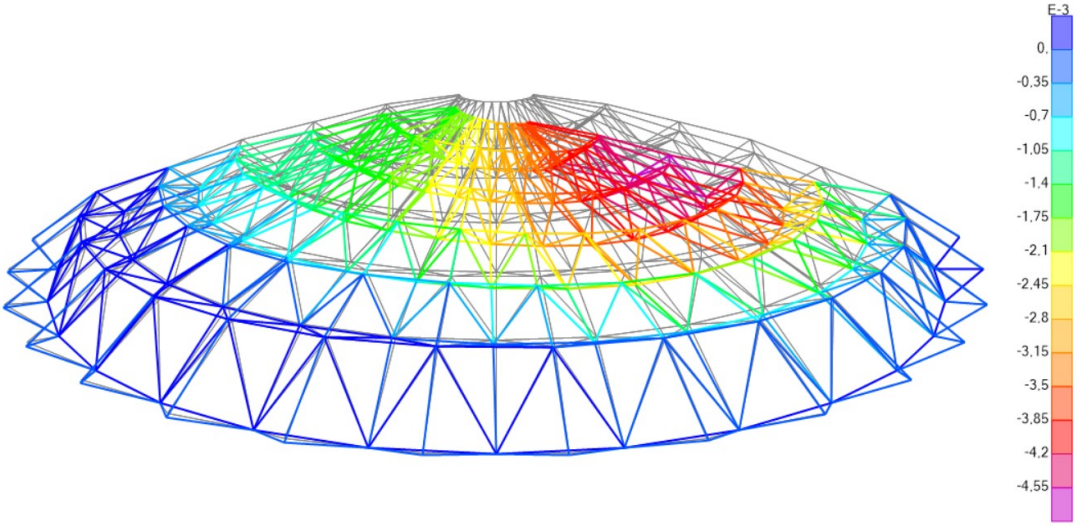
Şekil 3. 62 Sabit yük (G) altında düşey deplasman durumu



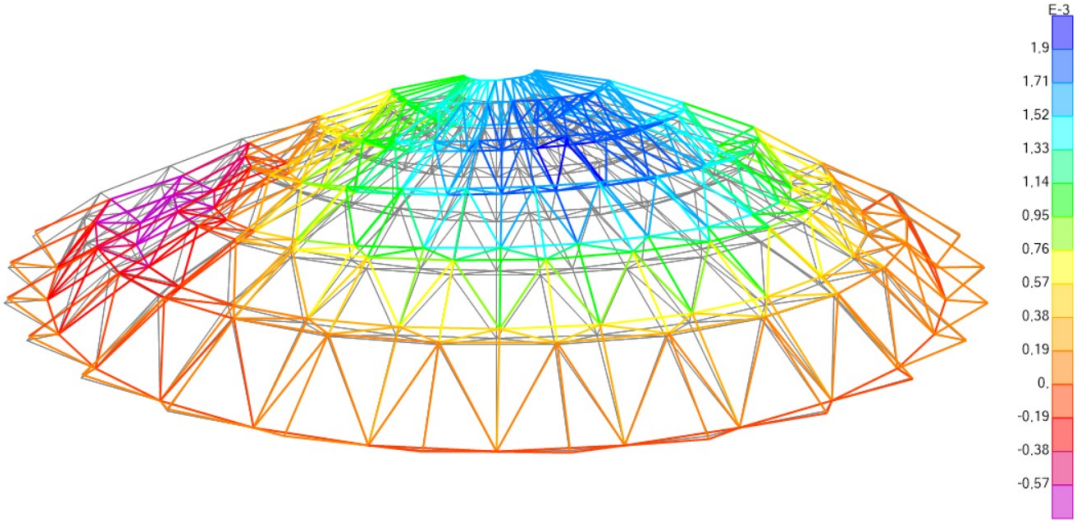
Şekil 3. 63 Hareketli yük (Q) altında düşey deplasman durumu



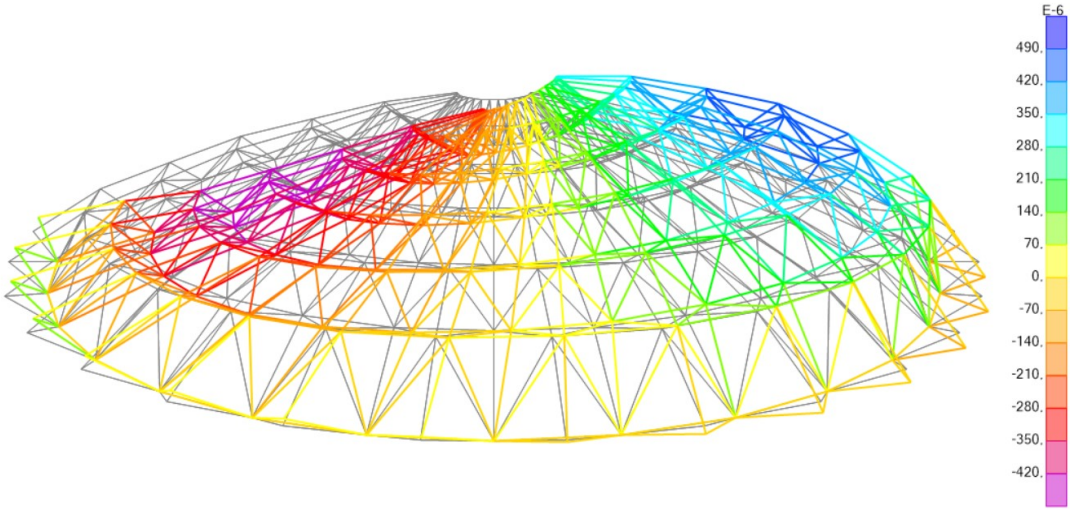
Şekil 3. 64 Tam kar yükü (S_{Tam}) altında düşey deplasman durumu



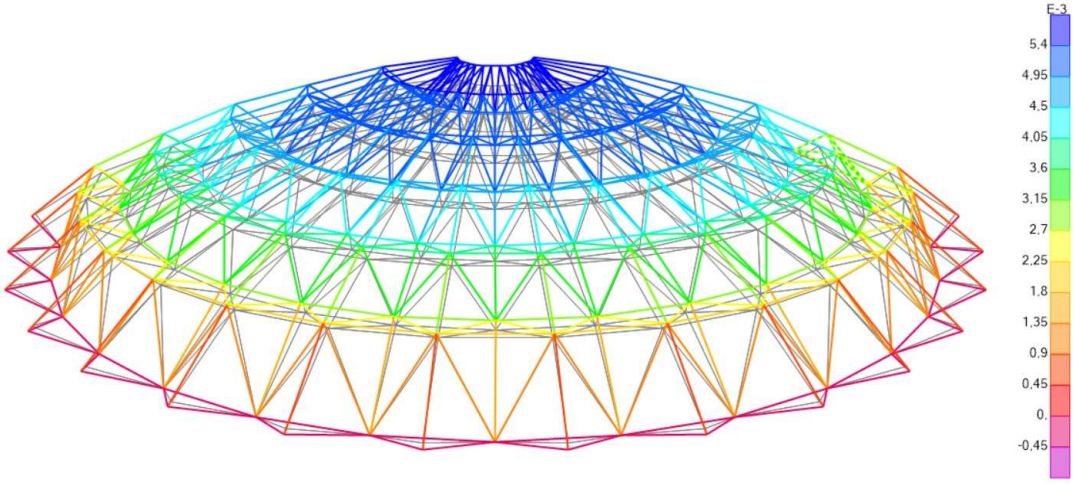
Şekil 3. 65 Yarım kar yükü ($S_{Sağ}$) altında düşey deplasman durumu



Şekil 3. 66 Dış rüzgâr yükü (W_{EX}) altında düşey deplasman durumu



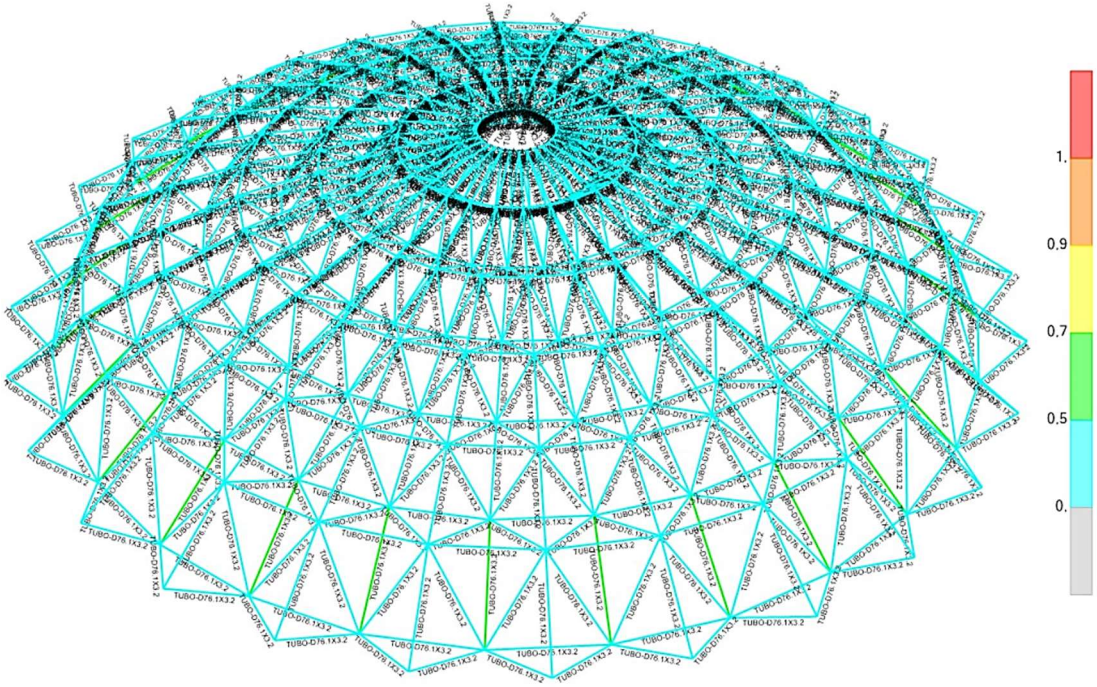
Şekil 3. 67 Deprem yükü (E_X) altında düşey deplasman durumu



Şekil 3. 68 Termal gerilme yükü (T+) altında düşey deplasman durumu

3.8.6 Model-1 tasarım sonuçları

Çift katmanlı kubbe sisteminde çubuk elemanlar üzerindeki gerilme değerlerine göre SAP2000 programında tasarım yapılarak çubuk kesitleri belirlenmiştir. Tasarım sonucu sistem içerisinde tüm çubuklar aynı kesit olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarım içinde burkulma davranışı da göz önüne alınarak kesit seçimi yapılmıştır. Şekil 3.69'da çubuk elemanların "Etki/Kapasite" oranlarına göre renk skalası verilmiştir. YDKT yöntemine uygun yapılan tasarım neticesinde Tüm çubuk elmanlar için en kritik yük kombinasyonu olan 1.2G+1.6Q+0.5SYarım yük kombinasyonu altında TUBO-D76,1x3,2 boru profili uygun kesit olarak belirlenmiştir. İmalat, nakliye ve montaj aşamalarında kolaylaştırmak ve hatalı işlemelerin önüne geçmek için Model-1 için her çubuk aynı kesit olarak tasarlanmıştır.



Şekil 3. 69 YDKT'ye göre tasarımı yapılmış ve etki/kapasite oranına göre renklendirilmiş model-1 görüntüsü

Sistem üzerinde en kritik çubuk olan, kubbenin etek bölümündeki iç katman çubuğun tasarım detayı Şekil 3.70'de verilmiştir. Bu elemanın tasarımı, basınç etkisi altındaki eleman esaslarına göre belirlenmiştir.

Ayrıca örnek olması için en kritik çekme yükü altında eleman tasarımı incelenmiştir. Kubbe sisteminde $0.9G+1.6W_2$ yük kombinasyonu altında oluşan kritik çekme gerilmesi için program tasarım çıktısı Şekil 3.71'de verilmiştir.

```
AISC 360-10 STEEL SECTION CHECK    (Summary for Combo and Station)
Units  :  KN, m, C

Frame :  887      X Mid:  -8,174    Combo:  1,2G_1,6Q_0,5SL Design Type:  Brace
Length:  2,5      Y Mid:  -7,36     Shape:  TUBO-D76.1X3.2  Frame Type:  SCBF
Loc   :  1,25     Z Mid:  0,75      Class:  Compact         Princpl Rot: 0, degrees

Provision: LRFD   Analysis: Direct Analysis
D/C Limit=1,      2nd Order: General 2nd Order        Reduction: Tau-b Fixed
AlphaPr/Py=0,282  AlphaPr/Pe=0,453  Tau_b=1,         EA factor=0,8     EI factor=0,8

PhiB=0,9          PhiC=0,85         PhiTY=0,9         PhiTF=0,75
PhiS=0,9          PhiS-RI=1,        PhiST=0,75

A=7,329E-04       I33=0,            r33=0,026         S33=1,282E-05     Av3=3,653E-04
J=0,              I22=0,            r22=0,026         S22=1,282E-05     Av2=3,653E-04
E=210000000,      Fy=355000,        Ry=1,1            z33=1,702E-05
RLLF=1,           Fu=510000,                          z22=1,702E-05

HSS Welding: ERW  Reduce HSS Thickness? No


STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo 1,2G_1,6Q_0,5SL)
    Location          Pu         Mu33         Mu22         Vu2          Vu3          Tu
    1,25          -73,281        0,042          0,          0,           0,           0,

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO    (H1-1a)
    D/C Ratio:    0,657 = 0,65 + 0,007 + 0,
                        = (Pr/Pc) + (8/9)(Mr33/Mc33) + (8/9)(Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN   (H1-1a)
    Factor                L          K1           K2          B1           B2          Cm
    Major Bending         1,         1,           1,          1,           1,          1,
    Minor Bending         1,         1,           1,          1,           1,          1,

                        Lltb        Kltb          Cb
    LTB                   1,          1,        1,316

                          Pu     phi*Pnc     phi*Pnt
                       Force    Capacity    Capacity
    Axial          -73,281      112,807     234,162

                          Mu      phi*Mn      phi*Mn      phi*Mn
                      Moment    Capacity     No LTB       Cb=1
    Major Moment       0,042       5,438       5,438       5,438
    Minor Moment          0,       5,438

                          Tu          Tn      phi*Tn
                      Moment    Capacity    Capacity
    Torsion               0,        5,69       4,267

SHEAR CHECK
                                                 Vu      phi*Vn      Stress
Status
                                              Force    Capacity       Ratio       Check
    Major Shear           0,      70,248          0,          OK
    Minor Shear           0,      70,248          0,          OK
```

Şekil 3. 70 Kritik basınç yükü altındaki kesitin YDKT yöntemine göre tasarım detayları

AISC 360-10 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, m, C

Frame :	686	X Mid:	-1,989	Combo:	0,9G_1,6W2	Design Type:	Beam
Length:	0,418	Y Mid:	5,175E-05	Shape:	TUBO-D76.1X3.2	Frame Type:	SCBF
Loc :	0,418	Z Mid:	3,5	Class:	Compact	Princpl Rot:	0, degrees

Provision: LRFD	Analysis: Direct Analysis			
D/C Limit=1,	2nd Order: General 2nd Order		Reduction: Tau-b Fixed	
AlphaPr/Py=0,08	AlphaPr/Pe=0,004	Tau_b=1,	EA factor=0,8	EI factor=0,8

PhiB=0,9	PhiC=0,85	PhiTY=0,9	PhiTF=0,75	
PhiS=0,9	PhiS-RI=1,	PhiST=0,75		

A=7,329E-04	I33=0,	r33=0,026	S33=1,282E-05	Av3=3,653E-04
J=0,	I22=0,	r22=0,026	S22=1,282E-05	Av2=3,653E-04
E=210000000,	Fy=355000,	Ry=1,1	z33=1,702E-05	
RLLF=1,	Fu=510000,		z22=1,702E-05	

HSS Welding: ERW Reduce HSS Thickness? No

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo 0,9G_1,6W2)

Location	Pu	Mu33	Mu22	Vu2	Vu3	Tu
0,418	20,819	0,	0,	0,011	0,	0,

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1.2,H1-1b)
D/C Ratio: 0,044 = 0,044 + 0, + 0,
= (1/2)(Pr/Pc) + (Mr33/Mc33) + (Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1.2,H1-1b)

Factor	L	K1	K2	B1	B2	Cm
Major Bending	1,	1,	1,	1,	1,	1,
Minor Bending	1,	1,	1,	1,	1,	1,

	Lltb	Kltb	Cb
LTB	1,	1,	1,002

	Pu Force	phi*Pnc Capacity	phi*Pnt Capacity
Axial	20,819	217,027	234,162

	Mu Moment	phi*Mn Capacity	phi*Mn No LTB	phi*Mn Cb=1
Major Moment	0,	5,438	5,438	5,438
Minor Moment	0,	5,438		

	Tu Moment	Tn Capacity	phi*Tn Capacity
Torsion	0,	5,69	4,267

SHEAR CHECK

			Vu Force	phi*Vn Capacity	Stress Ratio	Status Check
Major Shear	0,011	70,248	0,	OK		
Minor Shear	0,	70,248	0,	OK		

CONNECTION SHEAR FORCES FOR BEAMS

	VMajor Left	VMajor Right
Major (V2)	0,011	0,011

Şekil 3. 71 Kritik çekme yükü altındaki kesitin YDKT yöntemine göre tasarım detayları

3.8.7 Model-1 sisteminin Türk çelik yapı yönetmeliğine göre kontrol edilmesi

SAP2000 gibi yapısal analiz yazılımları, genellikle inşaat mühendisleri tarafından kullanılan, kompleks yapıların modellenmesi, analizi ve tasarımı için kullanılan yazılımlardır. Bu yazılımlar, kullanıcının verdiği girdileri (yükler, malzemeler, geometri vb.) kullanarak, yapıların davranışını matematiksel olarak modellemektedirler. Modelleme işlemi tamamlandıktan sonra, yazılım yapı üzerinde çeşitli analizler gerçekleştirir ve sonuçları kullanıcıya sunar. Ancak, yapısal analiz yazılımları tarafından sağlanan sonuçların doğruluğu, kullanıcının verdiği girdilerin doğruluğuna, matematiksel modelin doğruluğuna ve diğer birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle yapısal analiz yazılımları tarafından sağlanan sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için analiz sonuçlarının yönetmeliğe uygun olarak matematiksel olarak el ile kontrol edilmesi gerekmektedir.

Model-1 sistemi için farklı yük birleşimleri altında oluşan basınç ve çekme gerilmesi altındaki iki kritik çubuk elemanın kontrolü Türk Çelik Yönetmeliğine göre kontrol edilmiştir. Bunlar Şekil 3.70 ve Şekil 3.71'de tasarım detayı verilen kritik yük altındaki çubuk elemanlarıdır.

3.8.7.1 Basınç etkisi altındaki çubuğun tasarım kontrolü

Çelik uzay kubbe sistemlerinde, basınç etkisi altındaki çubukların tasarımı, yapısal analiz ve tasarım kurallarına uygun olarak yapılmalıdır. Basınç etkisi altındaki çubukların tasarımı, genellikle Euler eğrisi kullanılarak yapılır. Euler eğrisi, bir çubuğun ekseninde, belirli bir boyutta basınç etkisi altında kırılma noktasına ulaşan bir eğridir. Basınç etkisi altındaki bir çubuğun tasarımı, Euler eğrisine göre yapılmalıdır. Euler eğrisi, çubuğun boyutlarına ve malzeme özelliklerine göre değişebilir.

Basınç etkisi altındaki bir çubuğun tasarımı için çubuğun ekseninde oluşan gerilme değerinin çubuğun dayanımına göre düşük kalacak şekilde yapılması gerekmektedir. Bu, çubuğun kırılmasını önler; kubbe siteminin güvenliği ve verimliliği açısından önemlidir. Basınç kuvveti dayanımı olan P_n, eksenel basınç etkisi altındaki davranışlarından; burulmalı burkulma, eğilmeli burkulma ya da burulmalı eğilmeli burkulma sınır durumuna göre sayısal hesabı yapılarak dayanımı en küçük veren davranışın değeri alınır.

Eksenel basınç gerilmesi altındaki elemanların tasarımı Türk Çelik Yönetmeliği Bölüm 8'de belirlenen kural ve sınırlamalara göre yapılır.

Model-1 sistemindeki en elverişsiz eleman olan ve Şekil 3.71'de program çıktısı verilen 887 numaralı çubuk için çelik yönetmelik kriterlerine göre basınç kontrolü sağlanacaktır.

Yerel burkulma için enkesit sınıflandırılması

Eksenel basınç gerilmesi altındaki eleman kesitleri için yerel burkulma sınır koşulu; narin ve narin olmayan enkesit olarak iki durumda incelenir. Yerel burkulma narinlik değeri olan λ değeri, narinlik sınır değeri olan λ_r değerini aşmadığı durumda "narin olmayan enkesit", sınır değerini aştığında ise "narin enkesit" olarak adlandırılır. Yerel burkulma narinlik değerleri denklem 3.21 kullanılarak hesaplanacaktır.

Tasarım neticesinde seçilen TUBO-D76,1x3,2 boru profili için

$$\lambda = \frac{D}{d} = \frac{0,0761}{0,0697} = 23,78$$
$$\lambda_r = 0.11\ \frac{E}{F_y} = 0,11\frac{21x10^7}{355x10^3} = 65,07 \quad (3.21)$$

Burada

"D" boru profil dış çap, "d" boru profil iç çap değerleridir.

$\lambda < \lambda_r$ olduğundan yerel burkulma "narin olmayan enkesit" olarak sınıflandırılır.

Narinlik oranı sınırı

Eksenel basınç gerilmesi altındaki elemanlar çelik yönetmeliğinin Bölüm 6 ya da Bölüm 16 kuralları doğrultusunda burkulma boyu ($L_c=KL$) ile hesaplanan narinlik oranı $L_c/\ i \leq 200$ olmalıdır. Kritik çubuk elemanı değerlerine göre seçilen TUBO-D76,1x3,2 boru profilinin burkulma mukavemet değerleri aşağıdaki gibidir.

$$A = \frac{\pi * (D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi * (0,0761^2 - 0,0697^2)}{4} = 7,33x10^{-4}m^2 \quad (3.22)$$

$$I = \frac{\pi * (D^4 - d^4)}{64} = \frac{\pi * (0,0761^4 - 0,0697^4)}{64} = 4,88\ x10^{-7}m^4 \quad (3.23)$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{4,88\ x10^{-7}}{7,33x10^{-4}}} = 2,58x10^{-2}m \quad (3.24)$$

Burada;

"*A*" kesit alanı, "*I*" atalet momenti, "*i*" atalet yarıçapıdır.

L_c / i = 2,5 / 2,58x10^{-2} = 96,9 ≤ 200 olduğundan yönetmelik 8.1.1'e göre narinlik koşulu sağlanmaktadır.

Karakteristik basınç kuvveti mukavemeti

Çelik yapılarda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir parametre olan Basınç Kuvveti Dayanımı, bir malzemenin basınç altında ne kadar yük taşıyabileceğini ifade eder. Enkesiti narin olmayan elemanların maruz kaldığı eksenel basınç kuvveti olan P_n, çelik yönetmeliği bölüm 8.2 gereğince denklem 3.25 dikkate alınarak hesaplanır.

$$P_n = F_{cr} A_g \qquad (3.25)$$

Burada;

"F_{cr}" Kritik burkulma gerilmesi, "A_g" Kayıpsız enkesit alanını göstermektedir

Kritik burkulma gerilmesi denklem 3.26 sınır değerine göre hesaplanarak eksenel basınç kuvveti hesaplanabilir.

$$\frac{L_c}{i} \leq 4{,}71\sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (\text{veya } \frac{F_y}{F_e} \leq 2{,}25) \text{ için} \quad Fcr = \left[0{,}658^{\frac{F_y}{F_e}}\right] F_y$$
$$\frac{L_c}{i} > 4{,}71\sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (\text{veya } \frac{F_y}{F_e} > 2{,}25) \text{ için} \quad Fcr = 0{,}877\, Fe \qquad (3.26)$$

Burada elastik burkulma gerilmesi F_e, yönetmelik 8.1.2 'e göre denklem 3.27 uyarınca çözümlenmiştir.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{i}\right)^2} \qquad (3.27)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 21x10^7}{\left(\frac{2{,}5}{2{,}58\ x10^{-2}}\right)^2} = 220719{,}2\ \text{kN/m}^2$$

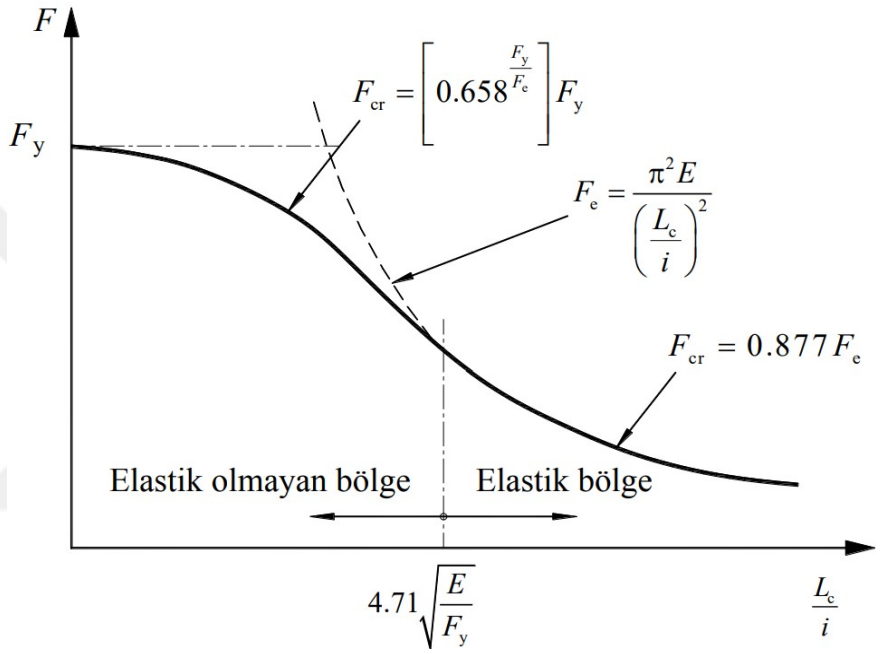
Buna göre kritik burkulma yükü hesabında sınır durumu aşağıdaki gibi belirlenerek kritik burkulma gerilmesi hesaplanır.

$$\frac{L_c}{i} = \frac{2{,}5}{2{,}58\ x10^{-2}} = 96{,}9 \leq 4{,}71\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4{,}71\sqrt{\frac{21x10^7}{355x10^3}} = 114{,}55$$

Denklem 3.26 koşullu çözümlemesi sonucunda durum 1 için kritik burkulma gerilmesi, F_{cr} çözümlenir.

$$F_{cr} = \left[0{,}658^{\frac{355x10^3}{220719{,}2}}\right] 355x10^3 = 181078{,}5\ kN/m^2$$

Basınç altındaki elemanın narinlik oranı (L_c/i) ile kritik burkulma gerilmesi (F_{cr}) arasındaki ilişkinin grafik eğrisi Şekil 3.72'de gösterilmektedir.



Şekil 3. 72 Eksenel basınç kuvveti altında narinlik ve kritik yük dayanım eğrisi (ÇYTHYEDY, 2018)

Karakteristik basınç kuvveti P_n ise hesaplanan kritik burkulma gerilmesine bağlı olarak çözümlenir.

$P_n = F_{cr} A_g = 181078{,}5 \times 7{,}33x10^{-4} = 132{,}71$ kN

YDKT yöntemine göre karakteristik basınç kuvveti tasarım katsayısı ile çarpılarak tasarım kuvveti elde edilir(Φ_c =0.90)

$P_d = \Phi_c P_n = 0{,}9 \times 132{,}71 = 119{,}44$ kN bulunur.

$$\frac{P_u}{P_d} = \frac{73{,}28}{119{,}44} = 0{,}614 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı ≤ 1 olduğundan çubuk yükü güvenle taşır.

3.8.7.2 Çekme etkisi altındaki çubuğun tasarım kontrolü

Çelik çubukların gerilme ve uzama davranışı, gerilme-uzama eğrisi ile ifade edilir. Gerilme-uzama eğrisi, çelik çubukların gerilme altında ne kadar uzayabileceğini gösterir. Eğrinin doğrusal bölgesi, Hooke'un yasasına uygun olarak gerilme-uzama oranının sabit olduğu elastik bölgedir. Eğrinin sonunda, malzeme plastik deformasyona uğrayarak geri dönüşsüz bir şekilde şekil değiştirir. Tasarım yapılırken malzemenin akma durumundan önce yani lineer bölgede kalacak şekilde tasarımı yapılır. Kısaca çubuğun taşıma kapasitesi, uygulanan yük altında gerilmenin akma gerilmesini aşmadığı durumda maksimum olarak kabul edilir.

Eksenel çekme gerilmesi altındaki elemanların tasarımı Türk Çelik Yönetmeliğinin Bölüm 7'de belirlenen kural ve sınırlamalara göre yapılır.

Model-1 sisteminde en elverişsiz eleman olan ve Şekil 3.71'de program çıktısı verilen 686 numaralı çubuk elemanı için çelik yönetmelik kriterlerine göre çekme kontrolü sağlanacaktır.

Narinlik oranı sınırı

Eksenel çekme kuvveti altında çelik elemanlarda burkulma stabilitesi, yani elemanın eksenel yönde burkulmaya karşı direnci, önemli bir tasarım ölçütüdür. Ancak, yönetmelikte de belirtildiği gibi, narinlik oranı da bir diğer önemli tasarım ölçütüdür. Narinlik oranı, elemanın boyuna uzunluğunun, enine kesiti boyunca en büyük boyutunun oranını ifade eder. Türk Çelik Yönetmeliğinde belirtilen sınır, elemanın burkulma direncini etkileyen narinlik oranı sınırıdır ve bu sınır $L_c/i \leq 300$ şeklindedir. Burada, L_c elemanın burkulma uzunluğunu, i ise enine kesit boyunca en büyük boyutu ifade eder. Bu sınır değeri, elemanın boyuna uzunluğunun artmasıyla birlikte daha düşük değerlere sahip olmalıdır

$L_c/\ i$ = 0,418 / 2,58x10^{-2} = 16,2≤ 300 olduğundan yönetmelik 7.1.1'e göre narinlik koşulu sağlanmaktadır.

Çekme yükü altında, eleman boyunca gerilme oluşur ancak burkulma oluşmaz. Yönetmeliğe göre çekme etkisinde burkulma stabilitesi bir tasarım ölçütü değildir ancak belirtilen koşulu sağlaması gereklidir. Bu nedenle, çekme yükü altında narinlik oranı sınırını aşmayan bir eleman, burkulma direnci açısından yeterli kabul edilir. Ancak, elemanın diğer tasarım ölçütleri, örneğin gerilme ve deformasyon sınırları, hesaplamaları yapılırken göz önünde bulundurulmalıdır.

Karakteristik çekme kuvveti altında akma ve kırılma sınır durumu

Çekme kuvveti altında akma ve kırılma sınırı, bir malzemenin mekanik özellikleri ile ilgilidir. Akma sınırı, bir malzemenin çekme kuvveti altında kalıcı olarak şekil değiştirebileceği maksimum çekme gerilimine denir. Kırılma sınırı ise malzemenin çekme kuvveti altında kırılacağı maksimum çekme gerilimini ifade eder. Karakteristik çekme kuvveti altında akma ve kırılma sınırı, malzemenin seçiminde önemli bir faktördür. Bu sınır durumları malzemenin dayanıklılığına ve güvenilirliğine etki eder. Bir malzemenin akma ve kırılma sınırı ne kadar yüksek olursa, o kadar güçlü ve dayanıklıdır. Ancak, seçilen malzemenin sadece yüksek akma ve kırılma sınırı değil, aynı zamanda enkesit alanı da dikkate alınmalıdır.

Etkin enkesit alanı, malzemenin gerçek kesiti ile malzemenin altında yer alan herhangi bir oyuk veya delik gibi boşlukların neden olduğu kesit azalmalarının dikkate alınarak hesaplanan kesit alanıdır. Bir malzemenin akma sınırı, gerçek enkesit alanı (A_g) kullanılarak hesaplanırken, kırılma sınırı ise etkin enkesit alanı (A_e) kullanılarak hesaplanır. Seçilen boru profil için konik parça ve cıvata ile bağlandığı için yönetmeliğe göre, gerçek enkesit alanı ile etkin enkesit alanı aynı olarak alınmıştır.

Yönetmeliğe göre Akma ve kırılma sınır durumu hesabı yapıldıktan sonra en küçük olan yük tercih edilerek tasarım dayanımı belirlenmelidir. Denklem 3.28'de akma ve kırılma sınır durumu hesaplanmıştır.

$$T_{n\,Akma} = F_y A_g = 3{,}55\times10^5 \text{ x}7{,}33\times10^{-4} = 260{,}17 \text{ kN}$$
$$T_{n\,Kırılma} = F_u A_e = 5{,}10\times10^5 \text{ x}7{,}33\times10^{-4} = 373{,}83 \text{ kN} \quad (3.28)$$

Hesaplanan değerlerden kritik olan değer dikkate alınması gerektiği için küçük olan değer T_{nAkma}, tasarım hesabında aşağıdaki şekilde kullanılmıştır.

YDKT yöntemine göre karakteristik çekme kuvveti tasarım katsayısı ile çarpılarak tasarım kuvveti elde edilir (Φ_t =0.90)

$T_d = \Phi_t T_n$ =0,9 x 260,17 = 234,152 kN bulunur.

$$\frac{P_u}{T_d} = \frac{20{,}819}{234{,}152} = 0{,}089 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı ≤ 1 olduğundan çubuk yükü güvenle taşır.

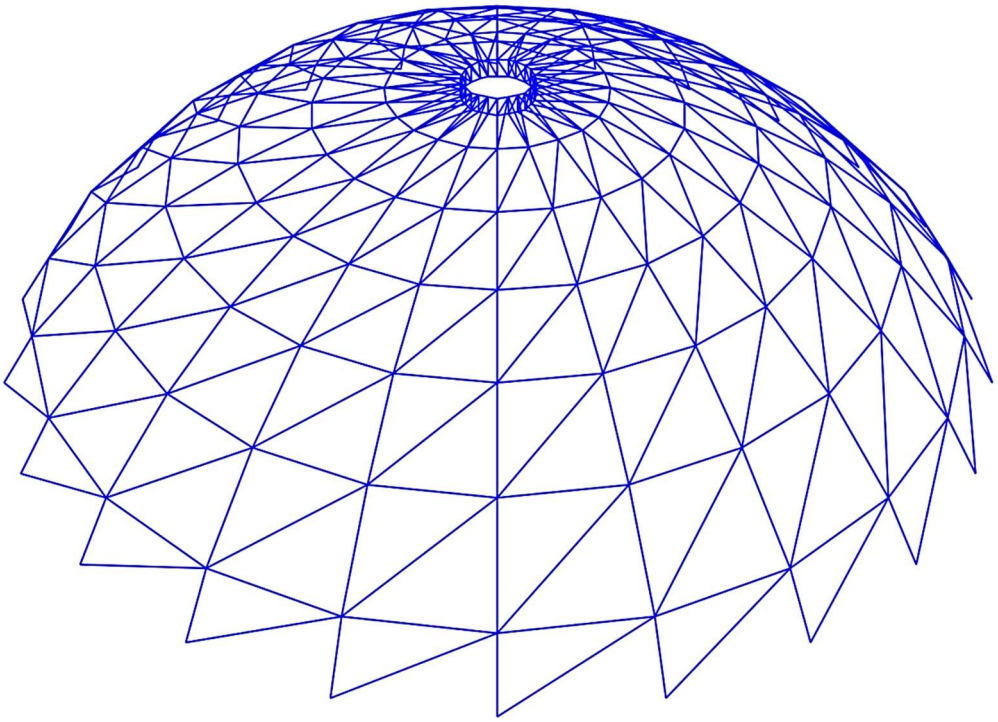
3.9 Tek Katmanlı Kubbe Modeli Analizi

Tek katmanlı kubbe sistemleri çift katmanlı kubbe modellerine göre daha çok tercih edilen kubbe modelidir. Çift katmanlı kubbeler gibi üretim sırasında karmaşıklığa neden olmaz ve daha küçük açıklıklarda çift katmanlı sistemlere göre daha az maliyetlidir.

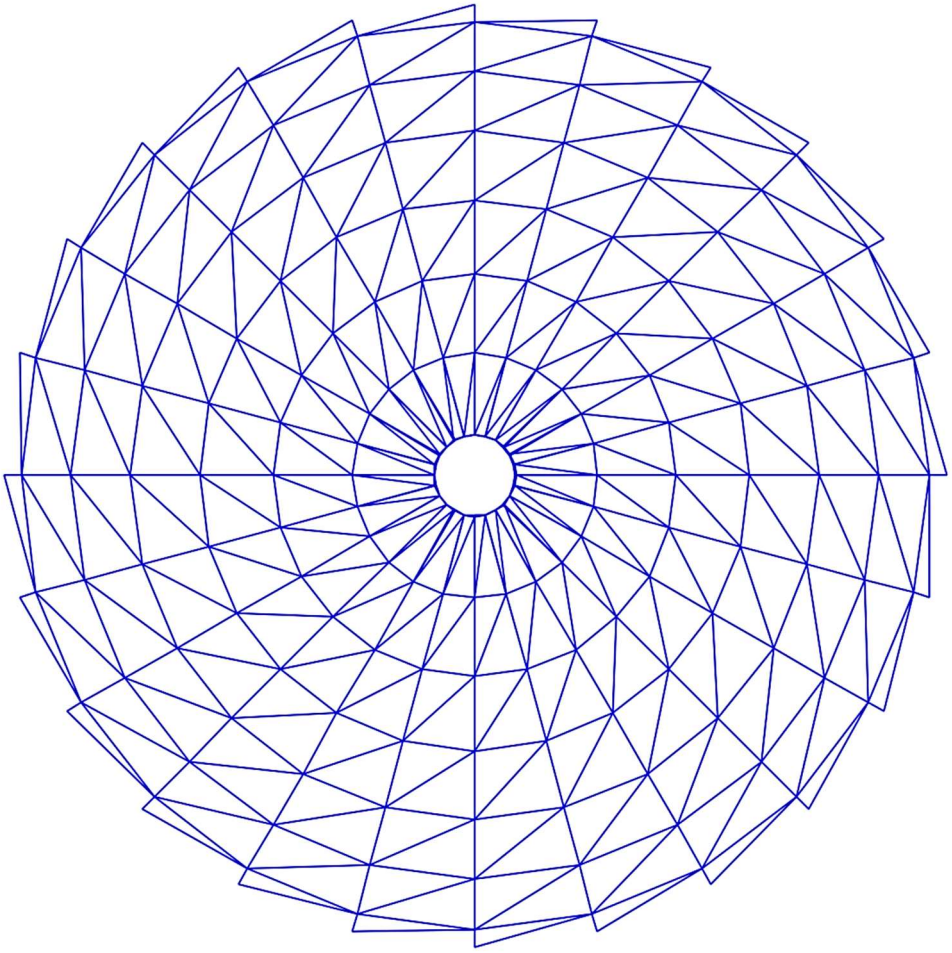
Tek katmanlı çelik kubbelerin analizi; kubbenin boyutu, geometrisi, malzeme özellikleri ve yükleme koşulları gibi faktörlere bağlıdır. Yapısal davranışı, kubbe geometrisine ve kubbenin yükleme durumuna göre farklılık gösterir. Tek katmanlı çelik kubbelerin yapısal analizi, öncelikle kubbenin geometrisi, yük dağılımı ve malzeme özellikleri gibi girdi parametrelerinin tanımlanmasıyla başlar. Daha sonra, kubbenin statik denge koşulları, gerilme ve deformasyonları, moment ve burulma değerleri gibi çeşitli performans ölçütleri hesaplanır. Kubbenin statik analizi, kubbenin üzerine etki eden yükleri ve kubbenin taşıma kapasitesini değerlendirir. Genellikle, kubbenin üzerine etki eden yükler; rüzgâr, kar, yaşadığı yerin deprem koşulları gibi dış etkenler ve kubbenin öz ağırlığı ile hareketli yük gibi iç etkenlerdir. Yük analizi, kubbenin taşıma kapasitesini hesaplamak için kullanılan temel verileri sağlar. Kubbenin gerilme analizi, kubbenin yük altında nasıl davrandığını ve kubbenin her bölgesinde oluşan gerilmeleri hesaplar. Kubbenin deformasyon analizi ise, kubbenin yük altında nasıl şekil değiştirdiğini hesaplar. Bu analizler, kubbe üzerinde oluşan gerilme ve deformasyonlar gibi önemli bilgileri verir. Kubbenin moment ve burulma analizi, sistemin çubuk elemanlarının moment ve burulma alma kapasitesini değerlendirir. Bu analizler, kubbenin çubuk elemanlarının maksimum moment ve burulma değerlerini belirler. Kubbenin moment ve burulma kapasitesi, çubuk elemanların geometrisi, malzeme özellikleri ve kubbenin yük taşıma karakteristiği gibi faktörlere bağlıdır.

3.9.1 Model-2 sistem bilgileri

Model-2 Kubbe sistemi; 600 eleman, 216 moment aktaran düğüm noktasından (kaynaklı birleşim) oluşan, tek katmanlı ve açıklığı 28 metre yüksekliği 7,5 metre, basınç halkasının çapı 2 metre, çekme halkasının çapı 24 metreden oluşmaktadır. Kubbe 24 özdeş meridyen kafes sisteminden ve 7 paralel halkadan oluşmaktadır. Kubbe modelinin perspektif ve plan görünümü Şekil 3.73 - 3.74'te gösterilmiştir. Model sistemlerinin uygulanacağı konum olarak Diyarbakır ilinde Dicle Üniversitesi arazisi seçilmiştir.



Şekil 3. 73 Model-2 perspektif görünüşü



Şekil 3. 74 Model-2 plan görünüşü

3.9.2 Model-2 malzeme ve kesit bilgileri

Model-2elemanları için seçilen malzeme sınıfı, akma gerilmesi 355 MPa olan S355 çeliği olarak Tablo 3.4'te özellikleri verilmiştir. Çelik malzemesinin mekanik özellikleri model-1 de olduğu gibi EN 1993-1-1 standardı 3.2.6 maddesinde belirlenen değerler alındı.

Model-2 kaplama malzemesi olarak Model-1' ile aynı etkin kaplama sistemlerinden olan lamine cam kaplama kullanılmıştır.

Modelde kullanılan kesit özellikleri kubbe gerilme dağılımına göre tercih edilmiştir. Sistemde meridyen kirişler Tablo 3.17'de verilen IPE profil, çember ve diyagonal elemanlar ise Tablo 3.16'da verilen kutu profil olarak gruplandırılarak seçilmiştir.

Tablo 3. 16 Model-2 için çember ve diyagonal eleman kesit listesi (BS EN 10210-2, 2006)

No	Profil	Kesit Ölçüsü (mm)	Et Kalınlığı (mm)	Ax10^2 (mm^2)
1	TUBO-70x70x3	70	3	8,04
2	TUBO-70x70x3,2	70	3,2	8,55
3	TUBO-70x70x3,6	70	3,6	9,56
4	TUBO-70x70x4	70	4	10,56
5	TUBO-70x70x5	70	5	13,00
6	TUBO-70x70x6	70	6	15,36
7	TUBO-80x80x3,2	80	3,2	9,83
8	TUBO-80x80x3,6	80	3,6	11,00
9	TUBO-80x80x4	80	4	12,16
10	TUBO-80x80x5	80	5	15,00
11	TUBO-80x80x6	80	6	17,76
12	TUBO-90x90x3,6	90	3,6	12,44
13	TUBO-90x90x4	90	4	13,76
14	TUBO-90x90x5	90	5	17,00
15	TUBO-90x90x6	90	6	20,16
16	TUBO-100x100x3	100	3	11,64
17	TUBO-100x100x3,6	100	3,6	13,88
18	TUBO-100x100x4	100	4	15,36
19	TUBO-100x100x5	100	5	19,00
20	TUBO-100x100x6	100	6	22,56
21	TUBO-120x120x3	120	3	14,04
22	TUBO-120x120x4	120	4	18,56
23	TUBO-120x120x5	120	5	23,00
24	TUBO-120x120x6	120	6	27,36
25	TUBO-140x140x4	140	4	21,76
26	TUBO-140x140x5	140	5	27,00
27	TUBO-140x140x6	140	6	32,16
28	TUBO-150x150x4	150	4	23,36
29	TUBO-150x150x5	150	5	29,00
30	TUBO-150x150x6	150	6	34,56

Tablo 3. 17 Model-2 için meridyen kiriş eleman kesit listesi (BS EN 10365, 2017)

No	Profil	Başlık Genişliği (mm)	Gövde Uzunluğu (mm)	Ağırlık (kg/m)	Ax10^2 (mm^2)
1	IPE-100	55	100	6,9	10,3
2	IPE-120	64	120	10,4	13,2
3	IPE-140	73	140	12,9	16,4
4	IPE-160	82	160	15,8	20,1
5	IPE-180	91	180	18,8	23,9
6	IPE-200	100	200	22,4	28,5
7	IPE-220	110	220	26,2	33,4
8	IPE-240	120	240	30,7	39,1
9	IPE-270	135	270	36,1	45,9
10	IPE-300	150	300	42,2	53,8
11	IPE-330	160	330	49,1	62,6
12	IPE-360	170	360	57,1	72,7
13	IPE-400	180	400	66,3	84,5

3.9.3 Model-2 hesap metodunda kullanılan yükler

Bu bölümde model-2 için; sabit, hareketli, kar, rüzgâr, deprem ve sıcaklık yükleri sayısal olarak hesaplanmıştır ve programa ataması yapılmıştır.

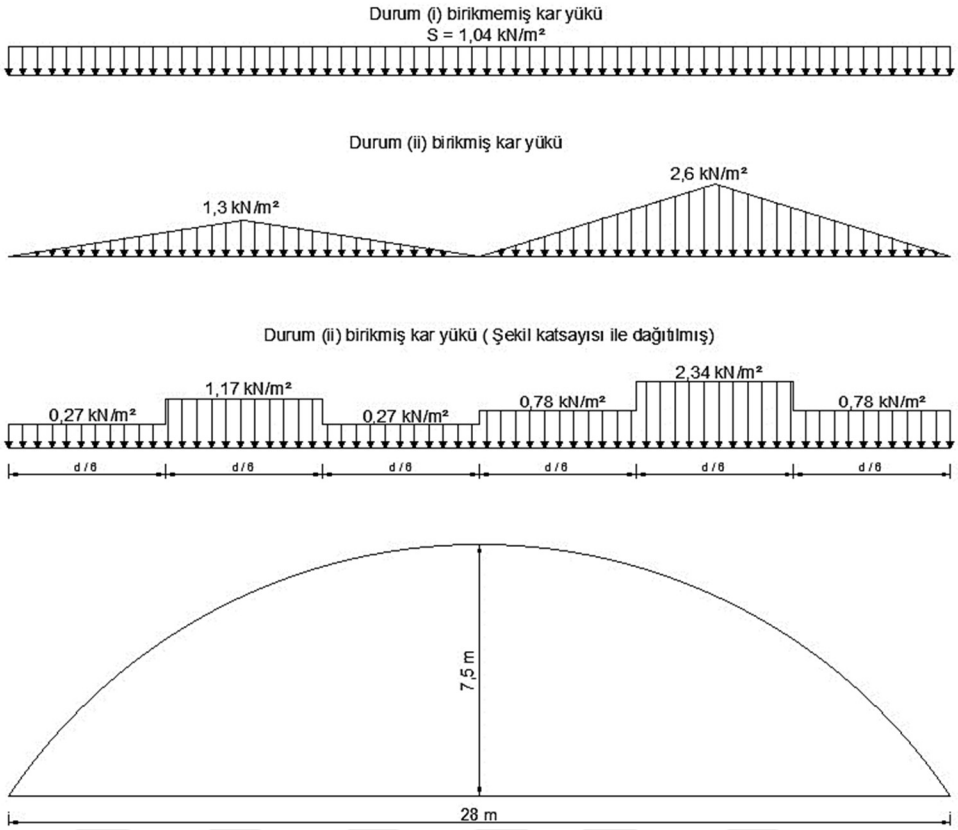
3.9.3.1 Sabit ve hareketli yük

Model-2 sisteminde kullanılacak profil değerlerinin ağırlığı SAP2000 programında atanan kesit değerlerine göre otomatik olarak hesaplanacaktır. Bunun dışında sistemin kaplama malzemesi model-1 ile aynı olacağı için; kaplama ve servis yüklerinin toplam sabit yük değeri, madde 3.8.3.1'de hesaplanan G_{Toplam}=0,5 kN/m^{2}değeri dikkate alınmıştır.

Hareketli yük değeri de model-1'de belirtildiği gibi TS 498'e göre temizlik veya periyodik bakım için yapılan çalışmalar sırasında oluşacak çatı hareketli yük değeri $Q_{Hareketli}$= 1,5 kN/m^2 olarak belirlenmiştir. Çatı yük kombinasyonlarında rüzgâr ve kar yükü ile birlikte hareketli yük hesaba katılmamıştır.

3.9.3.2 Kar yükü

Model-2 sistemi model-1 ile aynı arazi şartlarında olduğu için kar yükü değeri aynı alınabilir. Böylece çatı kar yükü değeri S_K = 1,3 kN/m^{2}olarak alınmıştır. Model bilgilerine göre belirlenen ve Şekil 3.41'de gösterildiği gibi kar yükü şekil katsayısına bağlı olan kar yükü, Şekil 3.75'de gösterilmiştir. Şekil 3.75'de birikmiş kar yükü olan durum (ii) yükü, geometrik katsayılarına göre dağıtılarak alternatif yükleme durumu elde edilmiştir (Maten, 2011).



Şekil 3. 75 Model-2 için Durum (i) birikmemiş kar yükü ve durum (ii) birikmiş kar yükü dağılımı

3.9.3.3 Rüzgâr yükü

Rüzgâr yükü dağılımında, kubbe sisteminin geometrik özellikleri ön planda olduğu için sisteme etki edilecek rüzgâr yükü değeri tekrar hesaplanmalıdır. TS EN 1991-1-4 standardında bulunan değişkenler kullanılarak denklem 3.6 eşitliğinden ortalama rüzgâr hızı hesaplanır. Model-2 sistemi, model-1 sistemi ile aynı uygulama alanına göre hesaplandığı için iklim etkilerine bağlı ortalama rüzgâr hızı olan $V_m(z)$ değeri model-1 ile aynı alınmıştır. ($V_m(z)$= 29,12 m/s)

Esas rüzgâr hızına bağlı olan rüzgâr basıncı q_b değeri model-1 ile aynı alınarak denklem 3.12'a göre tepe hız kaynaklı rüzgâr basıncı olan $q_p(z)$ değeri hesaplanabilir. Arazi kategorisine bağlı ve yüksekliğin bir fonksiyonu olan $C_e(z)$ değeri Şekil 3.78'e göre 2,15 olarak bulunmuştur

$q_p(z) = (0,765) * (2,15) = 1,64 kN/m^2$

Rüzgâr yükünün kubbe modelinde oluşturduğu dış basınç değeri denklem 3.13'e göre hesaplanır. Burada Şekil 3.77'de verilen kubbe bölgelerinde basınç katsayısı değerlerine göre yük dağılımı belirlenir. Dış basınç katsayısı ve basınç yükü değerleri Tablo 3.18'deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 3. 18 Model-2 için A, B ve C noktalarında dış basınç katsayısı (C_{pe}) ve dış basınç (W_e) değerleri

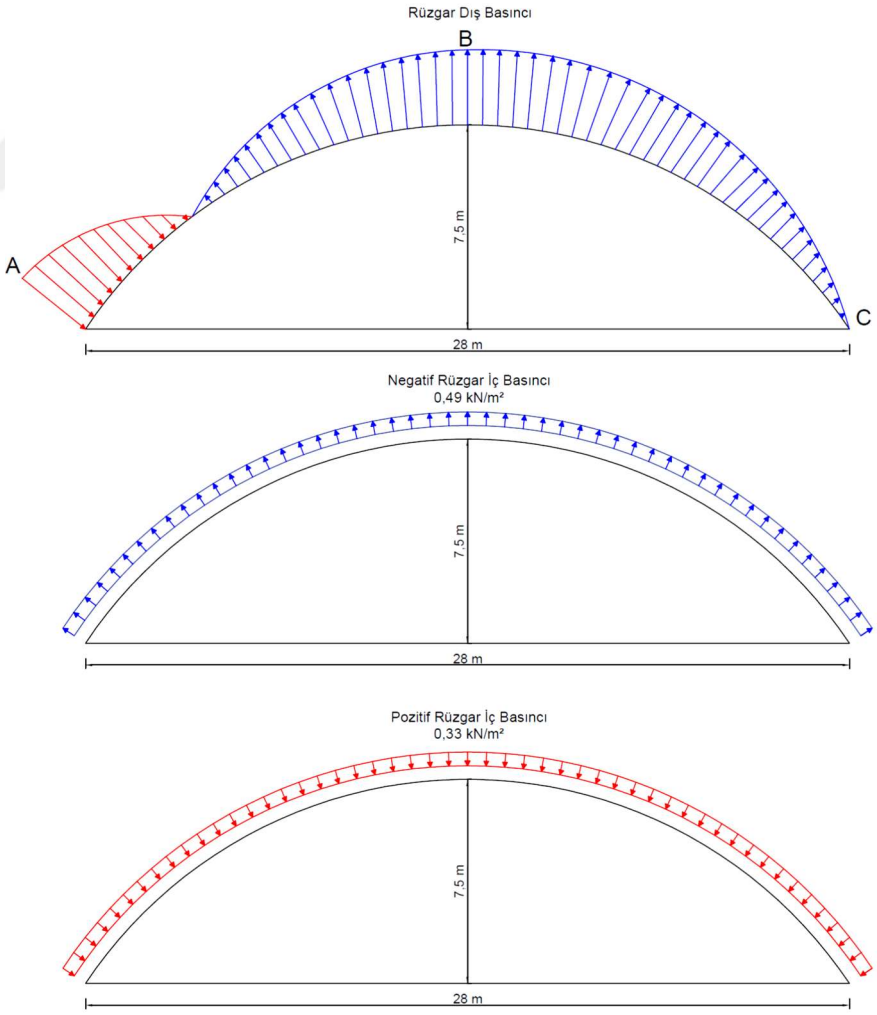
Nokta	A	B	C
C_{pe}	+ 0,47	- 0,72	0,00
W_e (kN/m^2)	0,77	- 1,18	0,00

Rüzgâr yükünün kubbe modelinde oluşturduğu iç basınç katsayı değerleri ise yönetmeliğin tavsiye ettiği +0,2 ve -0,3 değerleri olarak alınmıştır. Bu basınç katsayı değerlerine göre kubbe yüzeyinde oluşan basınç yükü Tablo 3.19'da gösterilmiştir.

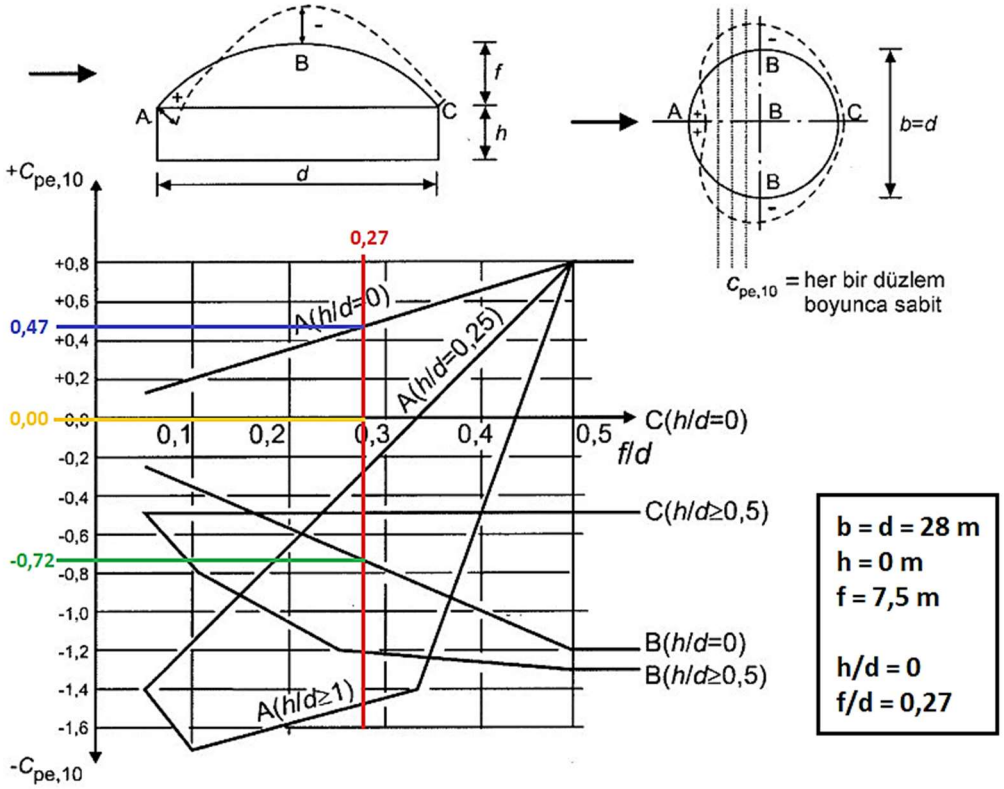
Tablo 3. 19 Model-2 için dış basınç katsayısı (C_{pi}) ve dış basınç (W_e) değerleri

Basınç Yönü	Pozitif iç basınç	Negatif iç basınç
C_{pi}	+ 0,2	- 0,3
W_i (kN/m^2)	0,33	- 0,49

Model-2 için hesaplanan iç ve dış rüzgâr basınç değerleri Şekil 3.76'da gösterilmiştir. Bu değerler sistem üzerine şekilde de görüldüğü üzere lokal olarak etki edilmiştir.

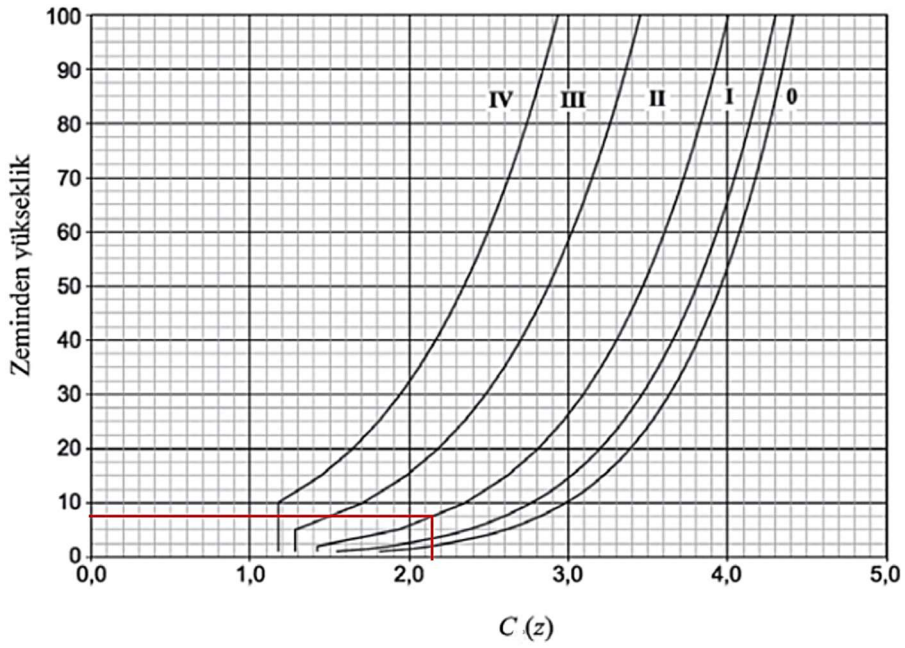


Şekil 3. 76 Model-2 için kubbe üzerindeki rüzgâr dağılımları



$c_{pe,10}$, dairelerin yayları, kürelerin kesişim noktaları ve rüzgâra dik düzlemler boyunca sabittir; ilk yaklaşım olarak, rüzgâra paralel daire yayları boyunca A,B ve C noktalarındaki değerler arasında doğrusal interpolasyon yapılarak hesaplanabilir. Aynı şekilde 0<h/d<1 ise A noktasındaki $c_{pe,10}$ değerleri ve 0<h/d<0,5 ise B ve C noktalarındaki $c_{pe,10}$ değerleri yukarıdaki şekilden doğrusal interpolasyon yapılarak elde edilebilir.

Şekil 3. 77 Model-2 için C_{pe},10 dış basınç katsayıları (TS EN 1991 1-4, 2005)



Şekil 3. 78 Model-2 için $C_e(z)$ maruz kalma katsayısının grafik gösterimi katsayıları (TS EN 1991 1-4, 2005)

3.9.3.4 Deprem yükü

Deprem yükü, bir bölgenin yerel jeolojik özellikleri, deprem büyüklüğü, yerin titreme şekli, yapıların yüksekliği, ağırlığı, dayanıklılığı, tasarımı ve diğer faktörler gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Ancak aynı bölgedeki yapılar, aynı yer hareketlerine maruz kalmaları nedeniyle benzer deprem yükleriyle karşı karşıya kalırlar. Dolayısıyla spektrum değerleri model-1'de olduğu gibi model-2 sistemi içinde aynı şekilde kullanılmıştır. Deprem yükü verileri Şekil 3.50 ve Şekil 3.51'de olduğu gibi sisteme aktarılmıştır. Ayrıca, model için Mod Birleştirme yöntemi incelenerek yapıların davranışları daha detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

3.9.3.5 Sıcaklık yükleri

Model-1 sisteminde olduğu gibi model-2 sisteminde de sıcaklık değişimi sonucu oluşan gerilmeler karakteristik olarak hesaba katılmıştır. Hesaba katılan sıcaklık değeri model-1'de belirtilen sıcaklık değeri ile aynı değerde alınmıştır. Sıcaklık farkı ±20 ºC olarak Şekil 3.52'de olduğu gibi elemanlara tatbik edilmiştir. Sıcaklık etkisi, sistem yükünü kritik düzeyde artırmadığı için kombinasyonlara dâhil edilmemiştir. Ancak sistem davranışı ile ilgili bilgi vermesi için karakteristik olarak incelenmiştir.

3.9.4 Model 2 analiz sonuçları

Model-2 sistemi SAP2000 programında YDKT yük birleşimleriyle analizi yapılmış ve AISC 360-10 yönetmeliğine göre tasarım yapılmıştır. Programda modal analiz, eksenel yük ve moment diyagramları ile birlikte yük altında deplasman değerleri de ölçülmüş olup sınır kontrolleri yapılmıştır.

3.9.4.1 Model-2 için modal analiz sonuçları

Modal hesap yönteminde TBDY-2018 4.8.1.2 maddesine göre kullanılan titreşim mod sayısı Denklem 3.20'de de belirtildiği gibi seçilmiştir.

Model-2 sistemlerinde, yönetmelik tavsiyesi doğrultusunda global 3 hareket doğrultusundaki kütle katılım miktarları Tablo 3.20'de görüldüğü üzere %95'ten az olmayacak şekilde mod sayıları belirlenmiştir.

Tablo 3. 20 Model-2 için modal analizinde hesaba katılan kütle oranları

MOD	Periyod, sn	Sum UX	Sum UY	Sum UZ	Sum RZ
MOD 1	0,165772	0,22757	0,23654	3,656E-19	1,458E-19
MOD 2	0,165772	0,4641	0,4641	4,528E-19	2,816E-19
MOD 3	0,13809	0,4641	0,4641	9,178E-16	3,453E-16
MOD 4	0,13809	0,4641	0,4641	4,321E-15	2,85E-15
MOD 5	0,123517	0,4641	0,4641	1,818E-12	3,401E-13
MOD 6	0,123517	0,4641	0,4641	1,876E-12	4,837E-13
MOD 7	0,119033	0,47821	0,61299	3,437E-12	1,821E-12
MOD 8	0,119033	0,6271	0,6271	3,445E-12	1,865E-12
MOD 9	0,117153	0,6271	0,6271	0,0182	0,05564
MOD 10	0,116079	0,6271	0,6271	0,0182	0,05564
MOD 11	0,116079	0,6271	0,6271	0,0182	0,05564
MOD 12	0,109755	0,6271	0,6271	0,0182	0,05564
MOD 13	0,109755	0,6271	0,6271	0,0182	0,05564
MOD 14	0,105411	0,6271	0,6271	0,0182	0,05564
MOD 15	0,105411	0,6271	0,6271	0,0182	0,05564
MOD 16	0,104225	0,6271	0,6271	0,0182	0,05564
MOD 17	0,104225	0,6271	0,6271	0,0182	0,05564
MOD 18	0,10168	0,6271	0,6271	0,07323	0,05567
MOD 19	0,0996	0,6271	0,6271	0,07323	0,05567
MOD 20	0,0996	0,6271	0,6271	0,07323	0,05567
MOD 21	0,09597	0,6271	0,6271	0,07323	0,05567
.	.	.	.	.	.
MOD 227	0,011726	0,99303	0,99303	0,97624	0,99893

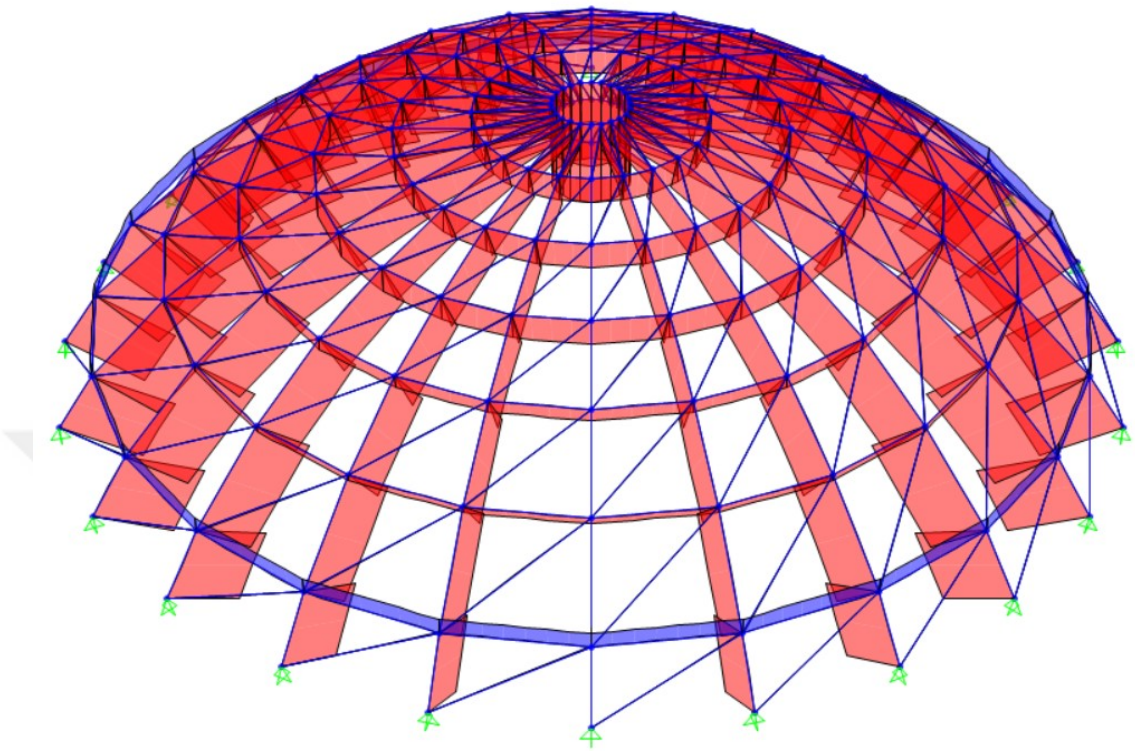
3.9.4.2 Model-2 için moment ve eksenel yük diyagramları

Model-2 tek katmanlı ve çubuk birleşim elemanları moment aktaracak şekilde birbirine bağlanmıştır. Bu yüzden çubuk elemanlarda eksenel yük ile birlikte kesme ve moment kuvveti de oluşacaktır. Analiz sonucunda elde edilen karekteristik yük altında oluşan; eksenel yük ve moment diyagramlarının bazıları aşağıda verilmiştir.

Sabit yük altında eksenel yük diyagramı

Çubukların öz ağırlığı, kaplama ve ek servis yükleri sonucu oluşan ağırlığın yarattığı eksenel yük diyagramı Şekil 3.79'da gösterildiği gibidir. Tek katmanlı olan bu modelde tüm yay kirişler eksenel basınç gerilmesi altında kalmaktadır. Paralel çemberlerde ise, etek kısmındaki çemberde çekme diğer çemberlerde basınç gerilmesi oluşmaktadır. Gerilme dağılımı Şekil 3.79'da gösterilmektedir. Kiriş yaylarda en büyük basınç kuvveti etek bölümünde oluşmakta ve 26,59 kN değerindedir.

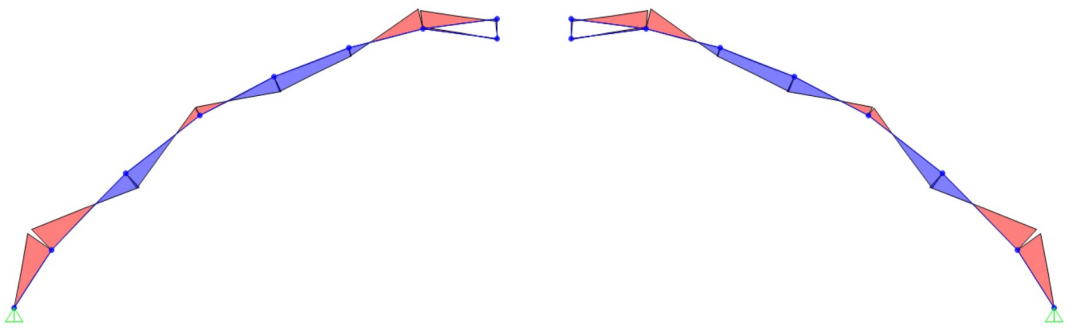
Paralel çemberlerde en büyük basınç gerilmesi 25,55 kN değerinde tepe çemberidir. Çekme çemberi olan etek çemberinin eksenel gerilmesi ise 4,54 kN ‘dur.



Şekil 3. 79 Sabit yük altında kubbe sisteminde oluşan eksenel yük diyagramı

Hareketli yük altında moment diyagramı

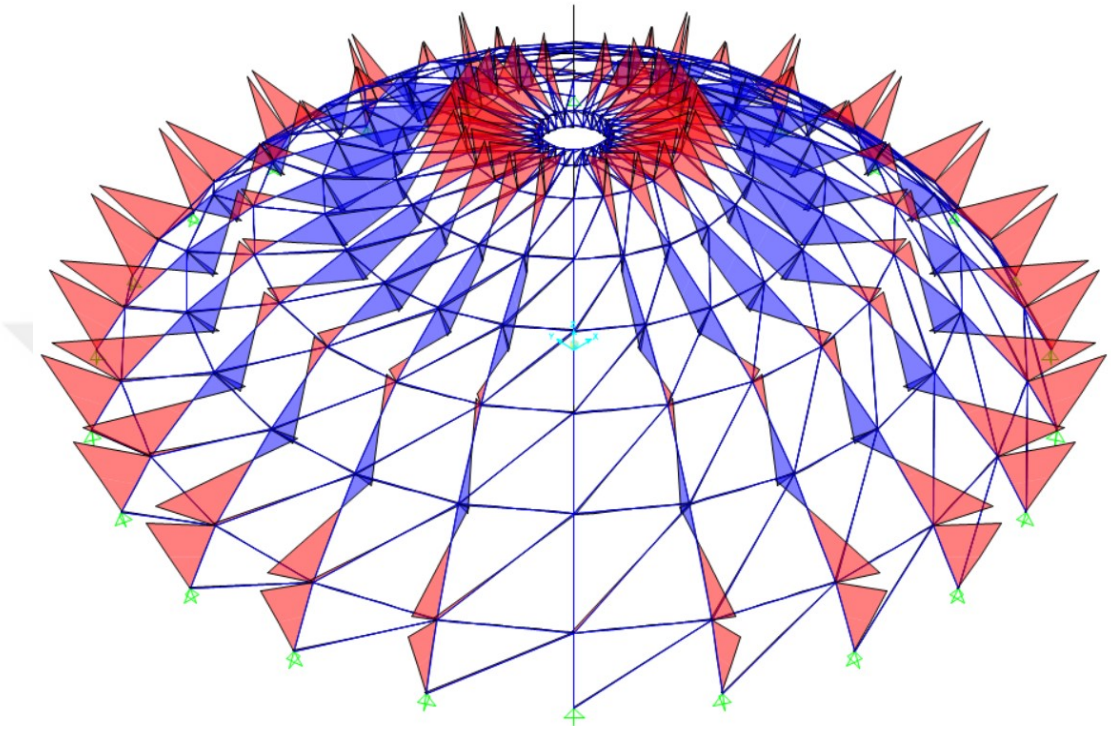
Çatı üzerinde periyodik bakım ya da onarım sonucu oluşan hareketli yükler sonucu oluşan Moment diyagramı Şekil 3.80’de gösterildiği gibidir. Çemberlerin geldiği kiriş noktalarında maksimum moment oluşmakta olup. Sistem üzerinde maksimum moment değeri; pozitif yönde 0,73 kN.m ve negatif yönde 1,09 kN.m’dir.



Şekil 3. 80 Hareketli yük altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı

Tam kar yükü altında moment diyagramı

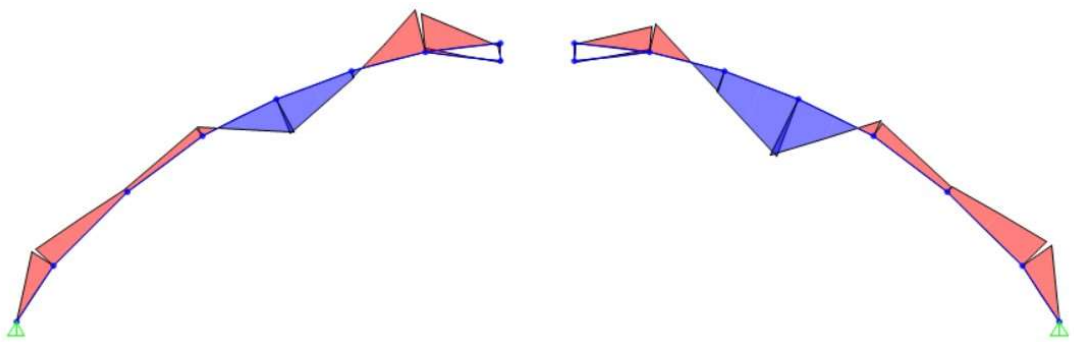
Kubbe üzerinde kar yükünün her alana düzgün yayılı olarak etki ettirilmesi ile oluşan moment diyagramı Şekil 3.81'de gösterildiği gibidir. Sistem üzerinde maksimum moment değeri; pozitif yönde 0,46 kN.m ve negatif yönde 0,8 kN.m'dir.



Şekil 3. 81 Tam kar yükü altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı

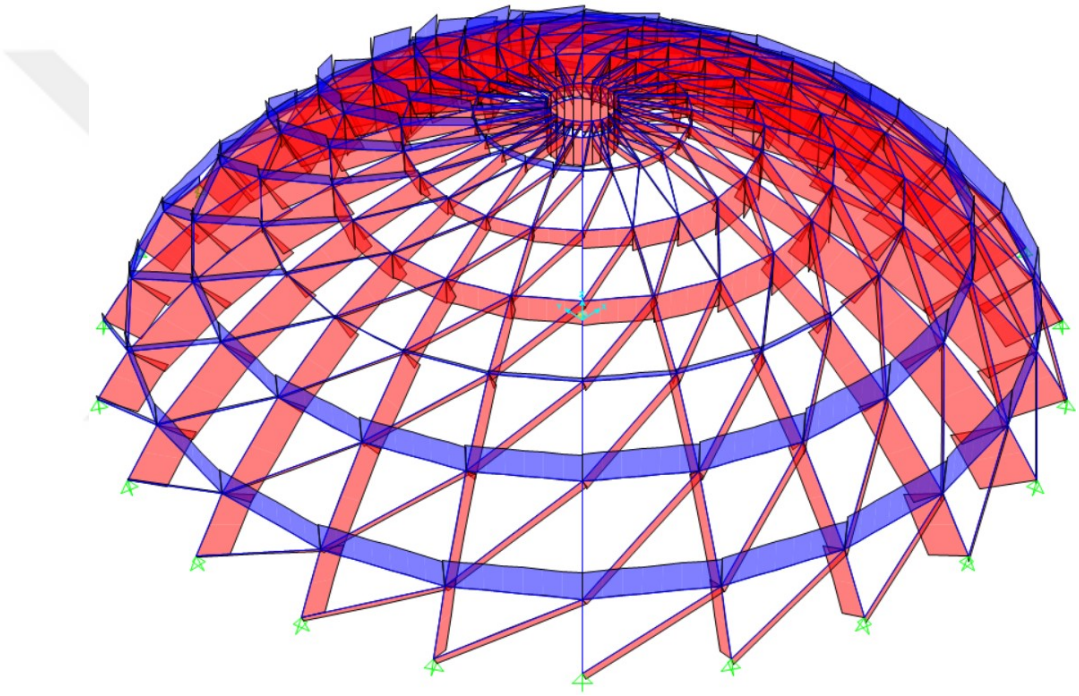
Sağ kar yükü altında moment diyagramı

Yarım kar yükü, kubbe yüzeyinde eşit değerlere sahip değildir ve bu durum yerel hatta global burkulmaya neden olabileceği için kritik sonuçlar doğurabilmektedir. Şekil 3.82'de gösterildiği üzere kiriş üzerinde pozitif yönde maksimum moment 1,66 kN.m ve negatif yönde maksimum moment 1,13 kN.m'dir



Şekil 3. 82 Yarım kar (sağ) yükü altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı

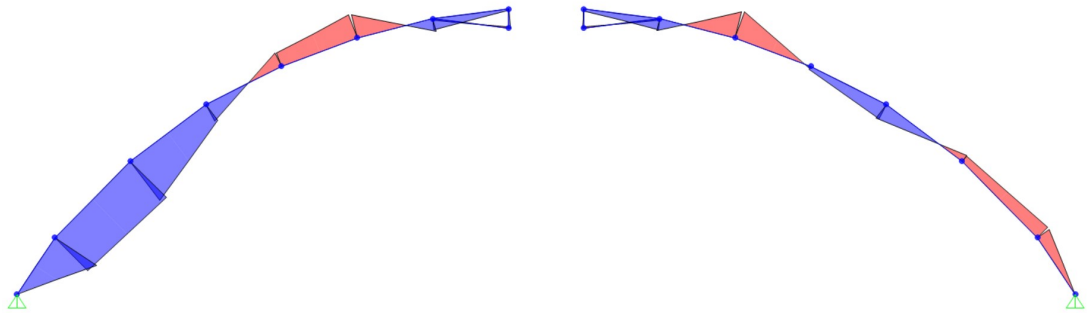
Kubbe tasarımında kullanılan diyagonal elamanlar kubbede stabilite sağlamaktadır. Bu elemanlar, çelik yapıdaki düzlemsel yüzeylere yüklerin eşit şekilde dağılmasını sağlarlar. Böylece yapı, herhangi bir yönde eğilmeden daha sağlam bir şekilde durabilir. Özellikle eşit dağılmamış yükleme durumunda Bu elemanlar bölgesel olarak hem çekme hem de basınç gerilmesine maruz kalabilmektedir. Şekil 3.83'te kubbe modeli yarım kar yüküne maruz kalmaktadır bu yükleme sonucu şekilde de görüleceği üzere diyagonal elemanlar bölgesel olarak eksenel çekme ve eksenel basınç gerilmelerine maruz kalarak yapının dayanıklılığını arttırmakta ve yapıya ek bir stabilite sağladığı için önemli bir yapısal öğedir.



Şekil 3. 83 Yarım kar (sağ) yükü altında kubbe sisteminde oluşan eksenel yük diyagramı

Dış rüzgâr (W_{EX}) yükü altında eksenel yük diyagramı

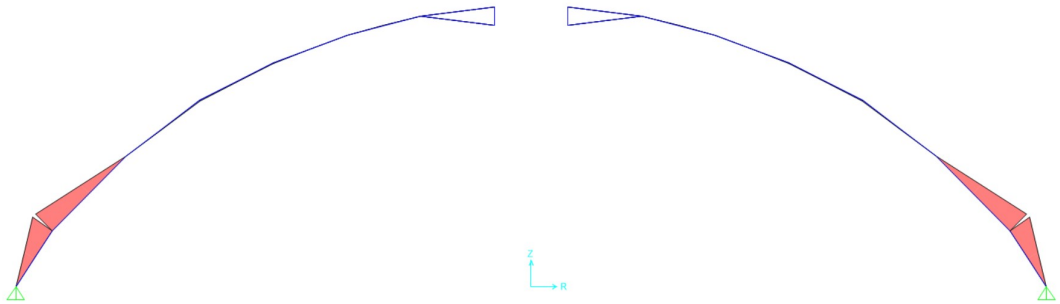
Dış rüzgâr yükü kubbenin dış yüzeyinde oluşturduğu basınç ve vakum etkisinden kaynaklı gerilmelere maruz kalır. Şekil 3.84'te X yönünden etki ettirilen dış rüzgâr yükünün kubbe kirişinde oluşturduğu moment diyagramı görülmektedir. Bu yük sonucu kubbe kirişinde oluşan en büyük pozitif moment 0,68 kN.m ve en büyük negatif moment 0,36 kN.m'dir. Sağ kar yüklemesi gibi bu yükleme de kubbe yüzeyindeki yük dağılımını asimetrik olarak oluşturduğu için kubbe burkulmasında kritik değerler oluşturabilmektedir.



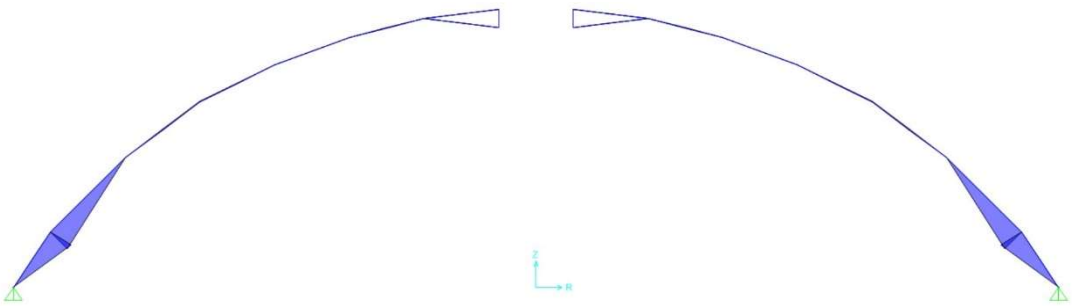
Şekil 3. 84 Dış rüzgâr yükü altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı

Termal yükün (T+ ve T-) çubuklarda oluşturduğu moment diyagramı

Sıcaklık değişiminin çelik çubuklarda genleşme ve büzülme etkileri sistemsel olarak gerilmelere neden olduğu bilinmektedir. Sıcaklık değişiminin kubbe kirişinde yarattığı moment diyagramı Şekil 3.85 ve Şekil 3.86'da gösterildiği gibidir. Sıcaklık değişimi sonucu oluşan en büyük pozitif moment değeri 2,82 kN.m ve en büyük negatif moment 2,18 kN.m 'dir.



Şekil 3. 85 Termal yük (T+) altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı



Şekil 3. 86 Termal yük (T-) altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı

3.9.5 Model-2 için yer değiştirme kontrolü

Deplasman, yapı elemanlarının uygulanan yükler veya sıcaklık değişimleri gibi nedenlerle yer değiştirmesi anlamına gelir. Çelik kubbelerde deplasman, genellikle büyük ölçekli yapısal deformasyonlar veya çelik elemanların termal genleşmesi gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Bu nedenle, çelik kubbelerin tasarımında deplasmanların ve yer değiştirmelerin kontrol edilmesi önemlidir. Bu genellikle yapısal hesaplamalar ve çelik elemanların boyutlandırılması yoluyla yapılır.

Kubbe sistemlerindeki yük maruziyeti neticesinde oluşan deplasman, yapısal bütünlük ve güvenlik açısından önemlidir. Bu nedenle, deplasman sınırları, yapıların tasarım aşamasında belirlenir ve bu deplasmanın belirli bir sınırın altında kalması gerektiği kabul edilir.

3.9.5.1 Düşey yer değiştirme durumu

Düşey deplasmanların, yapısal bütünlük ve dayanıklılık açısından önemli bir etkisi vardır. Yapıların hasar görmesine veya çökmesine neden olabilecekleri için izlenmeli ve kontrol edilmelidir Yer değiştirmenin düşey eksende kontrolü için ÇYTHYEY madde 15.1 not(a) esas alınarak Tablo 3.3'de belirtilen ve yer değiştirme kontrolünde esas alınan 1,2 ve 3 numaralı kombinasyonlar kullanarak maksimum yer değiştirme sınırı ÇYTHYEY madde 15.2'ye göre düşey yer değiştirmenin açıklığa oranı 1/300 sınırını aşmamalıdır. En büyük deplasman G+0,5Q+W_1 kombinasyonunda oluşmuş olup düşey olarak en büyük 3,72 mm deplasman yapmıştır

$$\delta_d = 3{,}72 \text{ mm} < \frac{28x10^3}{300} = 93 \text{ mm}$$

Düşey deplasman değeri kontrolü ile deplasman sınırı aşılmadığı görülmektedir.

Kritik deplasman yük kombinasyonu altında düğüm noktaları için düşey deplasman değerleri Şekil 3.87'de metre birimi cinsinden renklendirilmiştir.



Şekil 3. 87 Düşey yer değiştirme kontrolünün G+0,5Q+W_1 yük kombinasyonu altında deplasmanı

3.9.5.2 Yatay yer değiştirme durumu

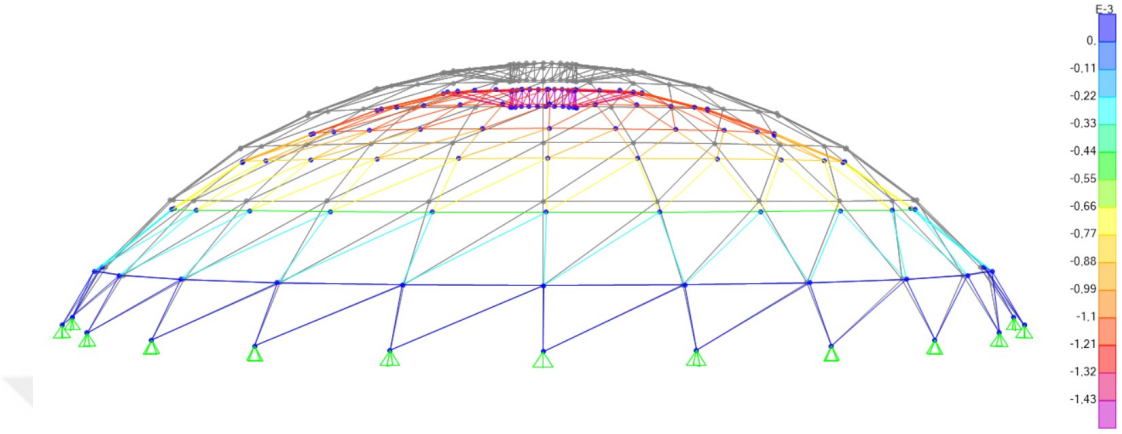
Kubbelerdeki yatay deplasman, yapısal bütünlük ve dayanıklılık açısından önemlidir. Bu nedenle, kubbeler tasarım aşamasında yatay deplasman sınırları belirlenir ve normal işletme sırasında belirli bir sınırın altında kalması gerektiği kabul edilir. Yer değiştirmenin yatay eksende kontrolü için ÇYTHYEY madde 15.1 not(d) esas alınarak Tablo 3.3'te belirtilen ve yer değiştirme kontrolünde esas alınan 4 ve 5 numaralı kombinasyonlar kullanarak maksimum yer değiştirme sınırı ÇYTHYEY madde 15.3'e göre sistemin cephe kaplaması ve türü bu deplasman durumu göz önüne alınarak seçilmelidir. Şekil 3.88'de düğüm noktaları için yatay deplasmanın maksimum değeri metre birimi cinsinden verilmiştir. En büyük deplasman G+0,5Q+W_1 kombinasyonunda oluşmuş olup düşey olarak en büyük 3,22 mm deplasman yapmıştır



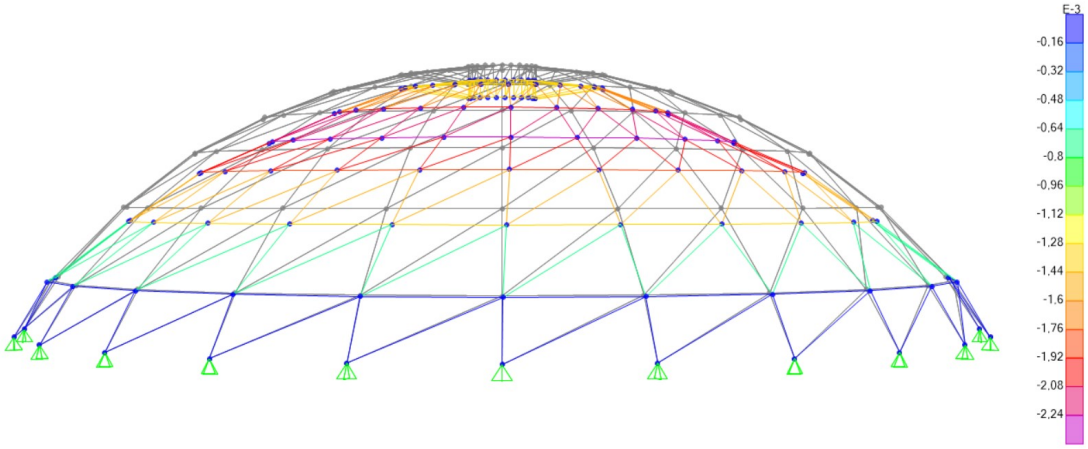
Şekil 3. 88 Yatay yer değiştirme kontrolünün G+0,5Q+W_1 yük kombinasyonu altında deplasmanı

3.9.5.3 Karakteristik yükler altında yer değiştirme durumu

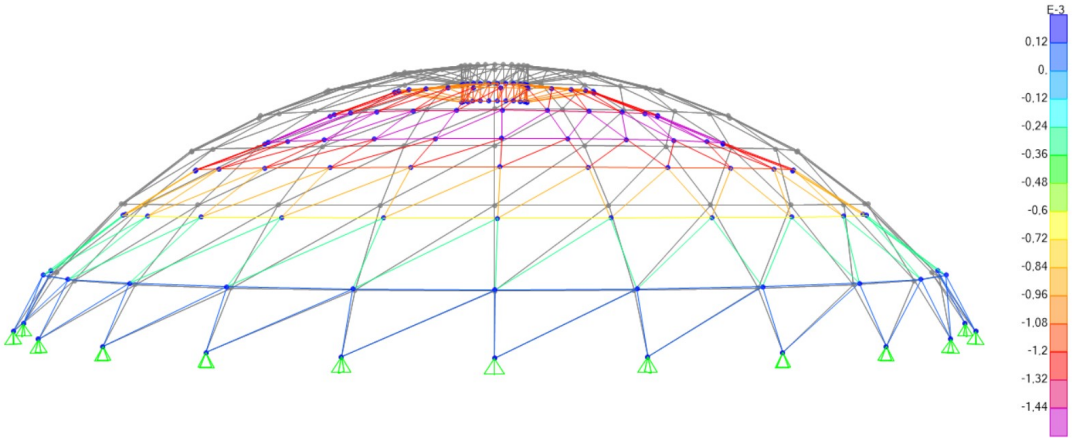
Bazı karakteristik yükler altında kubbe üzerinde oluşan U_Z yönündeki düşey yer değiştirmeler aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



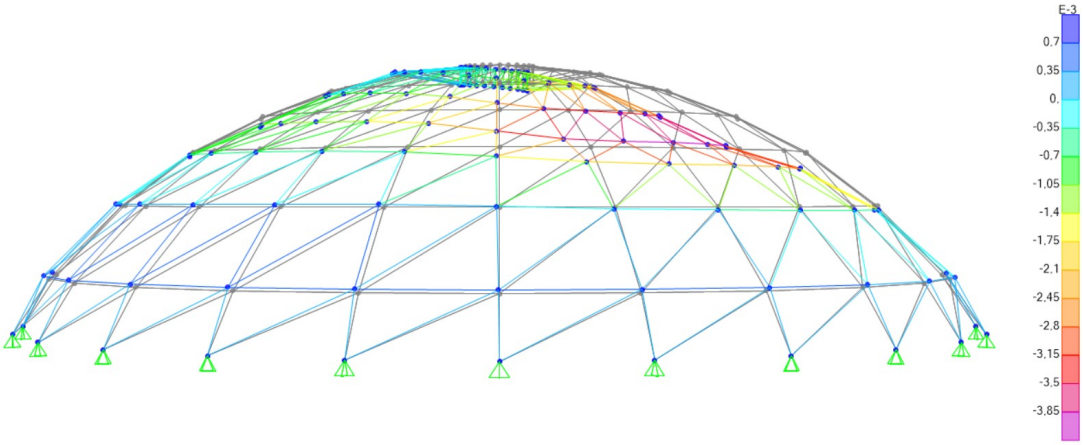
Şekil 3. 89 Sabit yük (G) altında düşey deplasman durumu



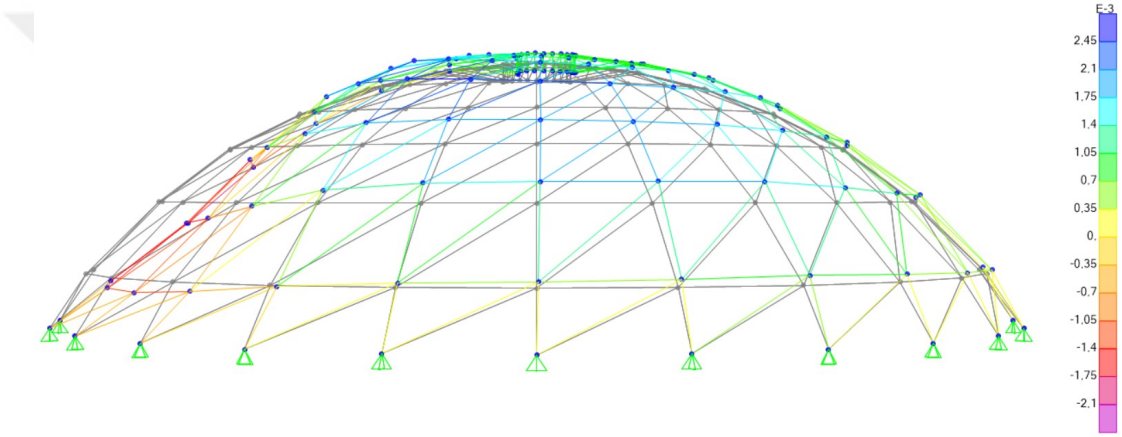
Şekil 3. 90 Hareketli yük (Q) altında düşey deplasman durumu



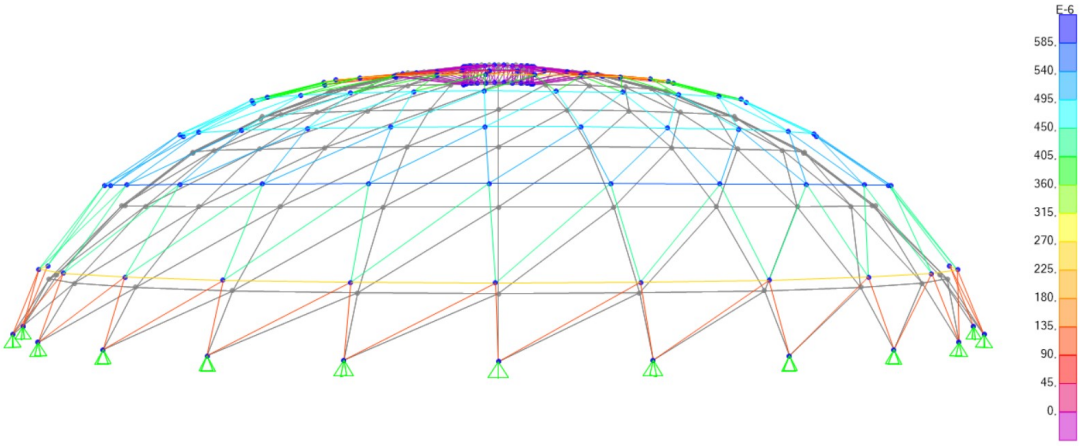
Şekil 3. 91 Tam kar yükü (S_{Tam}) altında düşey deplasman durumu



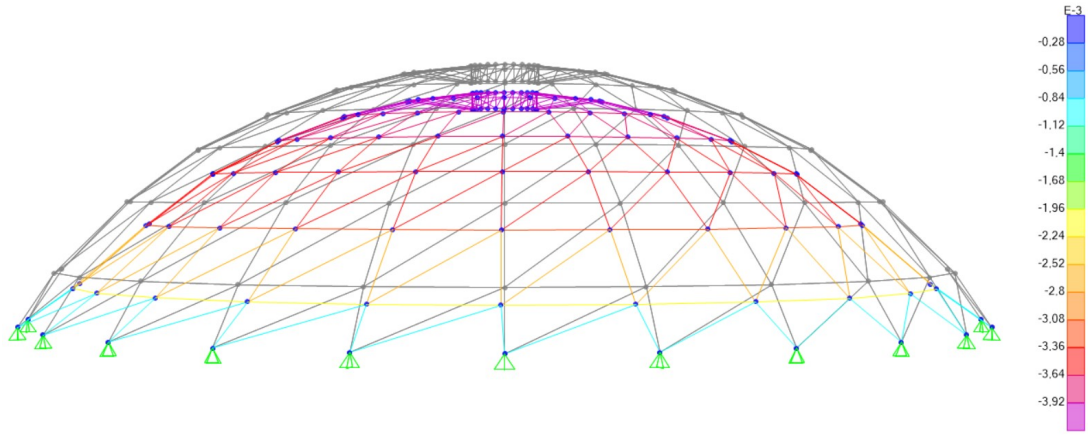
Şekil 3. 92 Yarım kar yükü ($S_{Sağ}$) altında düşey deplasman durumu



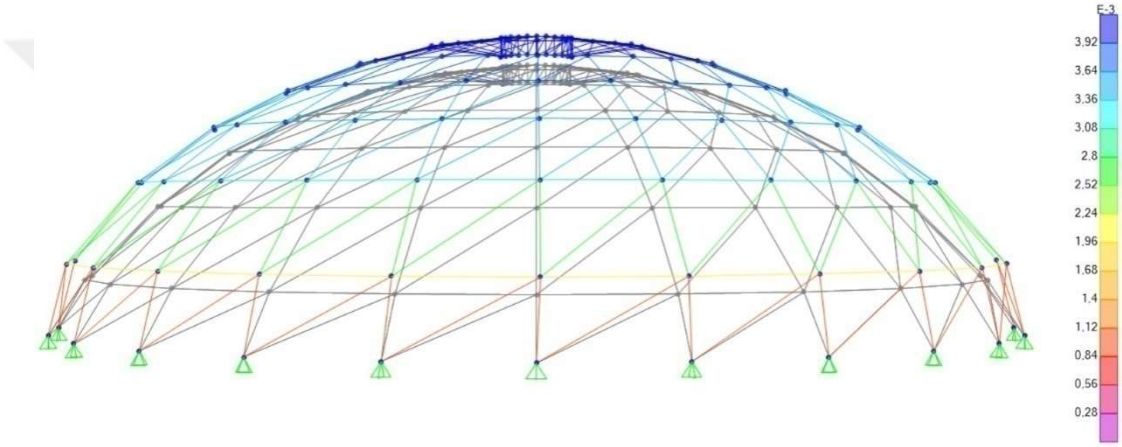
Şekil 3. 93 Dış rüzgâr yükü (W_{EX}) altında düşey deplasman durumu



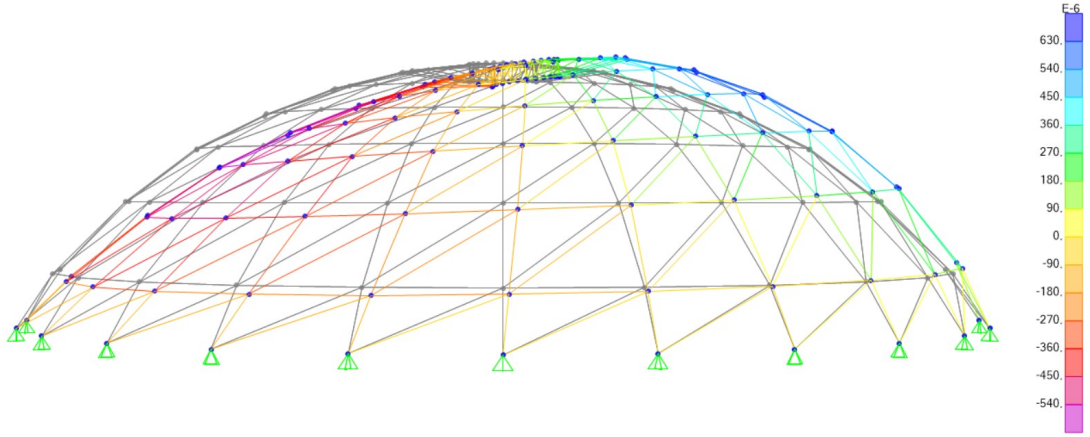
Şekil 3. 94 İç rüzgâr yükü ($W_{İN}$) altında düşey deplasman durumu



Şekil 3. 95 Termal gerilme yükü (T+) altında düşey deplasman durumu



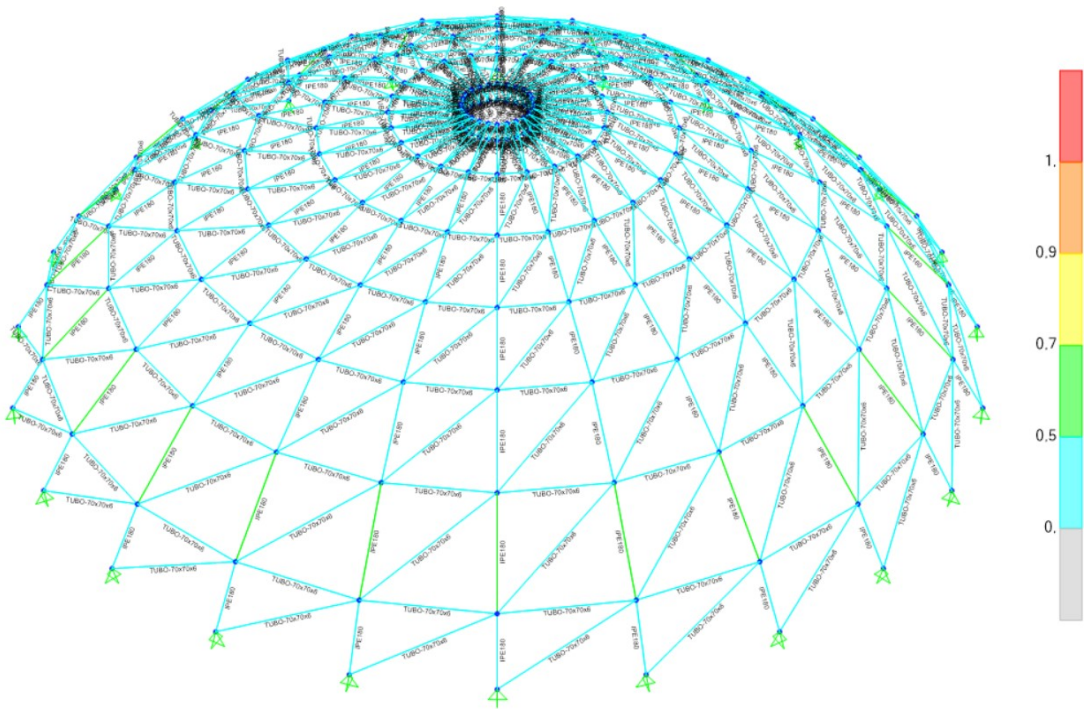
Şekil 3. 96 Termal gerilme yükü (T-) altında düşey deplasman durumu



Şekil 3. 97 Deprem yükü (E_X) altında düşey deplasman durumu

3.9.6 Model-2 tasarım sonuçları

Tek katmanlı kubbe sisteminde çubuk elemanlar üzerindeki gerilme değerlerine göre SAP2000 programında optimizasyon yapılarak çubuk kesitleri belirlenmiştir. Optimizasyon sonucu sistem içerisinde Tüm çubuklar aynı kesit olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu optimizasyon içinde burkulma davranışı da göz önüne alınarak kesit seçimi yapılmıştır. Şekil 3.98'de çubuk elemanların Etki/Kapasite oranlarına göre renk skalası verilmiştir. YDKT yöntemine uygun yapılan tasarım neticesinde Tüm meridyen kiriş elemanları IPE-180profili olarak belirlenmiştir. Çember, diyagonal ve alt kiriş elemanları ise kutu kesit olarak TUBO-70x70x6 olarak belirlenmiştir. İmalat, nakliye ve montaj aşamalarında kolaylaştırmak ve hatalı işlemelerin önüne geçmek için Model-1 için her çubuk aynı kesit olarak tasarlanmıştır.



Şekil 3. 98 YDKT'ye göre tasarımı yapılmış ve etki/kapasite oranına göre renklendirilmiş model-2 görüntüsü

Sistem üzerinde en kritik çubuk olan, kubbenin etek bölümündeki meridyen kiriş elemanının tasarım detayı Şekil 3.99'da verilmiştir. Bu elemanın tasarımı eksenel basınç ve moment etkisi altında kaldığı için yönetmeliğin bu kurallarına göre tasarımı yapılmıştır.

AISC 360-10 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, m, C

Frame :	319	X Mid:	-12,	Combo:	1.2G_1.6Q_0,5SL	Design Type:	Brace
Length:	2,828	Y Mid:	0,	Shape:	IPE180	Frame Type:	SCBF
Loc :	2,828	Z Mid:	2,5	Class:	Compact	Princpl Rot:	0, degrees

Provision: LRFD	Analysis: Direct Analysis		
D/C Limit=1,	2nd Order: General 2nd Order	Reduction: Tau-b Fixed	
AlphaPr/Py=0,138	AlphaPr/Pe=0,449	Tau_b=1,	EA factor=0,8 EI factor=0,8

PhiB=0,9	PhiC=0,85	PhiTY=0,9	PhiTF=0,75	
PhiS=0,9	PhiS-RI=1,	PhiST=0,75		

A=0,002	I33=1,317E-05	r33=0,074	S33=1,463E-04	Av3=0,001
J=0,	I22=1,010E-06	r22=0,021	S22=2,220E-05	Av2=9,540E-04
E=210000000,	Fy=355000,	Ry=1,1	z33=1,660E-04	Cw=0,
RLLF=1,	Fu=510000,		z22=3,460E-05	

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo 1.2G_1.6Q_0,5SL)

Location	Pu	Mu33	Mu22	Vu2	Vu3	Tu
2,828	-117,445	-2,883	-0,052	1,714	0,034	5,414E-05

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-1a)
D/C Ratio: 0,655 = 0,602 + 0,048 + 0,004
= (Pr/Pc) + (8/9)(Mr33/Mc33) + (8/9)(Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1-1a)

Factor	L	K1	K2	B1	B2	Cm
Major Bending	1,	1,	1,	1,	1,	1,
Minor Bending	1,	1,	1,	1,	1,	0,255

	Lltb	Kltb	Cb
LTB	1,	1,	2,252

	Pu Force	phi*Pnc Capacity	phi*Pnt Capacity
Axial	-117,445	195,06	763,605

	Mu Moment	phi*Mn Capacity	phi*Mn No LTB	phi*Mn Cb=1
Major Moment	-2,883	53,037	53,037	34,133
Minor Moment	-0,052	11,055		

SHEAR CHECK

	Vu Force	phi*Vn Capacity	Stress Ratio	Status Check
Major Shear	1,714	203,202	0,008	OK
Minor Shear	0,034	279,115	0,	OK

BRACE MAXIMUM AXIAL LOADS

	P Comp	P Tens
Axial	-117,445	0,

Şekil 3. 99 Kritik kesitin YDKT yöntemine göre tasarım detayları

3.9.7 Model-2 sisteminin Türk çelik yapı yönetmeliğine göre kontrol edilmesi

Yapısal analiz sonucu program çıktısının doğruluğu ve güvenliği için Türk Çelik Yönetmeliğine göre matematiksel olarak kontrol edilmesi gerekmektedir.

Model-2 sistemi için farklı kombinasyonlar altında oluşan basınç ve çekme gerilmesi altındaki en kritik çubuk elemanın kontrolü Türk Çelik Yönetmeliğine göre kontrol edilmiştir. Bu çubuk Şekil 3.99'da tasarım detayı verilen kritik basınç yükü altındaki meridyen kiriş elemanıdır. Eleman üzerinde hem eksenel basınç yükü hem de iki eksen doğrultusunda moment yükü bulunmaktadır.

3.9.7.1 Basınç etkisi altındaki çubuğun tasarım kontrolü

Basınç etkisi altında bulunan elemanın tasarımı model-1'de uygulana adımlar izlenerek yapılmıştır. Basınç etkisi altında kalan elemanın ekseninde oluşan gerilme değeri eleman dayanımından düşük olacak şekilde tasarlanmalıdır. Eksenel basınç gerilmesi altındaki eleman tasarımı Türk Çelik Yönetmeliği bölüm 8'de verilen kural ve sınırlamalara göre yapılır.

Model-2 sistemindeki en elverişsiz eleman olan ve Şekil 3.99'da program çıktısı verilen 319 numaralı çubuk için çelik yönetmelik kriterlerine göre basınç kontrolü sağlanacaktır.

Yerel burkulma için enkesit sınıflandırılması

Eksenel basınç gerilmesi altındaki eleman kesitleri için yerel burkulma sınır koşulu; narin ve narin olmayan enkesit olarak iki durumda incelenir. Yerel burkulma narinlik değeri olan λ değeri, narinlik sınır değeri olan λ_r değerini aşmadığı durumda "narin olmayan enkesit", sınır değerini aştığında ise "narin enkesit" olarak adlandırılır

Tasarım neticesinde seçilen, IPE 180 çift simetri eksenli I profilinin başlık ve gövdesi için yerel burkulma kontrolü denklem 3.29 ve 3.30 kullanılır.

Başlık parçası için (Tablo 5.1A, Durum 1)

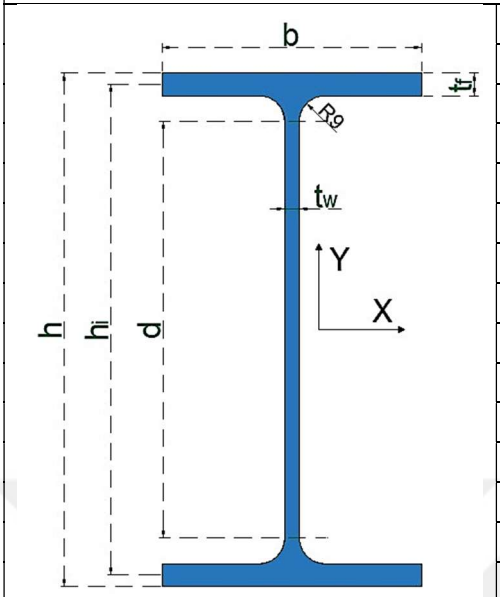
$$\lambda = \frac{b}{2t_w} = \frac{45,5}{5,3} = 8,58 < \lambda_r = 0,56\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,49\sqrt{\frac{21x10^7}{355x10^3}} = 13,62 \quad (3.29)$$

Gövde parçası için (Tablo 5.1A, Durum 5)

$$\lambda = \frac{d}{t_w} = \frac{146}{5,3} = 27,55 < \lambda_r = 1,49\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,49\sqrt{\frac{21x10^7}{355x10^3}} = 36,24 \quad (3.30)$$

$\lambda<\lambda_r$ olduğundan yerel burkulma "narin olmayan enkesit" olarak sınıflandırılır.

Tablo 3. 21 IPE 180 profili ölçü ve mukavemet tablosu (BS EN 10365, 2017)

IPE 180			
	A	2390	mm^2
	J	48100	mm^4
	i_x	74,2	mm
	i_y	20,6	mm
	I_x	13170000	mm^4
	I_y	1010000	mm^4
	W_{px}	166000	mm^3
	W_{py}	34600	mm^3
	W_{ex}	146000	mm^3
	W_{ey}	22200	mm^3
	b	91	mm
	t_f	8	mm
	t_w	5,6	mm
	h	180	mm
	h_i	164	mm
	d	146	mm

Narinlik oranı sınırı

Eksenel basınç gerilmesi altındaki elemanlar çelik yönetmeliğinin Bölüm 6 ya da Bölüm 16 kuralları doğrultusunda burkulma boyu (L_c=KL) ile hesaplanan narinlik oranı $Lc/\ i \leq 200$ olmalıdır. Kritik çubuk elemanı değerlerine göre seçilen IPE 180 profilinin burkulma mukavemet değerleri Tablo 3.21'de görünmektedir.

$\lambda_x = L_{cx} / i_x = 2,828/ 0,0742 = 38,11 \leq 200$

$\lambda_y = L_{cy} / i_y = 2,828/ 0,0206 = 137,28 \leq 200$

Narinlik oranı kontrolü her iki eksen içinde kritik değerin altında olduğundan yönetmelik 8.1.1'e göre narinlik koşulu sağlanmaktadır.

Karakteristik basınç kuvveti mukavemeti

Bu dayanım, elemanın basınç altında ne kadar yük taşıyabileceğini ifade eder. Enkesiti narin olmayan elemanların maruz kaldığı eksenel basınç kuvveti olan P_n, çelik yönetmeliği 8.2 dikkate alınarak hesaplanır. Dayanım hesabı için denklem 3.25 çözümlenir. Kritik yük sınırını belirlemek için denklem 3.27 çözümlenerek burkulma gerilmesi hesaplanır. Gerilme hesabında narinlik oranı yüksek olan eksen yönündeki değer alınarak çözüm yapılır

$$\mathrm{Fe} = \frac{\pi^2\ 21\mathrm{x}10^7}{\left(\frac{2{,}828}{2{,}06\ \mathrm{x}10^{-2}}\right)^2} = 109517{,}5\ \mathrm{kN/m^2}$$

Burkulma gerilmesi ile kritik yükün hesaplanması için denklem 3.26'a göre koşul durumu aşağıdaki gibi belirlenerek kritik burkulma gerilmesi hesaplanır. Kritik burkulma gerilmesi için narinlik oranı yüksek olan eksen hesaba katılır.

$$\frac{\mathrm{L_c}}{i_y} = \frac{2{,}828}{2{,}06\ \mathrm{x}10^{-2}} = 137{,}6 > 4{,}71\sqrt{\frac{\mathrm{E}}{\mathrm{F_y}}} = 4{,}71\sqrt{\frac{21\mathrm{x}10^7}{355x10^3}} = 114{,}55$$

Denklem 3.26 koşullu çözümlemesi sonucunda durum 2 için kritik burkulma gerilmesi, F_{cr}, çözümlenir.

$$\mathrm{Fcr} = 0{,}877F_e = 0{,}877\ (109517{,}5) = 96046{,}9\ \mathrm{kN/m^2}$$

Karekteristik basınç kuvveti P_n ise hesaplanan kritik burkulma gerilmesine bağlı olarak çözümlenir. YDKT yöntemine göre karakteristik basınç kuvveti tasarım katsayısı ile çarpılarak tasarım kuvveti elde edilir(Φ_c =0.90)

$\mathrm{P_n} = \mathrm{F_{cr}}\,\mathrm{A_g} = 96046{,}9 \times 23{,}9\mathrm{x}10^{-4} = 229{,}55$ kN

$\mathrm{P_d} = \Phi_c\,\mathrm{P_n} = 0{,}9 \times 229{,}55 = 206{,}6$ kN bulunur.

$$\frac{\mathrm{P_u}}{\mathrm{P_d}} = \frac{117{,}45}{206{,}6} = 0{,}57 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı ≤ 1 olduğundan çubuk yükü güvenle taşır.

3.9.7.2 Kesme kuvveti etkisi altındaki çubuğun tasarım kontrolü

Çubuk elemanın kesme kuvvetine maruz kalması durumunda, elemanın taşıma kapasitesi azalır ve çubuk elemanın kırılma riski artar. Bu nedenle, çelik kubbe sistemlerinin tasarımında, çubuk elemanların kesme kuvvetine karşı dayanıklılıklarının hesaplanması ve tasarımının buna göre yapılması önemlidir. Türk Çelik Yönetmeliği bölüm 10 gereğince çelik elemanların kesme kuvveti etkisi altında tasarımı irdelenir. Çift simetri eksenli I enkesitli elemanlar için yönetmelik 10.2.1 kurallarına göre tasarımı yapılır. Kesme kuvveti sınırı için denklem 3.31 kullanılmıştır. Elemanın aldığı kesme kuvveti bu değerden küçük olmalıdır aksi durumda kesit büyütülmeli ya da malzeme sınıfında iyileştirmeye gidilmelidir.

$$\mathrm{V_n} = 0{,}6\ \mathrm{F_y}\ A_{\mathrm{w}}\ \mathrm{C}_{V1} \qquad (3.31)$$

Burada;

"A_w" gövde kesit alanı (=$h\ t_w$), "C_{v1}" gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı

V_n=0,6 (355x10^3)(0,954x10^{-3})(1.0)=203,202 kN bulunur.

YDKT yöntemine göre karakteristik kesme kuvveti tasarım katsayısı ile çarpılarak tasarım kesme kuvveti elde edilir(Φ_v =1.0)

$V_d = V_n\ \Phi_v$=203,202 (1.0) =203,202

$$\frac{V_u}{V_d} = \frac{1,714}{203,202} = 0,0084 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı ≤ 1 olduğundan çubuk yükü güvenle taşır

3.9.7.3 Moment etkisi altındaki çubuğun tasarımı

Moment etkisi altındaki bir çelik elemanın tasarımı, elemanın gerilme seviyelerinin belirlenmesini ve elemanın eğilme momentine karşı direnç gösterme kapasitesinin hesaplanmasını içerir. Elemanın kesit boyutları, geometrisi ve malzeme özellikleri, gerilme seviyeleri ve direnç kapasitesini etkileyen önemli faktörlerdir. Çelik yapı elemanlarının, elastik davranış göstermeleri istenir. Bu, elemanın eğilme momenti kaldırıldığında orijinal şekline geri dönebileceği anlamına gelir. Ancak, elemanın elastik sınırları aşıldığında, yani gerilme seviyesi belirli bir seviyenin üzerine çıktığında, eleman plastik hale gelir ve şeklini kalıcı olarak değiştirir. Tasarım esaslarından biri olan akma sınırı altında kalacak şekilde kesit belirlenir.

Model-2 sisteminin en kritik elemanı olan ve Şekil 3.99'da gösterilen eğilme momenti altında tasarımı yönetmelik koşulları göz önünde bulundurularak kontrol edilir. Eğilme moment etkisi altındaki elemanların tasarımı Türk Çelik Yönetmeliği bölüm 9'a göre yapılmıştır.

Yerel burkulma için enkesit sınıflandırılması

Eğilme momentinin basınç bileşeni etkisinde eleman kesitleri için yerel burkulma sınır koşulu; kompakt, kompakt olmayan ve narin enkesit olarak üç durumda incelenir. Yerel burkulma sınır değeri olan λ değeri en az bir kesit parçası için , λ_p sınır değerini aşmadığı durumda "kompakt enkesit" olarak sınıflandırılır. Yerel burkulma sınır değeri olan λ, λ_p sınır değerini aştığı fakat λ_r değerini aşmadığında ise "kompakt olmayan enkesit" olarak tanımlanır. λ değerinin λ_r değerini aştığı durumda ise enkesit "narin enkesit" olarak tanımlanır.

Tasarım neticesinde seçilen, IPE-180 çift simetri eksenli I profilinin eğilme momentinin basınç bileşeni etkisinde başlık ve gövde parçaları için yerel burkulma kontrolü denklem 3.32 ve 3.33 kullanılır.

Başlık parçası için (Tablo 5.1B, Durum 10)

$$\lambda = \frac{b}{2t_w} = \frac{45,5}{5,3} = 8,58 < \lambda_p = 0,38\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,38\sqrt{\frac{21x10^7}{355x10^3}} = 9,24 \qquad (3.32)$$

Gövde parçası için (Tablo 5.1B, Durum 15)

$$\lambda = \frac{d}{t_w} = \frac{146}{5,3} = 27,55 < \lambda_r = 3,76\sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3,76\sqrt{\frac{21x10^7}{355x10^3}} = 91,45 \qquad (3.33)$$

$\lambda < \lambda_p$ olduğundan yerel burkulma "kompakt enkesit" olarak sınıflandırılır.

Kuvvetli eksen etrafındaki eğilme etkisi altında kesit parçaları kompakt olarak sınıflandırılan çift simetri eksenli I kesitli elemanlar için yönetmeliğin bölüm 9.2 'de verdiği sınır değerlerine göre hesaplanmalıdır. Yönetmeliğe göre bu bölümde akma sınır durumu ve yanal burulmalı burkulma sınır durumu kontrol edilecektir. İki durum koşulları doğrultusunda küçük olan moment, kapasite dayanımı için alınacaktır.

Plastik eğilme momenti sınır durumu

Eğilme momenti etkisinde eleman kesitinde meydana gelen akma sınır moment değeri denklem 3.34'e göre hesaplanmıştır. Yönetmelik gereğince birleşik etkiler göz önüne alınacağından kiriş üzerindeki moment etkisi hem güçlü eksende (M 3-3) hem de zayıf eksen (M 2-2) yönünde hesaplanacaktır.

$$M_n = M_p = F_y W_p \qquad (3.34)$$

Güçlü eksende plastik gerilme momenti:

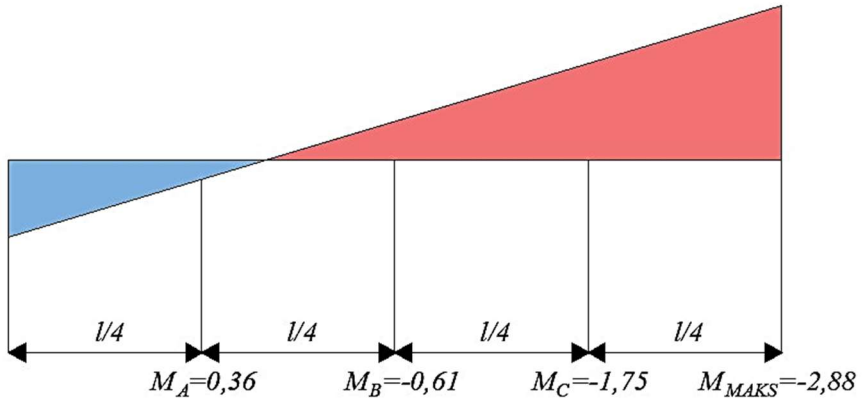
$M_{nx} = M_{px} = F_y W_{px}$ = 355x0,166=58,93 kN.m

Zayıf eksende plastik gerilme momenti:

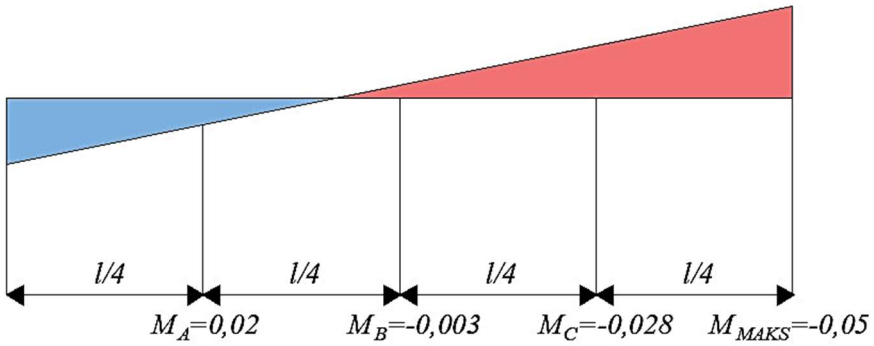
$M_{ny} = M_{py} = F_y W_{py}$ = 355x0,0346=12,28 kN.m

Güçlü eksen etrafında yanal burulmalı burkulma sınır durumu

Plastik eğilme sınır durumda olduğu gibi bu durum için de kiriş üzerindeki moment etkisi hem güçlü eksende (M 3-3) hem de zayıf eksen (M 2-2) yönünde hesaplanacaktır. Kritik elemanın güçlü eksende oluşturduğu moment diyagramı Şekil 3.100'de zayıf eksende oluşturduğu moment diyagramı ise Şekil 3.101'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 100 Kritik elemanın güçlü eksende (M 3-3) oluşturduğu moment diyagramı



Şekil 3. 101 Kritik elemanın zayıf eksende (M 2-2) oluşturduğu moment diyagramı

Yönetmelik 9.2.2 gereğince yanal burkulma moment sınır durumu için enkesit başlığının desteklenmeyen uzunluğu olan L_b'ye bağlı olarak hesaplanmaktadır. Eleman sınır uzunlukları denklem 3.35 ve 3.36 ile hesaplanmıştır.

$$\mathrm{L_p} = 1{,}76\mathrm{i_y}\sqrt{\frac{\mathrm{E}}{\mathrm{F_y}}} \tag{3.35}$$

$$L_r = 1{,}95\, i_{ts}\frac{E}{0{,}7F_y}\sqrt{\frac{J\,c}{W_{ex}\,h_o}+\sqrt{\left(\frac{J\,c}{W_{ex}\,h_o}\right)^2+6{,}76\left(\frac{0{,}7F_y}{E}\right)^2}} \tag{3.36}$$

Burada;

"*C*" burulma sabiti, "L_b" eğilme momenti altında kalan ve stabilite bağlantılarıyla ile desteklenmesi yapılmayan eleman uzunluğu, "L_p" akma sınır durumu için uzunluk, "L_r" elastik olmayan yanal burulmalı burkulma sınır uzunluğudur.

Elastik olmayan yanal burulmalı burkulma sınır uzunluğu olan L_r, hesabında kullanılacak olan etkin atalet yarıçapı i_{ts} denklem 3.37'de hesaplanmıştır.

$$\mathrm{i_{ts}} = \frac{\mathrm{b_f}}{\sqrt{12\left(1+\frac{1}{6}\frac{\mathrm{d\,t_w}}{\mathrm{b_f t_f}}\right)}} = \frac{91}{\sqrt{12\left(1+\frac{1}{6}\frac{146}{91}\frac{5{,}3}{8}\right)}} = 0{,}0242\ \mathrm{m} \qquad (3.37)$$

$$\mathrm{L_p} = (1{,}76)(0{,}0206)\sqrt{\frac{21\mathrm{x}10^7}{355\mathrm{x}10^3}} = 0{,}88\ \mathrm{m}$$

L_r hesabı için kullanılacak olan burulma sabiti *C*, Çift simetri eksenine sahip I enkesitler için yönetmelik gereğince *C*=1.0 alınacaktır. Buna göre,

$$L_r = 0{,}95\ (0{,}0242)\frac{21\mathrm{x}10^7}{0{,}7(355\times10^3)}\ldots$$

$$\times\sqrt{\frac{4{,}81\times10^{-8}\times1}{1{,}46\mathrm{x}10^{-4}\times0{,}172}+\sqrt{\left(\frac{4{,}81\times10^{-8}\times1}{1{,}46\mathrm{x}10^{-4}\times0{,}172}\right)^2+6{,}76\left(\frac{0{,}7(355\times10^3)}{21\mathrm{x}10^7}\right)^2}}$$

$L_r = 2{,}97\ \mathrm{m}$ bulunur.

Yönetmelik 9.22 (b)'e göre sınır uzunlukları L_p=0,88 m < L_b=2,828 m ≤L_r =2,97 m aralığında olduğu için karakteristik eğilme moment mukavemeti için denklem 3.27 kullanılarak hesaplanacaktır.

$$M_n = c_b\left[M_p - \left(M_p - 0{,}7F_yW_{ex}\right)\left(\frac{L_b-L_p}{L_r-L_p}\right)\right] \qquad (3.37)$$

Eğilme momenti hesabında kullanılacak burulma sabiti denklem 3.38'e göre hesaplanır. Moment değerleri Şekil 3.38'de verilmiştir.

$$C_b = \frac{12{,}5M_{maks}}{2{,}5M_{maks}+3M_A+4M_B+3M_C} \qquad (3.38)$$

$$C_b = \frac{12{,}5(2{,}88)}{2{,}5(2{,}88)+3(0{,}36)+4(0{,}61)+3(1{,}75)} = 2{,}25$$

$$M_n = 2{,}25\left[58{,}93 - (58{,}93 - 0{,}7(355)(0{,}146))\left(\frac{2{,}83 - 0{,}88}{2{,}97 - 0{,}88}\right)\right] = 85{,}05 > M_p$$

Güvenli tarafta kalmak için Hesaplanan; Akma ve burulmalı burkulma momentlerinden küçük olan tasarım momenti seçilecektir. Dolayısıyla M_n=M_p= 58,93 kN.m kullanılmıştır.

YDKT yöntemine göre karakteristik eğilme momenti tasarım katsayısı ile çarpılarak tasarım momenti elde edilir(Φ_c =0.90)

$M_d = \Phi_b M_n$ =0,9 x58,93=53,037 kN.m

$$\frac{M_u}{M_d} = \frac{2{,}883}{53{,}037} = 0{,}054 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı ≤ 1 olduğundan çubuk yükü güvenle taşır

Zayıf eksen etrafında yanal burulmalı burkulma sınır durumu

Zayıf eksen üzerinde oluşan moment değerleri şekil 3.101'de görülmektedir. Zayıf eksen yönünde oluşan eğilme momenti sınır hesabı için öncelikle sınır uzunluklarının durumuna göre moment değeri belirlenecektir. Buna göre denklem 3.35 ve 3.36 çözümlenmiştir.

$$L_p = (1{,}76)(0{,}07423)\sqrt{\frac{21x10^7}{355x10^3}} = 3{,}18 \text{ m}$$

$$L_r = 0{,}95\ (0{,}0242)\frac{21x10^7}{0{,}7(355\times10^3)} \ldots$$

$$\times\sqrt{\frac{4{,}81\times10^{-8}\times1}{2{,}2x10^{-5}\times0{,}172} + \sqrt{\left(\frac{4{,}81\times10^{-8}\times1}{2{,}2x10^{-5}\times0{,}172}\right)^2 + 6{,}76\left(\frac{0{,}7(355\times10^3)}{21x10^7}\right)^2}} = 3{,}1 \text{ m}$$

Yönetmelik 9.22 (a)'e göre sınır uzunlukları L_b=2,828<L_p olduğu için karakteristik eğilme moment mukavemeti için burulmalı burkulma sınır durumunun dikkate alınmasına gerek yoktur. Bunun için zayıf eksende akma sınır durumu için hesapladığımız değer kullanılmıştır.

YDKT yöntemine göre karakteristik eğilme momenti tasarım katsayısı ile çarpılarak tasarım momenti elde edilir(Φ_b =0.90)

$M_d = \Phi_b M_n$ =0,9 x12,28=11,052 kN.m bulunur.

$$\frac{M_u}{M_d} = \frac{0,05}{11,52} = 0,0047 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı ≤ 1 olduğundan çubuk yükü güvenle taşır

3.9.7.4 Birleşik yük etkisi altındaki çubuğun tasarım kontrolü

Burulma etkisi ya da burulma olmadan eleman üzerinde oluşan eksenel kuvvet ve eğilme moment etkisinin birlikte ele alınarak yapılan tasarımdır. Yönetmelik bölüm 11'de verilen kural ve sınırlamalar dikkate alınarak tasarım yapılmaktadır. Kritik çubuk elemanı için eğilme momenti ve eksenel basınç etkisi dikkate alınarak yönetmelik bölüm 11.2 uyarınca hesaplamalar yapılmıştır.

Buna göre çift simetri ekseni bulunan, eksenel basınç ve eğilme momenti etkisinin birlikte incelenmesi durumunda denklem 3.39 kurallarına göre birleşik etki leşim sınırlaması yapılacaktır.

$$\begin{aligned} &\frac{P_r}{P_c} \geq 0,2 \quad \text{için} \quad \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9}\left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}}\right) \leq 1,0 \\ &\frac{P_r}{P_c} < 0,2 \quad \text{için} \quad \frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}}\right) \leq 1,0 \end{aligned} \tag{3.39}$$

$$\frac{P_r}{P_c} = \frac{117,447}{206,6} = 0,57 \geq 0,2 \quad \text{bulunur.}$$

Bu oran denklem 3.39 1. durum için uygun olduğu için birleşik yük tesiri altındaki elemanın birleşik etkileşim için etki/kapasite oranı hesaplanır.

$$\frac{117,447}{206,6} + \frac{8}{9}\left(\frac{2,883}{53,037} + \frac{0,05}{11,052}\right) = 0,658 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre birleşik etki altında kritik çubuk elemanı yükü etki/kapasite oranına göre güvenle taşımaktadır

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, çelik uzay kubbe sistemlerinin analizi ve tasarımı SAP2000 programı ile yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen bazı kritik çubuk kesitleri Türk Çelik Yapı Yönetmeliği'nin tasarım kuralları doğrultusunda kesit güvenliği kontrol edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Sonuçlar; çift katmanlı olan model-1 ve tek katmanlı olan model-2 sistemleri için ayrı ayrı olarak karşılaştırılıp değerlendirilmesi yapılmıştır.

4.1 Model-1 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çelik yapıların analiz ve tasarımı, bilgisayar destekli analiz ve tasarım yazılımları kullanılarak gerçekleştirilir. Analiz ve tasarım işlemlerinin doğruluğunu kontrol etmek için ise genellikle el ile hesapla kontrol yapılır. Ancak, özellikle çift katmanlı uzay kubbe sistemleri gibi karmaşık yapıların analizi el ile hesabı zorlu hale gelir. Bu nedenle, çift katmanlı uzay kubbe sistemleri için doğru tasarım ve analizler yapmak için bilgisayar destekli tasarım ve analiz yazılımları kullanımı önerilir. Ancak, program çıktısı ile el ile hesap sonuçlarının karşılaştırılması, yapılan analiz işleminin doğru ve güvenli olup olmadığını kontrol etmek için önemlidir.

Bu bölümde, çift katmanlı uzay kubbe sistemlerinin tasarım ve analizi için kullanılan bilgisayar destekli tasarım ve analiz yazılımlarının doğruluğunu el ile hesapla kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bilgisayar destekli tasarım ve analiz yazılımlarının doğruluğunu ve çift katmanlı uzay kubbe sistemlerinin tasarım ve analizinde el hesabı yönteminin kullanılabilirliğini değerlendirmeye yönelik olacaktır. Sonuçlar, yapılan analiz işlemlerinin doğru olup olmadığını kontrol etmek için kullanılacak ve gerekli düzeltmelerin yapılmasına olanak sağlayacaktır.

Çift katmanlı uzay kubbe elemanlarının yapısal davranışı, tasarım ve karşılaştırma öncesi iyi bilinmelidir. Çift katmanlı uzay kafes sistemlerinde çubuk elemanlarda moment oluşmaz çünkü bu elemanlar eksenel yüklerle çalışırlar. Eksenel yükler, çubuk elemanın uzunluğu boyunca etki eden doğru yüklerdir ve elemanın uzunluğuna bağlı olarak değişirler. Çubuk elemanın uzunluğu boyunca eşit bir şekilde dağılan bu doğru yükler, elemanın çekme veya basınç gerilmesine neden olur. Moment ise, elemanın eksenel yükler dışında eğilmesine neden olan yanal kuvvetlerin etkisiyle oluşur. Ancak, çift katmanlı uzay kafes sistemlerinde elemanlar arasındaki çaprazlama yapısı nedeniyle yanal kuvvetlerin etkisi azaltılmıştır. Bu

nedenle, çubuk elemanlarda moment oluşmaz ya da ihmal edilecek kadar küçük bir değerde oluşur bu sebeple çift katmanlı kafes elemanları sadece eksenel yüklerle çalışırlar. Bu özellik, çift katmanlı uzay kafes sistemlerinin tasarımında önemlidir çünkü moment oluşumu, yapıya ek yükler ekler ve tasarımın karmaşıklığını artırır. Ayrıca, moment oluşumu, yapı elemanlarının boyutlandırmasında da zorluklar yaratabilir. Bu nedenle, çift katmanlı uzay kafes sistemleri, moment oluşumunun minimaliz edildiği yapılar olarak tercih edilebilir.

Çift katmanlı kubbe sisteminde kritik basınç ve kritik çekme gerilmesi altındaki elemanlar için yönetmelik kriterleri dikkate alınarak ayrı ayrı değerlendirme yapılmıştır.

4.1.1 Model-1 kritik basınç elemanı boyutlandırma kontrolü

Kritik basınç elemanı olan ve Şekil 3.70'de program çıktısı verilen 887 numaralı elemanın, program çıktısı ve ÇYTHYEDY'ne göre el ile hesap edilen değerler Tablo 4.1'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırma tablosuna göre; program çıktısı olarak aldığımız AISC 360-10 tasarım standardına göre boyutlandırma değerleri ÇYTHYEDY kurallarına göre yapılan boyutlandırma değerleri ile örtüşmektedir. Bu örtüşme sistem tasarımı için olumlu bir durumdur ve tasarımın doğru olduğunu göstermektedir. Program çıktısı ile el ile hesaplanan sonuçlar arasındaki tutarlılık, tasarımımızın güvenilirliğini artırmıştır.

Tablo 4. 1 Model-1 sisteminin basınç etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması

	AISC 360-10'a Göre Program Çıktısı (kN)	ÇYTHYEDY'e göre (kN)
Etki kuvveti, P_u	73,281	73,281
Kapasite Kuvveti, P_n	132,72	132,71
Tasarım Kapasite Kuvveti, P_d	112,81	119,44
Etki / Kapasite oranı	0,65	0,614

4.1.2 Model-1 kritik çekme elemanı boyutlandırma kontrolü

Kritik çekme elemanı olan ve Şekil 3.71'de program çıktısı verilen 686 numaralı elemanın, program çıktısı ve el hesabı ile elde edilen değerler Tablo 4.2'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırma tablosuna göre; program çıktısı olarak aldığımız AISC 360-10 tasarım standardına göre boyutlandırma değerleri ÇYTHYEDY kurallarına göre yapılan boyutlandırma değerleri ile örtüşmektedir. Bu örtüşme sistem tasarımı için olumlu bir durumdur ve tasarımın doğru olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. 2 Model-1 sisteminin çekme etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması

	AISC 360-10'a Göre Program Çıktısı (kN)	ÇYTHYEDY'e göre (kN)
Etki kuvveti, P_u	20,819	20,819
Kapasite Kuvveti, T_n	260,18	260,17
Tasarım Kapasite Kuvveti, T_d	234,15	234,16
Etki / Kapasite oranı	0,088	0,089

4.2 Model-2 Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tek katmanlı çelik kubbe sisteminde, alt kısımdaki elemanlar üst kısımdaki elemanlara göre daha kritik gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu nedenle, alt kısımdaki elemanların tasarımı, sistemin dayanıklılığı açısından çok önemlidir.

Program çıktısı ve el ile hesaplanan sonuçlara göre, kritik elemanlar eksenel ve moment yükleri altında tasarım doğruluğuna sahiptir. Bu sonuçlar, tek katmanlı çelik kubbe sistemi içindeki kritik eleman tasarımlarının doğru bir şekilde tasarlanmış olduğunu göstermektedir. Bu da, sistemdeki gerilme kritikliği göz önünde bulundurularak yapılan tasarımın doğruluğunu ortaya koymaktadır.

Tek katmanlı kubbe sisteminde el ile hesaplanan eğilme momenti altında eksenel basınç gerilmesine maruz kalan elemanın tasarım değerlendirilmesi yapılmıştır. Kritik gerilme etkisinde olan ve Şekil 3.99'da program çıktısı verilen 319 numaralı elemanın, program çıktısı ve el hesabı ile elde edilen değerleri aşağıda verilmiştir. Tasarım karşılaştırmaları eksenel basınç kuvveti, Eğilme momenti kuvveti ve birleşik yük etkisi altında yarı ayrı karşılaştırılarak tasarım benzerlikleri karşılaştırılmıştır.

Kritik basınç elemanı olan çubuğun, program çıktısı ve el ile hesaplanan değerler Tablo 4.3'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırma tablosuna göre; program çıktısı olarak aldığımız AISC 360-10 tasarım standardına göre boyutlandırma değerleri ÇYTHYEDY kurallarına göre yapılan boyutlandırma değerleri ile büyük oranda örtüşmektedir.

Tablo 4. 3 Model-2 sisteminin basınç etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması

	AISC 360-10'a Göre Program Çıktısı (kN)	ÇYTHYEDY'e göre (kN)
Etki kuvveti, P_u	117,445	117,445
Kapasite Kuvveti, P_n	229,48	229,55
Tasarım Kapasite Kuvveti, P_d	195,06	206,59
Etki / Kapasite oranı	0,602	0,57

Kritik kesme etkisindeki eleman olan çubuğun, program çıktısı ve el ile hesaplanan değerler Tablo 4.4'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırma tablosuna göre; program çıktısı olarak aldığımız AISC 360-10 tasarım standardına göre boyutlandırma değerleri ÇYTHYEDY kurallarına göre yapılan boyutlandırma değerleri ile büyük oranda örtüşmektedir.

Tablo 4. 4 Model-2 sisteminin kesme kuvveti etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması

	AISC 360-10'a Göre Program Çıktısı (kN)	ÇYTHYEDY'e göre (kN)
Etki kuvveti, V_u	1,714	1,714
Kapasite Kuvveti, V_n	203,202	203,202
Tasarım Kapasite Kuvveti, V_d	203,202	203,202
Etki / Kapasite oranı	0,008	0,008

Kritik gerilme altındaki elemana hem zayıf yönde hem de güçlü yönde olmak üzere iki eksende de eğilme momenti etkisi bulunmaktadır. Bu iki yöndeki gerilmeler o doğrultudaki dayanıma göre oluşan eğilme momenti kapasitelerine göre karşılaştırılmıştır. Güçlü eksende (M 3-3) kritik eğilme momenti etkisinde olan elemanın, program çıktısı ve el hesabı ile elde edilen değerler Tablo 4.5'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırma tablosuna göre; program çıktısı

olarak aldığımız AISC 360-10 tasarım standardına göre boyutlandırma değerleri ÇYTHYEDY kurallarına göre yapılan boyutlandırma değerleri ile örtüşmektedir

Tablo 4. 5 Model-2 sisteminin kuvvetli eksende eğilme momenti etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması

	AISC 360-10'a Göre Program Çıktısı (kN)	ÇYTHYEDY'e göre (kN)
Etki Momenti, M_u	2,883	2,883
Plastik Eğilme Momenti, M_p	58,93	58,93
Yanal Burulmalı Burkulma Momenti, M_n	-	85,05
Tasarım Kapasite Kuvveti, M_d	53,037	53,04
Etki / Kapasite oranı	0,054	0,054

Zayıf eksende (M 2-2) kritik eğilme momenti etkisinde olan elemanın, program çıktısı ve el hesabı ile elde edilen değerler Tablo 4.6'da karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırma tablosuna göre; program çıktısı olarak aldığımız AISC 360-10 tasarım standardına göre boyutlandırma değerleri ÇYTHYEDY kurallarına göre yapılan boyutlandırma değerleri ile örtüşmektedir

Tablo 4. 6 Model-2 sisteminin zayıf eksende eğilme momenti etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması

	AISC 360-10'a Göre Program Çıktısı (kN)	ÇYTHYEDY'e göre (kN)
Etki Momenti, M_u	0,052	0,052
Plastik Eğilme Momenti, M_p	12,28	12,28
Yanal Burulmalı Burkulma Momenti, M_n	-	-
Tasarım Kapasite Kuvveti, M_d	11,05	11,05
Etki / Kapasite oranı	0,045	0,047

Kritik Gerilmeye maruz kalan elemanın birleşik yük etkileri altındaki davranış değerleri AISC 360-10 ve ÇYTHYEDY kurallarına göre Tablo 4.7'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırma tablosuna göre program çıktısı ile el hesabı çözümleme sonuçları örtüşmektedir. Bu doğrultuda kritik gerilme altındaki elemanın etki altında bulunduğu yükü güvenle taşıdığı belirtilebilir.

Tablo 4. 7 Model-2 sisteminin birleşik yük etkisi altında AISC ve ÇYTHYEDY'e göre boyutlandırma değerleri karşılaştırılması

	AISC 360-10'a Göre Program Çıktısı (kN)	ÇYTHYEDY'e göre (kN)
Etki kuvveti, P_u	117,445	117,445
Tasarım Kapasite Kuvveti, P_d	195,06	206,59
P_r/P_c	-	0,57
(M 3-3) Etki Momenti, M_u	2,883	2,883
(M 3-3) Tasarım Kapasite Kuvveti, M_d	53,037	53,04
(M 2-2) Etki Momenti, M_u	0,052	0,052
(M 2-2) Tasarım Kapasite Kuvveti, M_d	11,05	11,05
Birleşik Yük Etkisinde Etki/Kapasite Oranı	0,655	0,658

Bu sonuçlar, tek katmanlı çelik kubbe sistemi içindeki çubuk elemanlarının eksenel, kesme ve moment yükü altındaki tasarımının doğruluğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, çubuk elemanlarının dayanımını artırmak için farklı malzemelerin kullanımı, çubuk kesitlerinin değiştirilmesi veya daha yüksek kalitede çelik malzeme kullanımı gibi diğer tasarım seçenekleri de dikkate alınabilir. Ancak elde edilen sonuçlar, tek katmanlı çelik kubbe sistemi içindeki çubuk elemanlarının eksenel ve moment yükü altındaki tasarımının doğru yapıldığını ve güvenilir bir yapı oluşturduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLAR

Çelik kubbe sistemleri, yuvarlak veya oval bir plana sahip ve kubbe şeklinde bir çatıya sahip yapılar olarak tanımlanabilir. Bu sistemler, yüksek bir dayanıklılık ve esneklik sağlamak için özel olarak tasarlanmış çelik malzemeler kullanılarak inşa edilir. Kubbe şekli, yüklerin eşit şekilde dağılmasını sağlar ve yapıya estetik bir görünüm kazandırır.

Çelik uzay kubbe sistemleri, Türkiye'deki yapı yönetmelikleri açısından uygunluğu da dikkate alınarak değerlendirildiğinde, yapısal performans açısından üstünlük sağlayabilir. Ayrıca, kısa kurulum süreleri sayesinde işçilik maliyetlerinde tasarruf sağlayabilir ve yapıların enerji verimliliğini artırabilir. Ancak, malzeme maliyetleri ve tasarım karmaşıklığı nedeniyle bazı durumlarda daha yüksek maliyetli olabilirler. Bununla birlikte, çelik uzay kafes kubbe sistemlerinin bazı mahzurlu yanları da vardır. Örneğin, tasarım karmaşıklığı nedeniyle yapım aşamasında daha fazla bilgi ve uzmanlık gerektirirler. Ayrıca, daha küçük açıklıklar için tercih edildiği durumlarda oluşan yüksek maliyetleri nedeniyle bazı projelerde kullanımı kısıtlı olabilir.

Öncelikle SAP2000 yazılımı ile çelik uzay kafes kubbe sistemlerinin analizi ve tasarımı yapılmıştır. Program, AISC 360-10 yönetmeliğine uygun olarak çelik kubbe elemanlarının mukavemet hesaplamalarını hızlı ve doğru bir şekilde yapabilmektedir. Bu sayede, yapısal tasarım ve analiz işlemleri oldukça kolaylaşmaktadır. Ayrıca, SAP2000 programının kullanımının, yapısal tasarım ve analiz süreçlerini hızlandırdığı ve daha doğru sonuçlar elde edilmesine yardımcı olduğu gözlemlenmiştir. Programın kullanımıyla, yapısal tasarımcılar ve mühendisler, çelik kubbe elemanlarının analiz ve tasarımlarını daha kolay ve daha doğru bir şekilde yapabilmektedir. Bu nedenle, büyük ölçekli projelerde SAP2000 programı gibi analiz ve tasarım yazılımlarının kullanılması daha uygun olmaktadır.

Bu çalışmada, çelik kubbe sistemlerinin SAP2000 programı kullanılarak AISC 360-10 yönetmeliğine göre tasarımı yapılmıştır. Önce ilgili yönetmeliklerden yapı üzerine etkiyen yükler belirlenmiştir, bu yükler çift katmanlı ve tek katmanlı iki ayrı çelik kubbe sistemine etki ettirilmiştir. Yük birleşimleri Türk Çelik Yapı Yönetmeliğindeki YDKT yönteminden alınmıştır. Daha sonra program ile yapılan tasarımlarda, bazı kritik çubuk kesitleri ÇYTHYEDY tasarım esaslarına göre el ile

hesaplanarak kontrol edilmiştir. Her iki yönetmeliğin de benzer ya da yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu da her iki tasarım yönetmeliğinin benzer olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, çelik kubbelerin tasarımı ve analizi, yapı mühendisliği alanında önemli bir konudur. Doğru yöntemlerin seçimi ve doğru analizlerin yapılması, yapıların güvenli ve sağlam bir şekilde inşa edilmesinde hayati öneme sahiptir. SAP2000 hesaplamalarında uzaysal kubbe sistemlerinin geometrisinin belirlenmesi önemlidir. Bu çalışma, çelik kubbelerin analizi ve tasarımı hakkında bilgi edinmek isteyenler için yararlı bir kaynak olabilir.

KAYNAKLAR

Adnanoğlu, A. (2022). *Farklı açıklıklara sahip dolu gövdeli kubbe kafes sistemler ile dairesel boşluklu kubbe kafes sistemlerin tasarım ve maliyet karşılaştırılması.* (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya.

AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings. (2016). Chicago: American Institute of Steel Construction.

Ashtul, S. A., & Patil, S. N. (2020). Review on study of space frame structure system. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 667-672.

Baskı, A. (2023, Ocak 31). http://www.artnova.com.tr/ adresinden alındı

BS EN 10210-2, Hot Finished Structural Hollow Section of Non-Alloy and Fine Grain Steels. (2006). Brüksel: European Committee for Standardization.

BS EN 10365, Hot Rolled Steel Channels, I and H Sections. Dimensions and Masses. (2017). Brüksel: European Committee for Standardization.

Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik. (2018). Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.

Çiftçi, C. (2009). *Stability of steel dome structures.* (Yüksek lisans tezi). Boğaziçi Üniversitesi: İstanbul.

Gioncu, V. (1995). Buckling of reticulated shells: state-of-the-art. *International Journal of Space Structures, 10(1)*, 1-46.

Glenn, A. H. (2010). Snap-Through Instability Patterns in Truss Structures. *In 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 12th*, (s. 2611).

Kara, T. (2019). *Tek tabakalı kubbelerin taşıyıcı sistemlerinin yönetmelikler açısından değerlendirilmesi.* (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üiversitesi: İstanbul.

Karabulut, U. (2018). *Geniş açıklıklı uzay kafes sistemlerin ilgili türk ve avrupa standartları uyarınca karşılaştırmalı olarak incelenmesi.* (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi: Trabzon.

Kurrer, K. E. (2018). *The History of the Theory of Structures: Searching for Equilibrium 2nd Ed.* Berlin, Germany: Ernst & Sohn.

Li, Y., & Xu, Y. L. (2017). Tuning and switching of band gap of the periodically undulated beam by the snap through buckling. *AIP Advances*, 7(5).

Makowski, Z. S. (1987). *Analysis, design and construction of braced domes.* Hoboken: Wiley Blackwell.

Maten, R. N. (2011). *Ultra high performance concrete in large span shell structures.* Delft University of Technology: Rotterdam.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2022, 12 02). https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=undefined&m=DIYARBAKIR adresinden alındı

Özcan, M. (2019). *Tek katmanlı uzay kafes kubbelerde çapraz eleman kullanımının tasarıma etkisinin belirlenmesi.* (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya.

Papadopoulos, C. M., & LoRicco, M. T. (2006). Symmetry-adapted computation: A case study of the Bucharest dome. *In Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, (s. 2842-2851). Montreal, Canada.

Pirhadi, P., & Maalek, S. (2018). Seismic behavior of bridges with double composive layer grid. *Conference: 11th International Congress on Civil Engineering*.

Savaşır, K. (2016). Kubbelerin yapım sistemlerinin yük aktarım prensiplerine göre İrdelenmesi. *8. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu.* İstanbul: Altan Basım.

Soykan, K. (2007). *Çelik uzay kubbe sisemlerin ağırlıkça optimum dizaynı.* (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi: Konya.

Subramanian, N. (1999). *Principles of space structures.* New Delhi: Wheeler .

Şafak, E. (2012). Yüksek Yapılardaki Rüzgar Yüklerinin Hesabı. *Türkiye Mühendislik Haberleri 471(57)*, 27-28.

Timoshenko, S. P. (1961). *Theory of Elastic Stability.* New York: McGraw-Hill Book Co. Inc.

Timoshenko, S. P., & Woinowsky-Krieger, S. (1959). *Theory of Plates and Shells.* Singapore: McGraw-Hill.

TS 498, Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri. (1997). Ankara: Türk Standartlar Enstitüsü.

TS EN 1991–1–3, Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1–3: Genel etkiler, kar yükleri. (2009). Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

TS EN 1991–1–4, Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1–4: Genel etkiler - rüzgâr etkileri. (2005). Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. (2018). Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.

Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması. (2022, 12 02). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı: https://tdth.afad.gov.tr adresinden alındı

Wang, F., & Jiang, G. (2022). Numerical Investigations of Wind Loads on Spherical Structures with Various Types of Configurations. *Buildings*, 12(11), 1832.

Yılmaz, G. (2021). *Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbelerde Berkitme Elemanı Kullanımının Tasarıma Etkisinin Belirlenmesi.* (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad	Bektaş, Mehmet Ali
Web sayfası (linkedIn)	linkedin.com/in/bektasmehmetali

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Dicle Üniversitesi – Yapı Mühendisliği	2023
Lisans	Dicle Üniversitesi – Makine Mühendisliği	2023
Lisans	Iğdır Üniversitesi – İnşaat Mühendisliği	2019
Lise	Burhanettin Yıldız TEML – Yüksek Gerilim Sistemleri	2015

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev
2021 - Devam	Çetinkayalar Yapı Elemanları AŞ	Araştırma ve Geliştirme Müdürü
2019 - 2020	Erkuş Mimarlık ve Mühendislik	Statik Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1.
2.
3.
4.

Özel İlgiler

Karakalem ve Yağlı Boya Yapmak

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	Mehmet Ali Bektaş		
Öğrenci No	20806014		
Ana Bilim Dalı	Yapı Mühendisliği		
Program Türü	Proje ☐	Yüksek Lisans ☒	Doktora ☐
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Prof. Dr. Mehmet Sedat Hayalioğlu		
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)			
Tez Başlığı	Çelik Uzay Kafes Kubbe Sistemlerinin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Ve Türk Çelik Yapılar Tasarım Yönetmeliğine Göre Analiz Ve Tasarımı		
RAPOR BİLGİLERİ			
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası		
Sayfa Sayısı	135		
Raporlama Tarihi	29.05.2023		
Benzerlik Oranı (%)	15		

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 135 sayfalık kısmına ilişkin, 29/05/2023 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından "Turnitin" isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %15 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

☐Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç

☐Kaynaklar hariç

☐Alıntılar hariç/dâhil

☒Diğer (Her şey dâhil)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Benzerlik oranım üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir,
gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: Mehmet Ali Bektaş
Tarih: 28.04.2023
İmza:

Danışman Adı, Soyadı: Prof. Dr. Mehmet Sedat Hayalioğlu İmza:

Tarih:28.04.2023

Ana Bilim Dalı Başkanı Adı, Soyadı: Prof. Dr. Z. Fuat Toprak İmza:

Tarih: 28.04.2023